

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



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 12
Projektnummer 2020-33-S-1202

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

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

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

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

ABSCHLUSS DER STUDIE

April 2021

BILDNACHWEIS

Alstom (Bombardier) & FhG IBP / Titellinnenseite

PUBLIKATION ALS PDF

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

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.210004.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.210004.01)

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 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) eine Studie mit dem Titel „Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr“ 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 übernommen hat. 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)

Das Projekt lief von Oktober 2020 bis April 2021 und spiegelt den in diesem Zeitraum verfügbaren Kenntnisstand wieder. Innerhalb dieses Zeitraums wurden unter coronabedingten Lockdownbedingungen folgende drei Arbeitspakete bearbeitet:

- Arbeitspaket 1: Erfassung und Identifizierung der Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Viren bzw. Mikroorganismen (COVID-19) in öffentlichen Verkehrsmitteln
- Arbeitspaket 2: Ausbreitungsmodellierung und Risikobewertung
- Arbeitspaket 3: Ableitung eines Maßnahmenkatalogs sowie Validierung der Modellierungsszenarien

Der vorliegende Schlussbericht umfasst die Ergebnisse des Projekts in vier Teilen – einem zusammenfassenden Kurzbericht (Teil A) sowie den Berichten zu den drei Arbeitspaketen (Teile B bis D). Aufgrund des vom Auftragnehmer gewählten Formats für den Schlussbericht kann es zu inhaltlichen und formalen Dopplungen in den Berichtsteilen kommen.

Das DZSF als Auftraggeber der Studie ist Herausgeber des vorliegenden Schlussberichts. Die Fraunhofer-Gesellschaft als Auftragnehmer der Studie übernimmt als Autorin des Schlussberichts die inhaltliche Verantwortung.

Der Herausgeber weist drauf hin, dass die im Teil B in verschiedenen Tabellen aufgeführten Vorschläge für Schutzmaßnahmen keine Reihung oder Priorisierung hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit darstellen. Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich lediglich um orientierende Messungen zur Validierung der Simulationsmodelle. Bei der Bewertung der Handlungsempfehlungen durch die verantwortlichen Stellen ist, insbesondere bei den Aspekten einer Maskenpause, der Lüftungszeiten und der Verlängerung von Standzeiten in Bahnhöfen, speziell den eisenbahnbetrieblichen Aspekten sowie der jeweils geltenden Rechtslage zum Infektionsschutz Rechnung zu tragen.

Wir hoffen, dass die Ergebnisse dieser Studie dazu beitragen, das Vertrauen der Fahrgäste in den ÖPV zurück zu gewinnen sowie den Verkehrsunternehmen dabei helfen, ihre Schutzmaßnahmen und Hygienekonzepte zu validieren und weiterzuentwickeln.

Dresden im Juni 2021

Der Herausgeber

Inhaltsüberblick

Vorwort des Herausgebers	5
Teil A Kurzbericht	9
Teil B Datenerhebung zur Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln (Arbeitspaket 1)	31
Teil C Ausbreitungsmodellierung und Risikobewertung von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln (Arbeitspaket 2)	113
Teil D Ableitung eines Maßnahmenkatalogs sowie Validierung der Modellierungsszenarien (Arbeitspaket 3)	217
Abkürzungsverzeichnis.....	317



Teil A

Kurzbericht

Inhaltsverzeichnis - Teil A

Kurzbeschreibung	13
Abstract	15
1 Einordnung	17
2 Literaturrecherche	19
3 Modellierung und Risikobewertung	22
4 Messkonzept, Feldmessungen und Handlungsempfehlungen.....	26
Quellenverzeichnis Teil A.....	30

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 (CO₂) 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 (CO₂) concentration profiles were measured in the period from November 2020 to January 2021, and wipe and airborne germ samples 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 personal hygiene and regular disinfection.

CO₂ is a commonly used marker for indoor air quality. CO₂ 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-Bestrahlung 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 Pandemie-kriterien 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.

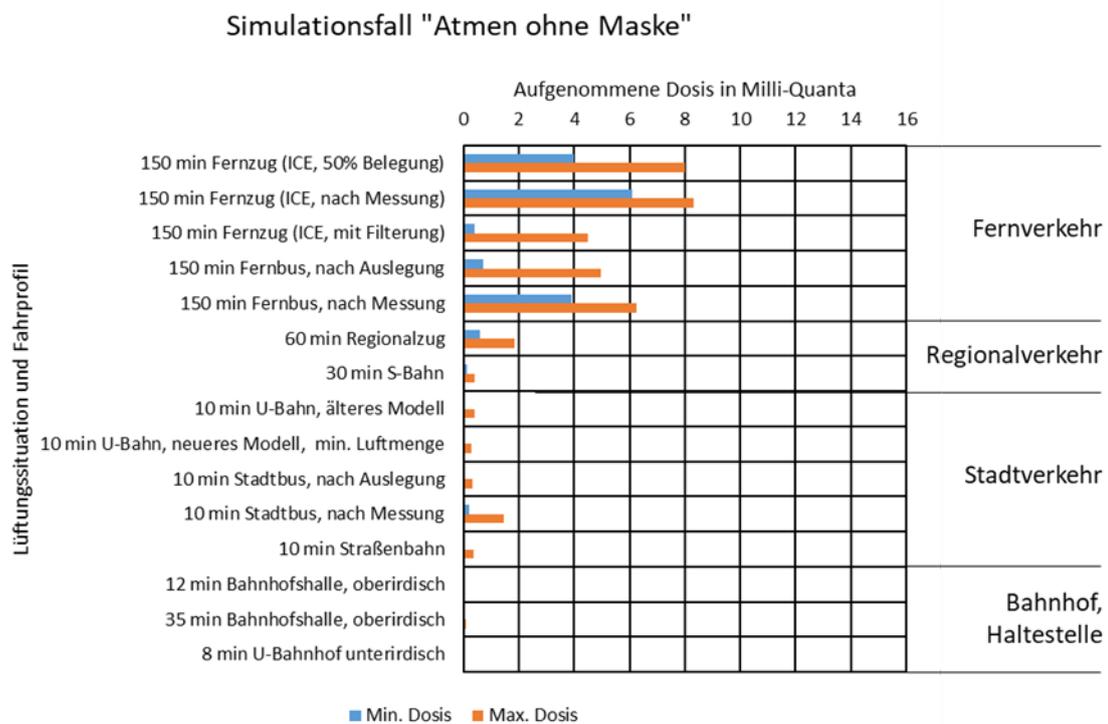


Abbildung 1: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Atmen ohne Maske". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittenten.

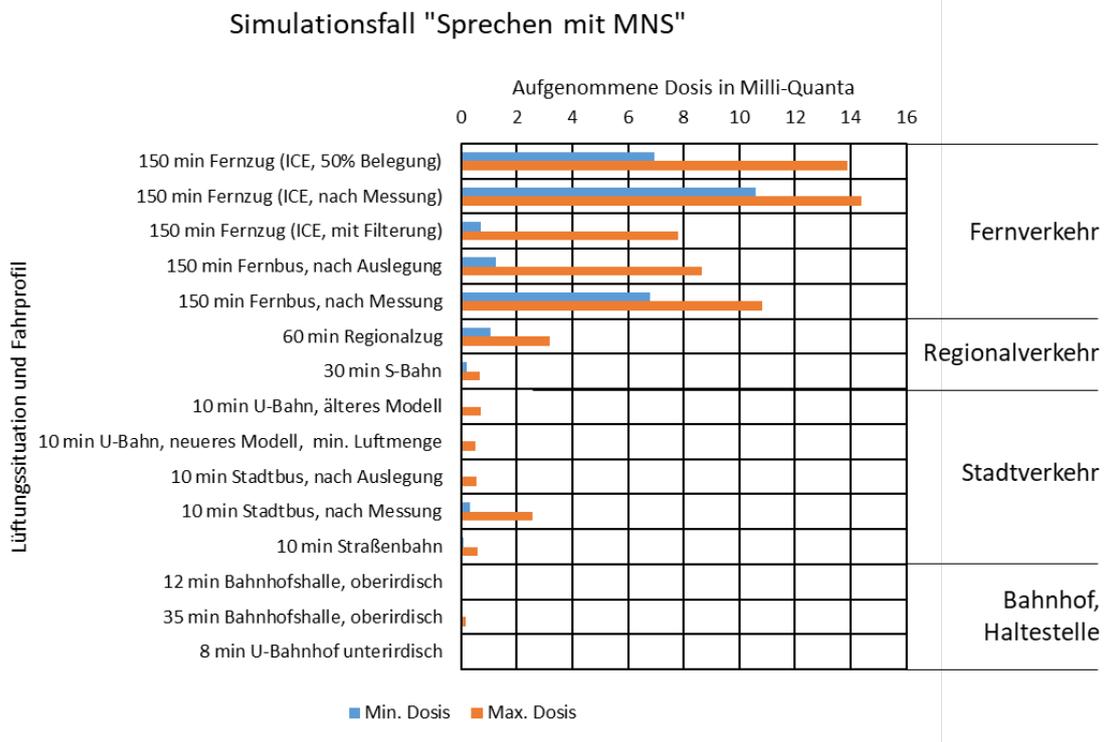


Abbildung 2: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Sprechen mit MNS". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittenten.

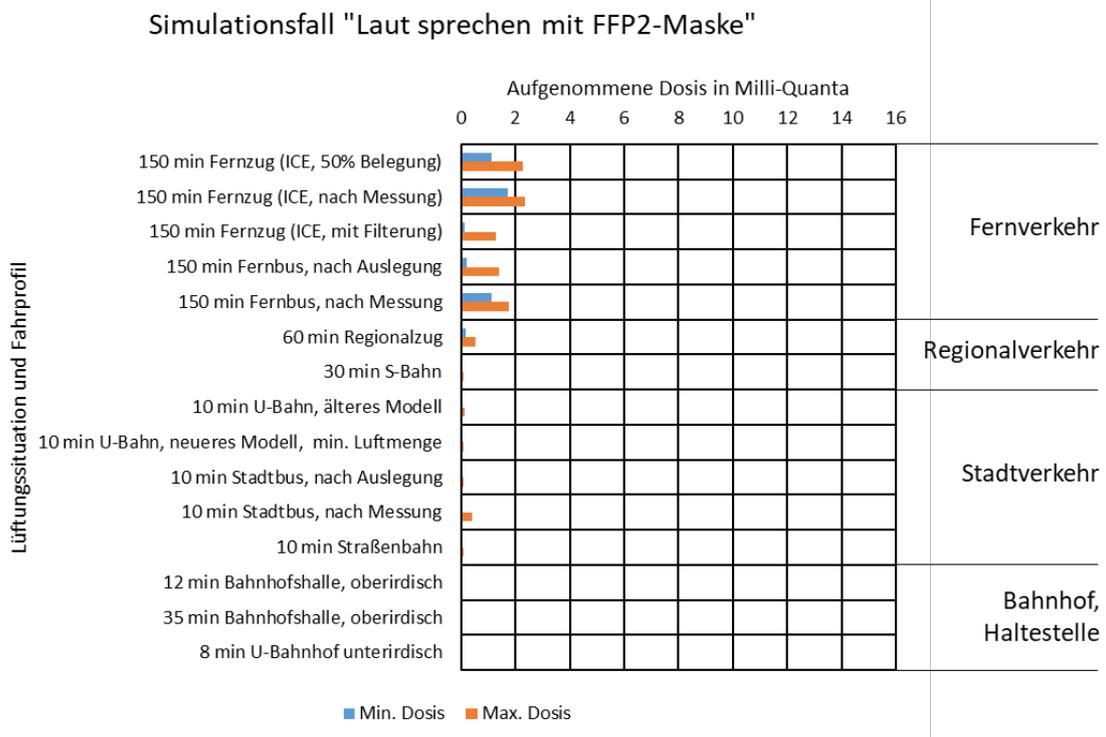


Abbildung 3: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Laut Sprechen mit FFP2-Maske". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittenten.

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 (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 Teil A

- [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 Innenraumlufthygiene-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: Quantitative 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-RpPMUJ6aXFg3PrIQBbQ/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.

Teil B

Arbeitspaket 1:

Datenerhebung zur Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln



Inhaltsverzeichnis – Teil B

Kurzbeschreibung Teil B.....	35
1 Einführung Teil B.....	36
2 Methode.....	38
3 Ergebnisse der Literaturstudie	44
3.1 Gefahrenquellen und Einflussfaktoren bei der Ausbreitung von SARS-CoV-2 im ÖV	44
3.2 Technische und betriebliche Maßnahmen zum Schutz vor Ausbreitung im ÖV	49
3.3 Verhalten und Lenkung von Fahrgästen im ÖV	66
4 Erste Gefahreneinstufung im ÖV	71
5 Eingangsparameter für Modellbildung	79
6 Wissens- und Informationslücken.....	83
7 Zusammenfassung und Ausblick Teil B.....	86
Abbildungsverzeichnis Teil B.....	90
Tabellenverzeichnis Teil B	90
Quellenverzeichnis Teil B.....	91
Anhang Teil B	103

Kurzbeschreibung Teil B

Für eine Risikoeinschätzung in Bezug auf die COVID-19 Pandemie gilt es zu klären, ob es eine Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr im Schienen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr gibt, auf welchen Wegen sich das SARS-CoV-2 Virus verbreiten kann und welche Einflussfaktoren hierbei eine Rolle spielen. Vor allem wenn es darum geht, die Entscheidung zu begründen, eine kontrollierte Lockerung oder die Wiederaufnahme eines Normalbetriebs im öffentlichen Schienen- und Straßenpersonenverkehr zuzulassen, müssen Ausbreitungspfade des Coronavirus und geeignete Schutzmaßnahmen für Fahrgäste und Mitarbeitende des öffentlichen Verkehrs (ÖV) bekannt sein.

Durch eine internationale Literaturrecherche und Datenerhebung werden in dieser Studie Kenntnisse über das Infektionsgeschehen in den Bereichen des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs gewonnen. Basierend auf den erhobenen Daten erfolgt eine erste Gefahreinstufung und eine Ableitung möglicher Schutzmaßnahmen. Zusätzlich dazu werden statistische Daten wie Fahrgastaufkommen, Streckenprofile und Fahrzeugauslastungsgrade im öffentlichen Verkehr erhoben. 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 Regeln ausgewertet, damit diese bei den abschließenden Empfehlungen zur Maßnahmenumsetzung Berücksichtigung finden.

Die Ergebnisse 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 nächsten beiden Arbeitspaketen umgesetzt und ausgewertet werden. Diese Szenarien untersuchen anhand eines Ausbreitungsmodells für aerosolgetragene Viren die Ansteckungsrisiken unter Berücksichtigung der vorab definierten Eingangsparameter. Auf diesem Wege lassen sich die unterschiedlichen Verkehrsmittel und die dabei spezifisch auftretenden Belüftungssituationen in ausreichendem Detaillierungsgrad hinsichtlich potentieller Gefahrenquellen und Ansteckungsrisiken untersuchen. Die Validierung dieser durch die Modellierung ermittelten Ergebnisse erfolgt durch eigene Messungen im ÖV im Arbeitspaket 3 (Teil D), u. a. der Mikrobiologie durch Luft- und Wischproben sowie durch weitere Messungen der Innenraumluftqualität einschließlich der Bestimmung der variablen Aerosolkonzentrationen in Verkehrsmitteln.

1 Einführung Teil B

Vor dem Hintergrund einer globalen Corona-Pandemie mit Stand Februar 2021 über 2,5 Millionen Toten besteht fortgesetzt eine sehr große Notwendigkeit, das erforderliche Wissen zu schaffen, um die vielfältigen weltweiten Folgen und Auswirkungen zu bewältigen.

Neben den möglichen Ansteckungsrisiken in anderen Lebensbereichen besteht auch großer und dringender Bedarf, besser zu verstehen, ob und inwieweit auch der öffentlichen Personennah- und -fernverkehr zum Infektionsgeschehen beiträgt und wie bestehende Gefahren minimiert werden können.

Das zentrale Ziel dieser Studie ist es, einen Beitrag zu leisten, wie die Sicherheit der Fahrgäste und des Personals der Verkehrsbetriebe des öffentlichen Verkehrs (ÖV) während und nach der Pandemie gewährleistet werden kann.

Um die wirksamsten Schutzmaßnahmen identifizieren und auswählen zu können, ist die Kenntnis über mögliche Verbreitungswege von SARS-CoV-2 Erregern und die damit verbundenen Ansteckungsgefahren in den Verkehrsmitteln, an Bahnhöfen und Haltestellen des ÖV von zentraler Bedeutung.

Ziel des diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeitspakets 1 (AP 1) war es deshalb, durch eine umfangreiche internationale Literatur- und Datenanalyse bestehendes Wissen zu den spezifischen Herausforderungen im ÖV zu ermitteln und die relevantesten Studien auszuwerten.

Die Methodik wie die Daten und Literaturrecherche durchgeführt wurde, sowie die untersuchten Themenfelder sind im Kapitel 2 beschrieben.

Die Datenbestands- und Literaturrecherche wurde sehr breit und international angelegt, um möglichst die gesamte für den Fahrgastbetrieb relevanten, publizierten Daten zu gewinnen. Die Recherche wurde im 4. Quartal des Jahres 2020 durchgeführt und konzentrierte sich insbesondere auf folgende Punkte:

- Übertragungswege von SARS-CoV-2 im ÖV
- Quantitative Berichte zur Übertragung von SARS-CoV-2
- Einflüsse auf die Infektiosität von SARS-CoV-2
- Emission, Diffusion, Deposition- und Verdampfungsverhalten von Partikeln und Aerosolen
- Bedeutung von Klimaanlage, Filter- und Reinigungstechnologien bei der Verbreitung/Eindämmung von Mikroorganismen, Sporen, Pilzen und vor allem Viren
- Bedeutung weiterer technischer Einrichtungen zur Lüftung (z. B. Fenster, Türöffnungsintervalle)
- Bereits getroffene Schutzmaßnahmen und deren Bewertung
- Untersuchung zum Fahrgastaufkommen vor der SARS-CoV-2 Pandemie und im weiteren Verlauf bis Ende 2020

Im Kapitel 3 sind die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche sowie zu ableitbaren Risikoeinschätzungen für den öffentlichen Verkehr zusammengefasst dargestellt. In diesem Kapitel wird nicht nur herausgearbeitet, welche Situationen im ÖV ein besonders hohes Gefahrenpotential beinhalten können, sondern auch welche Maßnahmen die identifizierten Gefahren wirksam begrenzen können.

Dazu erfolgt im Abschnitt 3.1 zunächst die Identifizierung und Bewertung möglicher Verbreitungs- und Gefahrenquellen einschließlich der Erfassung spezifischer Einflussgrößen bei der Ausbreitung von Mikroorganismen in Personenzügen, Bussen sowie in Bahnhöfen.

Im Abschnitt 3.2 werden technische und betriebliche Maßnahmen zum Schutz vor Ausbreitung des hier betrachteten SARS-CoV-2-Virus im ÖV abgeleitet.

Im Abschnitt 3.3. wird das Verhalten einer großen Anzahl von Fahrgästen im eingeschränkten und im Normalbetrieb sowie die Lenkung großer Menschenströme bzw. Fahrgäste in Bahnhöfen (Crowd-Management) untersucht.

Anschließend wird im Kapitel 4 eine erste Gefahreneinstufung (technisch und medizinisch) erstellt.

Im Kapitel 5 werden die Eingangsparameter beschrieben, die im Arbeitspaket 2 (Teil C) bei der Modellierung und Simulation Eingang finden bzw. diese überhaupt ermöglichen.

Die im Zuge der Recherche identifizierten Wissens- und Informationslücken werden im Kapitel 6 dokumentiert und hinsichtlich ihres Aufarbeitungs-/Aussagepotentials bewertet.

Darauf folgt im Kapitel 7 die Zusammenfassung und der Ausblick. Anschließend finden sich das Abbildungsverzeichnis und das Tabellenverzeichnis.

Nach dem Quellenverzeichnis beinhaltet der Anhang die im Studien- und Untersuchungsdesign geforderte Übersicht zu normativen und rechtlichen Vorgaben, die bei der Entwicklung von Schutzmaßnahmen im weiteren Projektverlauf berücksichtigt werden müssen.

2 Methode

Die Aufgabenstellung im Arbeitspaket 1 erforderte eine breite Untersuchung auf mehreren Themenfeldern. Zur systematischen Strukturierung der breiten Daten- und Literaturrecherche wurden in Einklang mit der Zielstellung von AP 1 folgende Themenfelder abgegrenzt:

1. Quantitative Analysen des Infektionsgeschehens von SARS-CoV-2 im ÖV
2. Technische Einrichtungen mit Beitrag zur Verbreitung/Eindämmung von SARS-CoV-2 im ÖV
3. Übertragungswege von SARS-CoV-2 im ÖV
4. Einflüsse auf die Infektiosität von SARS-CoV-2
5. Luftübertragung durch Partikeln und Aerosole im ÖV
6. Schutzmaßnahmen im ÖV und deren Bewertung
7. Fahrgastaufkommen und Maßnahmen zur Fahrgastlenkung
8. Verhalten einer großen Anzahl Reisender
9. Relevante Regeln und Normen des Bahnverkehrs
10. Virologische Aspekte der Inaktivierung von SARS-CoV-2 durch UV-Strahlung
11. Technische Umsetzung von Reinigungsverfahren mit UV-C-Strahlung

Zu Beginn des Arbeitspaketes wurde das Spezialgebiet UV-Inaktivierung, welche auch als „Ultraviolet Germicidal Irradiation“ (UVGI) bezeichnet wird, als wichtiger Baustein in der Entwicklung von effizienten Reinigungsmaßnahmen identifiziert. Die Recherche konzentrierte sich im Themenfeld 10 auf die Virologie von UV-basierten Dekontaminationsstrategien, wohingegen Themenfeld 11 die technischen Lösungen als Untersuchungsgegenstand hatte.

Methodik der Datenerhebung und Auswertung

Die Datenerhebung wurde methodisch mit mehreren wissenschaftlichen Rechercheansätzen durchgeführt. Der aktuelle Stand der medizinischen, virologischen und epidemiologischen Erkenntnisse zu Infektiosität und Übertragungswegen von SARS-CoV-2 wurde ebenfalls durch die Literaturrecherche erhoben.

Daneben wurde die Wirksamkeit von Klima- und Lüftungsanlagen im Zusammenhang mit der Reduktion bzw. Verbreitung von luftgetragenen Virenpartikeln recherchiert. Das Design der technischen Anlagen in den unterschiedlichen Fahrzeugen oder Bauwerken wird stark von normativen Vorgaben bestimmt. Diese Normen beinhalten Vorgaben über Frischluftmengen, Umluftmengen, Filterung, Luftqualität etc. und somit die Basis für die technische Auslegung.

Die Belegungsdichte in Innenräumen von Zügen oder Bussen sowie Bahnhöfen wird sehr stark durch rechtliche Anforderungen bestimmt, um z. B. Hygiene- oder Brandschutzanforderungen zu erfüllen. Wichtige Schlüsselinformationen zur Beschreibung und Beurteilung der Ist-Situation wurden aus Normen, Standards sowie dem gültigem Betriebsrecht für öffentliche Verkehrssysteme entnommen. Die geltenden Normen und Regelwerke, welche bei den weiteren Überlegungen im Projekt Berücksichtigung finden, sind im Anhang aufgeführt.

Um realitätsnahe aktuelle Informationen über das Fahrgastaufkommen zu erhalten, wurden einschlägige Statistiken bemüht. Im Portal statista werden beispielsweise verschiedene Statistiken zum Fahrgastaufkommen im öffentlichen Personennah- und -fernverkehr vor und während der Pandemie zusammengefasst. Diese wurden mit den Zahlen zur Real- und Maximalbelegung von Schienenfahrzeugen verglichen. Letztere resultieren u. a. aus gesetzlichen Vorgaben zur Festigkeitsauslegung und zu maximalen Radsatzlasten zur Begrenzung der Belastung von Bauwerken. Die Auftragnehmer konnten dabei auf Untersuchungen über reale Fahrgastzahlen und der Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug zurückgreifen, die an Straßenbahnfahrzeugen durchgeführt worden waren. Diese Erkenntnisse wurden auf andere Fahrzeuge

des ÖV übertragen. Neben vielen wichtigen Erkenntnissen wurden auch relevante Wissenslücken und weiterer Forschungsbedarf identifiziert, welche in Kapitel 6 dokumentiert sind.

Recherchemethoden für einzelne Themenfelder

Für Themenfeld 1 wurde das PRISMA-Verfahren genutzt (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis), um daraus quantitative Aussagen für eine evidenzbasierte Risiko- und Gefahren-einschätzung zu erhalten. Dabei wurde jede einzelne gefundene Studie im Hinblick auf die Studienpopu- lation (Nationalität, Alter, Geschlecht etc.), die Exposition (Reisen mit Bahn oder Bus), Kontrollgruppe und die SARS-CoV-2-Infektion bzw. COVID-19-Erkrankung (Erkrankung, Selbstangabe, Nachweis durch PCR- Test) beschrieben.

Für die wissenschaftlichen Themenfelder 3, 4, 5, 8 und 10 wurden entsprechende Methoden der Litera- tur- und Datenerhebung verwendet. Für die Themenfelder mit eher technischem oder normativem Cha- rakter wie Feld 2, 6, 7, 9 und 11 wurden Mindestanforderungen an die Recherche gestellt. Das heißt, die genutzten Quellen, die verwendete Suchstrategie (inklusive der genutzten Suchbegriffe) sowie die Krite- rien der Literatursauswahl sind hier nachgewiesen. Tabelle 1 fasst die Methoden der Literaturrecherche für alle Themenfelder zusammen.

TABELLE 1: METHODEN DER LITERATURRECHERCHE FÜR UNTERSUCHTE THEMENFELDER (TF)

TF.	Genutzte Quellen	Suchstrategie	Auswahlverfahren
1	PubMed, Web of Sci- ence	Systematisches Review entsprechend Preferred Reporting Items for System- atic Review and Meta-analysis (PRISMA) Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): Coronavirus, SARS-CoV-2, COVID-19, passenger, transportation, bus, coach, rail, subway, transportation facilities Identifizieren aller einschlägigen Publi- kationen im ersten Schritt Schneeballverfahren	Zeitraum 01.01.2019 - 24.11. 2020 Berücksichtigung nicht epide- miologischer Studien in erster Auswahl Editorials, Übersichtsartikel, kli- nische Fallstudien und Tierstu- dien wurden in dem Review nicht berücksichtigt Ausschluss von Simulationsstu- dien, experimentellen Studien
2	Organisationsseiten von ASHRAE, REHVA (Federation of Euro- pean Heating, Venti- lation and Air Condi- tioning Associations), ECDC (European Centre for Disease Prevention and Con- trol) und ERA (Eisen- bahnagentur der Eu- ropäischen Union) Normen zum Thema Filtration	Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): Coronavirus, SARS-CoV-2, COVID-19, öffentlicher Verkehr, öffentliche Transportmittel mit – Begriffen zur Luftreinigung: air filter, filtration, high efficiency particulate air, HEPA, air cleaning, air purification, air purifier, electrostatic precipitator – Begriffen, die sich auf Innenräume beziehen: aircraft, car, subway, indoor air, indoor, indoor environment, vehicle, train, railway – Begriffen im Zusammenhang mit Luftschadstoffen: particulate matter,	Zeitraum bis Dezember 2020 Original-Forschungsartikel in deutscher und englischer Spra- che Artikel, die für die identifizierten zentralen Forschungsfragen (öf- fentlicher Verkehr) relevant sind Lehrbücher, Designrichtlinien, Normen und Übersichtsartikel wurden nicht ausgeschlossen

	<p>Datenbanken: ScienceDirect/Elsevier, Wiley Online Library, PubMed</p> <p>Ergänzend: Google Scholar, Semantic Scholar</p>	<p>particulates, particle, dust, PM10, PM2.5, bacteria, virus, fungi, fungus, microorganism, mold, pollen, droplet, droplet nuclei, aerosol, bio-aerosol, air pollutant, air contaminant, airborne pollutant, airborne contaminant, respirable suspended particulate</p>	
3	<p>Google Scholar, PubMed, medRxiv</p> <p>Robert-Koch-Institut (RKI), Weltgesundheitsorganisation (WHO), Centers for Disease Control (CDC), Johns-Hopkins-Universität, Bundesgesundheitsamt</p> <p>Journals (Nature, Science, Cell, Lancet, New England Journal of Medicine, Emerging Infectious Diseases)</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): SARS-CoV-2, transmission, transmission factors, age, aerosols, droplets, stability, WHO, RKI</p>	<p>Medizinisch-biologische Publikationen (Paper und Reviews), um die SARS-CoV-2-Themenbereiche aus medizinisch-biologischer Sicht zu erläutern</p> <p>Möglichst aktuelle Publikationen für SARS-CoV-2; vergleichende Studien mit anderen (Corona-)Viren, auch älter (10-20 Jahre)</p> <p>Technische Informationen (z. B. virale UV-C-Inaktivierung), auch älter (1950er bis heute)</p> <p>Peer-reviewed Publikationen wurden Pre-prints vorgezogen, was aber kein Ausschlusskriterium war; die Studien wurden ausgewählt, da sie die SARS-CoV-2-Themengebiete aussagekräftig beschreiben.</p>
4	<p>Scopus, Web of Science (Core Collection und MEDLINE) Springer Link, ScienceDirect, PubMed, Cochrane Library, LILACS, medRxiv, bioRxiv</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): indoor air, temperature, humidity, SARS-CoV-2, climate conditions, building, transport vehicle, effect, influence, impact</p>	<p>Auswahl von Literaturstellen</p> <ul style="list-style-type: none"> – nicht im Zeitraum zwischen Dezember 2019 und Januar 2020 – nicht ausschließlich die Sterblichkeit von COVID-19 untersuchend – mit Schwerpunkt auf die Luft-Temperatur und -Feuchtigkeit <p>Beachtung von Literaturstellen, die</p> <ul style="list-style-type: none"> – auch vor dem Jahr 2020 als relevant erscheinen, insbesondere wenn es um den SARS-Coronavirus-1 im engen Zusammenhang mit Temperatur- und Feuchteuntersuchungen geht – in ihrer Auswertung eine Zeitverzögerung von 7 bis 14 Tagen beachten und so die Inkubationszeit berücksichtigen

			<ul style="list-style-type: none"> – in ihrer Auswertung eine Unterscheidung zwischen relativer und absoluter Feuchte treffen – ganz speziell das Innenraumklima berücksichtigen
5	<p>Web of Science (Clarivate Analytics), SCOPUS (Elsevier), Google Scholar (Google LLC) und medRxiv</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe: public transport, SARS-COV, COVID, virus, emission, evaporation, dynamic, aerosol, droplet, transport, bus, train, airplane, public transport/transportation</p> <p>Schneeballverfahren</p>	<p>Extraktion aus Querverweisen anderer Publikationen Übertragbarkeit der Ergebnisse von Innenräumen auf ÖV</p> <p>Übertragbarkeit von Studien mit anderen Virenarten (z. B. Influenza)</p>
6	<p>Google-Scholar</p> <p>Archiv der Marke Eurailpress der Verlagsgruppe DVV Media Group GmbH (einschlägige Publikationen der Schienenverkehrsbranche)</p> <p>Archiv der Fachzeitschrift ZEVrail des Georg Siemens Verlag GmbH & Co. KG</p> <p>Allgemeine Desktop-Recherche</p> <p>Archive der Bibliotheken der Technischen Universitäten Dresden und Berlin</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): Corona, Covid, railway, public transport, rail vehicle, train, bus, station, measures</p>	<p>Wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften</p> <p>Artikel in Zeitungen</p> <p>Veröffentlichungen von Unternehmen</p> <p>Veröffentlichungen, Richtlinien und Studien von Verbänden sowie staatlichen und internationalen Organisationen</p>
7	<p>Google-Scholar</p> <p>Archiv der Marke Eurailpress der Verlagsgruppe DVV Media Group GmbH (einschlägige Publikationen der Schienenverkehrsbranche)</p> <p>Archiv der Fachzeitschrift ZEVrail des Georg Siemens Verlag GmbH & Co. KG</p> <p>Allgemeine Google-Suche</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): Fahrgastzahlen (2020), Corona/Covid, public transport, passenger numbers, ÖV, ÖPNV, Fahrgastlenkung, Crowd Management, Fahrgast, Leitsystem, Station, Bahnhof, passenger flow</p>	<p>Wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften</p> <p>Artikel in Zeitungen</p> <p>Veröffentlichungen von Unternehmen</p> <p>Veröffentlichungen von Verbänden sowie staatlichen und internationalen Organisationen.</p>

<p>8</p>	<p>Scopus, PubMed, Google Scholar</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): pandemic, sars-cov-2, corona, covid, covid-19, lockdown, shutdown, psycholog*, social, distancing, rule*, behavior*, behaviour*, attitude*, belief*, assumption, habit, mask, wash, hand, disinfection, crowd, people, traveler, traveller, passenger, train, railway, station, subway, bus, streetcar, trolley, tube, metro, underground, terminal, public transport</p> <p>Vorwärts- und Rückwärtssuchen mit relevanten Quellen</p> <p>Weitere Suche mit den Begriffen (jeweils Englisch und Deutsch): Compliance (audit), adherence to (social distancing, mask wearing), monitoring, (use of) face coverings, application errors (im Maskenkontext), physical distancing, interpersonal distancing, concerns, fears, anxiety, capacity, density, commuter</p>	<p>Auswahl relevanter Publikationen nach den folgenden Kategorien:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mobility Behavior: Veränderungen des Mobilitäts- und Reiseverhaltens der Bevölkerung in verschiedenen Teilen der Welt zu verschiedenen Zeitpunkten der Corona-Pandemie, Berücksichtigung von ModeratorVariablen (u. a. Demographie, Bildungsstandard, Geschlecht, Alter, Informiertheit) – Personal Behavior: Individualverhalten von Personen und kleinen Gruppen (Sich-ins-Gesicht-Fassen, Abstand halten, Masken tragen) – Crowd Behavior and Management: Beobachtung und Steuerung von Menschenmassen an Bahnhöfen oder in den Verkehrsmitteln – Public Behavior and Measures in General: öffentliches Verhalten, Regelkonformität und verhaltensändernde Maßnahmen im Kontext der Pandemiebekämpfung ohne direkten Bezug zum öffentlichen Verkehr
<p>9</p>	<p>Internetseite des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA)</p> <p>Archiv der Marke Eurailpress der Verlagsgruppe DVV Media Group GmbH (einschlägige Publikationen der Schienenverkehrsbranche)</p> <p>Archiv der Fachzeitschrift ZEVrail des Georg Siemens Verlag GmbH & Co. KG</p> <p>Allgemeine Desktop-Recherche</p>	<p>Verwendete Stichworte orientieren sich an den Informationen von ERA und EBA bezüglich der Zulassung von Fahrzeugen, Veränderung an Fahrzeugen (Innenraumgestaltung) und Stationen sowie Plangenehmigungen von Infrastrukturanlagen</p>	<p>Durch die Recherche besonders in den Archiven der Fachzeitschriften sind Sekundärquellen mit Verweis auf Normen, Richtlinien etc. gefunden worden. Diese finden keinen Eingang in dieses Review, es werden ausschließlich die relevanten Normen etc. angegeben:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Gesetzgebung und Normen der Europäischen Union – Gesetzgebung und Normen der Bundesrepublik Deutschland – Regelwerke der Betreiber des ÖV – Veröffentlichungen, Richtlinien und Studien von Verbänden sowie staatlichen und internationalen Organisationen

<p>10</p>	<p>Google Scholar, Pubmed, medRxiv</p> <p>Robert-Koch-Institut (RKI), Weltgesundheitsorganisation (WHO), Centers for Disease Control (CDC), Johns-Hopkins-Universität, Bundesgesundheitsamt</p> <p>Journals (Nature, Science, Cell, Lancet, New England Journal of Medicine, Emerging Infectious Diseases)</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): SARS-CoV-2, UV, UV-C, decontamination, inactivation, relative humidity, RKI</p>	<p>Medizinisch-biologische Publikationen (Paper und Reviews), um die SARS-CoV-2-Themenbereiche aus medizinisch-biologischer Sicht zu erläutern</p> <p>Möglichst aktuelle Publikationen für SARS-CoV-2; vergleichende Studien mit anderen (Corona-)Viren, auch älter (10-20 Jahre)</p> <p>Technische Informationen (z. B. virale UV-C-Inaktivierung), auch älter (1950er bis heute)</p> <p>Peer-reviewed Publikationen wurden Pre-prints vorgezogen, was aber kein Ausschlusskriterium war; die Studien wurden ausgewählt, da sie die SARS-CoV-2-Themengebiete aussagekräftig beschreiben</p>
<p>11</p>	<p>Google Scholar, Google</p>	<p>Kombination der Suchbegriffe (jeweils Englisch und Deutsch): UVC, UV-C, UV, ultraviolet, Corona, pandemic, Covid, Covid 19, Covid-19, light, lighting, LED, transportation, public transportation, train, bus, coach, railway, aviation, indoor, climatisation system, HVAC, ventilation systems, China, Asia, Europe, America, India, Europe, Germany, radiation, irradiation, germicidal, disinfection, flexible, mobile, transportable</p>	<p>Peer- und nicht Peer-reviewed Journals</p> <p>Herstellerinformation vor allem zu technischen Daten wie Strahlungsquellen</p> <p>Erfahrungsberichte und Whitepaper von Betreibern und Verbänden im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel</p> <p>Veröffentlichungen von technischen Gesellschaften wie ASHRAE, IUVID (»IUVA COVID-19 Task Force«)</p>

3 Ergebnisse der Literaturstudie

3.1 Gefahrenquellen und Einflussfaktoren bei der Ausbreitung von SARS-CoV-2 im ÖV

Seit dem Ausbruch von COVID-19 im Dezember 2019 in Wuhan, China, trugen zahlreiche Forschungsergebnisse zum Verständnis dieses neuen Virus und seiner Ausbreitungsbedingungen bei.

Deswegen wird hier die epidemiologische Evidenz für einen Zusammenhang von COVID-19 bzw. Infektionen mit SARS-CoV-2 bei Reisen mit Bahn und Bus systematisch untersucht. Dadurch soll die Frage beantwortet werden, ob es ein nachweisbares Risiko gibt, sich während Reisen mit der Bahn (einschließlich U-Bahn und S-Bahn) und Bus (Fernverkehr und Nahverkehr) mit SARS-CoV-2 anzustecken.

Quellen und Pfade für die Übertragung von SARS-CoV-2

Es werden im Wesentlichen drei Übertragungswege diskutiert [1]:

- Übertragung durch den direkten Kontakt mit dem Virus durch eine infizierte Person oder kontaminierte Oberfläche,
- Übertragung durch Tröpfchen unterschiedlicher Größe, die das Virus enthalten, die von einer infizierten Person emittiert werden,
- Übertragung kleinster Tröpfchen und Partikel (Aerosole), die das Virus enthalten und in der Luft längere Zeit schweben und größere Distanzen überwinden können.

Insbesondere wird vermutet, dass Aerosoltransmission in geschlossenen Räumen für eine Vielzahl an COVID-19-Ausbrüchen verantwortlich ist. Eine Tröpfchen-Transmission oder die Übertragung durch kontaminierte Oberflächen kann hier allerdings nicht eindeutig ausgeschlossen werden. Es konnten Abstriche von Oberflächen positiv auf SARS-CoV-2 getestet werden, teilweise bedingt durch absinkende Luftpartikel. Obwohl die indirekte Transmission über den Kontakt zur kontaminierten Oberfläche auf die Schleimhäute möglich ist, ist die alleinige Transmission von SARS-CoV-2 über Oberflächen umstritten, da weitere Übertragungsrouten nicht auszuschließen sind. Der Kontakt zu kontaminierten Oberflächen ist meist auch mit dem (engen) Kontakt infizierter Personen verbunden, sodass die Unterscheidung zur Tröpfcheninfektion schwierig ist. Dennoch wird die Oberflächentransmission von SARS-CoV-2 ebenso wie bei anderen respiratorischen Viren durchaus angenommen [2].

Bis jetzt wird angenommen, dass Menschen mit SARS-CoV-2-Infektion in seltenen Fällen auch andere Säugetiere infizieren können. Die Transmission zurück auf den Menschen ist noch nicht dokumentiert worden, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Einflussfaktoren auf die Übertragung und Verbreitung

Weitere wichtige Faktoren für die Transmission von SARS-CoV-2 sind insbesondere das Kontaktverhalten, die Umweltbedingungen und der Gesundheitszustand des Wirtes (des Menschen). Ein hohes Transmissionsrisiko besteht bei engem Kontakt zu einer infizierten Person. Diese Kenntnis führte zu den Empfehlungen des Abstandhaltens. Das Center for Disease Control (CDC) der USA nennt hierbei einen Mindestabstand von 2 m [3]. Die WHO empfiehlt einen Abstand von 1 m [2]. In Deutschland wird ein Abstand von mindestens 1,5 m empfohlen [4]. Die unterschiedlichen Empfehlungen zu den Abständen ergeben sich aus den unterschiedlichen Einschätzungen, in welchem Abstand die Tröpfchen nach dem Ausstoßen zu Boden sinken.

Insbesondere im Haushalt einer infizierten Person ist das Infektionsrisiko hoch. Ein systematisches Review zum Infektionsrisiko mit SARS-CoV-2 im häuslichen Bereich identifiziert 54 Studien mit insgesamt 77.758 Teilnehmern [5]. Die Metaanalyse ergab eine Ansteckungsrate von insgesamt 16,6 % (95 % Konfidenzintervall 14,0 % – 19,3 %), wenn man mit einer infizierten Person im Haushalt zusammenlebt. Diese große Metaanalyse zeigt, dass sich bei weitem nicht alle Personen eines Haushalts mit SARS-CoV-2 infizieren, wenn ein Haushaltsmitglied infiziert ist.

Sogenannte Superspreading Events, bei denen sich eine große Anzahl an Menschen aufgrund des engen Kontakts infizieren, geschehen am häufigsten in Innenräumen [6]. Insbesondere, wenn diese Räume nicht aktiv be- und entlüftet werden, sind Aerosol-Transmissionen auch bei Abständen größer als 2 Meter möglich [7], [3]. Die Aerosol- und Tröpfchen-Transmission von COVID-19 kann direkt, indirekt oder über engen Kontakt mit infizierten Personen geschehen, deren respiratorischen Sekrete infektiöse Partikel enthalten, die wiederum über Husten, Niesen, Sprechen oder Singen als Tröpfchen um die 5–10 µm ausgestoßen werden. Tröpfchen mit einem Durchmesser unter 5 µm werden laut WHO als Tröpfchenkerne oder Aerosole bezeichnet [8]. Laut [9] ist jedoch der Größenbereich nicht genau definiert und wird typischerweise mit Durchmessern von etwa 1 bis 2 Nanometern bis hin zu über 100 Mikrometern angegeben. Insbesondere der enge Kontakt innerhalb eines Meters erhöht die Gefahr einer Tröpfchen-Transmission. Zudem ist die indirekte Übertragung über kontaminierte Oberflächen und Trägermaterialien für SARS-CoV-2 möglich. Im Gegensatz hierzu können bei der Luftübertragung aerosolisierte SARS-CoV-2-Partikel über lange Entfernungen und über längere Zeit ihr infektiöses Potential beibehalten [10], [11], [12], [13], [14]. Einige Modelle haben bereits versucht, die SARS-CoV-2-Transmission über Aerosole zu beschreiben. Bereits normales Atmen und Sprechen führt zur Aerosolbildung, da ausgestoßene Tröpfchen zu Aerosolen verdunsten können [15], [16], [17]. Allerdings sind das Verhältnis von Tröpfchen, Verdunstungsrate und benötigter Infektionsdosis von SARS-CoV-2 im Aerosol nicht bekannt. Dennoch konnten bereits viele Studien für andere respiratorische Virustypen zeigen, dass Aerosole eine wichtige Transmissionsroute sind [18], [19]. Dementsprechend sind insbesondere Sprechen und Atmen wichtige Faktoren bei der SARS-CoV-2-Transmission.

Experimentelle Studien zur Aktivität und infektiösen Fähigkeit von SARS-CoV-2 konnten unter Laborbedingungen erfolgreich infektiöse Partikel aus Aerosolen isolieren. Eine Studie konnte über 90 min. hinweg aktive SARS-CoV-2-Viren in Aerosolen aus künstlichem Speichel und Zellkulturmedium detektieren [20]. Infektiöses SARS-CoV-1 und SARS-CoV-2 konnte bis zu 3 h in der Luft mit einer Halbwertszeit von 1,1 h in Aerosolen bei Raumtemperatur und 65 % relativer Luftfeuchte nachgewiesen werden [21], wohingegen eine weitere Forschergruppe aktives SARS-CoV-2 bis zu 16 h in Aerosolen detektierte [22].

In einer Studie konnte man infektiöses SARS-CoV-2 auf unterschiedlichen Oberflächen (wie Edelstahl, Glas, PVC sowie Polymer- und Papiergeldscheinen) bei einer Inkubation von 20 °C nach 28 Tagen feststellen. Nach der Inkubation bei 30 °C wurden infektiöse Viren bis zu sieben Tage nach der Inokulation auf Edelstahl, Glas und Polymergeldscheinen gefunden, auf Polyvinylchlorid (PVC) konnte auch nach 3 Tagen noch infektiöse Viren detektiert werden. Auf Papiergeldscheinen war das Virus bis zu 21 Tage infektiös [23].

Weitere Studien mit SARS-CoV-1 und -2 sowie dem MERS-Corona-Virus deuten trotz variierender Absolutwerte darauf hin, dass diese Viren auf Oberflächen bei mittlerer relativer Luftfeuchte (40 % – 65 %) und kühlen bis mäßig-warmen Temperaturen länger stabil und damit infektiös bleiben [21], [24], [25], [26].

Eine Studie konnte auf das Risiko der Kontakttransmission hinweisen. Die Autoren zeigten, dass SARS-CoV-2 bei 25 °C und relativer Luftfeuchte von 45 % bis 55 % durchschnittlich bis zu 9 h auf menschlichen Hautpräparaten infektiös bleibt [27].

Umweltfaktoren mit Einfluss auf die Infektiosität von SARS-CoV-2

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zeigen eindeutig, dass niedrige Temperaturen und niedrige Feuchtwerte der Luft das Infektionsgeschehen begünstigen. [28] gibt eine Übersicht der in der Literatur genannten Temperatur und Feuchtwerte. Den Untersuchungen liegen statistische Ermittlungsmethoden zugrunde. Häufig kommt die Methode der generalisierten linearen Modelle (GLM, engl. GAM) für die mathematisch-statistische Verknüpfung der Wetterdaten mit den COVID-19-Fallzahlen zum Tragen.

In der Mehrzahl der Literaturstellen, die in [28] untersucht wurden, wird der folgende Zusammenhang beschrieben: „Je höher die Temperatur und je höher der Feuchtegehalt, desto geringer ist die SARS-CoV-2-Übertragung.“

Die relative Luftfeuchte in Innenräumen spielt bei dieser Transmissionsroute somit eine bedeutende Rolle [29]. Dabei stehen die von einer Person ausgeatmeten Tröpfchen im Fokus, die je nach relativer Feuchte der Atemluft entweder verdampfen oder zu größeren Tröpfchen heranwachsen. Wird beispielsweise ein virenbeladenes Aerosol-Tröpfchen von einer infizierten Person bei trockener Innenraumluft ausgeatmet, so passt sich der Wasserdampfpartialdruck an der Tröpfchenoberfläche an die trockenen Umgebungsbedingungen an. Der daraus resultierende Wasserverlust führt zu einer Veränderung der gelösten Konzentration von Proteinen und Salzen oder auch zu einer Änderung des pH-Werts. Während der Verdunstung des Wassers verkleinern sich die Tröpfchen zu Mikrotröpfchen, was zu einer Verlängerung der Verweildauer in der Luft führt. Nach einiger Zeit wird die Konzentration der suspendierten Viruspartikel ansteigen, insbesondere bei geringer Frischluftzufuhr. Dadurch steigt das Infektionsrisiko an öffentlichen Orten wie Krankenhäusern oder Restaurants.

Drei wesentliche Prozesse, in denen die relative Luftfeuchte eine tragende Rolle spielt, werden in [29] genannt:

- Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen innerhalb der viralen Tröpfchen
- Erhaltung der Infektiosität oder Inaktivierung von SARS-CoV-2 auf Oberflächen sowie die
- Rolle der trockenen Innenraumluft bei der luftgetragenen Übertragung von Viren

In Bezug auf den Verbleib von Mikroorganismen innerhalb der virusbeladenen Tröpfchen ist zu bedenken, dass die Übertragung von hochinfektiösen Krankheiten wie COVID-19 nur mit außerhalb des Wirtskörpers aktiven Erregern erfolgen kann [29].

Genau hier spielt die relative Luftfeuchte eine tragende Rolle: Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von unter 33 % und bei 100 % bleiben die Viren intakt, während bei Werten der relativen Feuchte zwischen 34 % und 99 % die Infektiosität des SARS-CoV-2 erheblich reduziert ist [29].

Insbesondere ergibt sich bei relativen Luftfeuchtwerten um die 55 % bis 60 % eine deutlich geringere Infektionsfähigkeit der Viren. Die Begründung liegt im Verdunstungsvorgang der Tröpfchen, der maßgeblich durch die Luftfeuchte beeinflusst wird. Dabei erweist sich der sogenannte Anreicherungsfaktor (das heißt die berechnete Konzentration des gelösten Stoffes bei einer bestimmten Wassermenge) als wichtige Größe. Bei niedriger relativer Luftfeuchte (< 43 %) steigt der Anreicherungsfaktor mit der Tröpfchenverdampfung schnell an, um nach vollständiger Austrocknung die Viruslast freizugeben.

Die mittleren Werte der Luftfeuchte (55 % bis 60 %) erweisen sich also als entscheidend zur Reduzierung der Infektiosität der Viren im Aerosol, da die Konzentration der gelösten Stoffe deutlich ansteigt, aber das Tröpfchen nie vollständig verdunstet. Somit ergibt sich eine Virusinaktivierung innerhalb der Tröpfchen wegen der kumulativen Dosis von virusschädlichen Substanzen in der Lösung. Bei hohen Luftfeuchtwerten

ten vergrößern sich die Tröpfchen, wodurch einerseits die Stabilität der Viruspartikel erhöht wird, sich andererseits die Transmission über die Luft stark verringert. In Summe sinkt die Übertragungsrate respiratorischer Viren von Mensch zu Mensch bei hoher Luftfeuchtigkeit ab [25], [30].

[29], [25] beschreiben, dass die Virenübertragung häufig in klimatisierten Umgebungen, wie zum Beispiel in Krankenhäusern oder Hotels, zu beobachten ist. Während der Wintermonate wird kalte Außenluft in die Innenräume gesaugt und durch die Heizung auf ein angenehmes Temperaturniveau gebracht.

Dies führt zu einer erheblichen Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit in beheizten Innenräumen. Wenn die Luftfeuchtigkeit weniger als 40 % beträgt, steigt die Anfälligkeit für virale Atemwegsinfektionen [29]. Verschiedene Studien bestätigen die Aussage, dass niedrige Luftfeuchtigkeit im Winter die Virusausbreitung beim Menschen unterstützt [31]. Eine Kontrolle der Luftfeuchtigkeit (> 40 %) in Innenräumen stellt somit einen praktikablen Weg dar, die SARS-CoV-2-Transmission zu vermindern [29].

An dieser Stelle sei ein wichtiger Aspekt bezüglich der physiologischen Gegebenheiten bei Menschen in Bezug auf das Raumklima angemerkt:

Zu niedrige Feuchtegehalte in der Atemluft führen demnach zu einer deutlichen lokalen Abwehrschwäche durch Beeinträchtigung der mukoziliären Reinigung und Inhibition der Leukozytenphagozytose. Das heißt, dass der Selbstreinigungsmechanismus der Bronchien und oberen Atemwege sowie die Fressfähigkeit der weißen Blutkörperchen stark abnehmen und Infekte so deutlich leichter empfangen werden können. Schon aus diesem Grund sollte unbedingt ein Feuchtebereich bei üblichen Aufenthaltstemperaturen zwischen 40 % und 60 % eingehalten werden. Das unterstreicht den Ansatzpunkt, die Atemluft im Winter zu befeuchten [32], [30].

Ein erhöhter Feinstaubanteil in der Atemluft erhöht die Gefahr der Übertragung [28]. Einige Publikationen verdeutlichen dies am Beispiel PM_{2.5} sowie PM₁₀ im Außenluftbereich. Insbesondere die Beobachtungen indischer Mega-Cities wie Neu Delhi, Mumbai und aus New York belegen dies [33], [34].

Als günstige Raumluftbedingungen, bei denen die Transmission von SARS-CoV-2 reduziert ist, gelten nach [28] Lufttemperaturen oberhalb von 22 °C und relative Luftfeuchtwerte (RF) zwischen 50 % und 60 %, wobei eine relative Luftfeuchte von 40 % möglichst nicht unterschritten werden sollte.

Emission von Aerosolpartikeln und -tröpfchen

Aerosolpartikel und -tröpfchen werden bei menschlichen Aktivitäten wie Atmen, Sprechen, Husten und Niesen freigesetzt. Ihre Anzahl und Größe wurde in mehreren Studien angegeben.

Die Tröpfchenemission während des Sprechens wurde gemessen, während die Zahlen von 1 bis 100 gesprochen wurden. Es wurde festgestellt, dass die Partikel bei 1 µm und 6 µm die höchsten Konzentrationen aufwiesen [35]. In einer anderen Studie wurden Höchstwerte an Partikelzahlen im Größenbereich von 45 µm bis 150 µm gefunden [36]. Die Partikelemissionsraten von 1 bis 50 Partikeln/Sekunde wurden in Abhängigkeit von der Lautstärke gemessen, die Partikelgrößenverteilung ist jedoch unabhängig von der Lautstärke der Vokalisierung. Einige Individuen sind "Superemitter", welche um eine Größenordnung mehr Partikel freisetzen können als andere [35]. In ähnlicher Weise haben [37] herausgefunden, dass die Atmung 14–71 Partikel/Liter bzw. 660–3.230 Partikel/Liter ausgeatmete Luft für niedrige bzw. hohe Emittenten ausmachte.

Es wurde festgestellt, dass durch Husten erzeugte Tröpfchen zwei Modi aufweisen. [38] berichten, dass pro Husten 466 Partikel emittiert werden. Die Tröpfchen waren zwischen 2 µm und 1.471 µm verteilt und zeigten eine bimodale Größenverteilung, die bei 2 µm und 26 µm Spitzenwerte aufweist. [39] haben gemessen, dass die beim Husten emittierte Tröpfchenmasse 22,9 mg unter Verwendung eines MNS und

85 mg unter Verwendung einer Tüte beträgt, und die Partikel waren zwischen 5 μm bis 300 μm (Peak bei etwa 35 μm bis 150 μm). In einer anderen Studie von [36] erreichte die Partikelgröße einen Peak bei 6 μm (Hauptpeak) und etwa 175 μm (Nebenpeak).

Für das Niesen fand [40] zwei Muster von Größenverteilungen: unimodal von 12 Probanden und bimodal von 10 Probanden. Für die unimodale Verteilung erreichte die Teilchengrößenverteilung einen Peak bei 341,5 μm bis 398,1 μm . Das geometrische Mittel beträgt 360,1 μm und die geometrische Standardabweichung 1,5. Für die bimodale Verteilung lagen die Hauptpeaks bei 72 μm und 386,2 μm mit geometrischen Standardabweichungen von 1,8 bzw. 1,5.

Basierend auf Daten aus einer begrenzten Anzahl von Studien zeigt sich, dass das Sprechen kleinere Partikel produziert als Husten und Niesen. In zwei Studien wurde beobachtet, dass es generell eine Unterscheidung gibt zwischen Emittenten von hohen und niedrigen Partikelmengen. Die Menge freigesetzter Partikel ist jedoch ein entscheidender Quellterm in Virenausbreitungsmodellen und muss je nach Betrachtungsszenario entsprechend angepasst werden (siehe hierzu Kapitel 5).

Luftgeschwindigkeiten der ausgebrachten Atemluft

Messungen aus verschiedenen Studien ergaben eine anfängliche Luftgeschwindigkeit während des Hustens von 11,7 m/s [36], 9,0 m/s [41], sowie 15,3 m/s für Männer und 10,6 m/s für Frauen [9]. Die Luftgeschwindigkeit beim Sprechen war geringer mit 3,9 m/s [36], 4,07 m/s für Männer und 2,31 m/s für Frauen [9] sowie 1,08 m/s - 1,56 m/s für Männer und 1,53 m/s - 1,64 m/s für Frauen [42]. Von [43] durchgeführte Messungen zeigten eine maximale Luftströmungsgeschwindigkeit von 4,5 m/s für Niesen und 1,4 m/s für Nasenatmung sowie 0,8 m/s für Mundatmung. Die aus dieser Studie erhaltene Niesgeschwindigkeit war niedriger als in anderen Studien. Dies könnte auf die unterschiedlichen Techniken zurückgeführt werden, die in verschiedenen Studien verwendet wurden, und auf die Einschränkung der genutzten Shadowgraph-Bildgebung, die einen Temperaturunterschied zwischen der ausgeatmeten Luft und der Umgebungsluft erfordert. Die Luftgeschwindigkeit folgt einem exponentiellen Abfall über die Entfernung vom Mund.

Partikelgröße und Luftströmungsprofil sind wesentliche Parameter zur Charakterisierung des Transports von Aerosolen in einer geschlossenen Umgebung. Generell werden sehr kleine Partikel schnell durch Diffusion und sehr große Partikel schnell durch Gravitation abgeschieden. Den kleinsten Abscheidegrad haben Partikel im Größenbereich von 0,1 μm bis 0,3 μm [44]. Partikel bis zu einem Durchmesser von 20 μm können auch bei kleinen Luftgeschwindigkeiten im Bereich von 0,1 m/s längere Zeit in der Atemluft verbleiben [45]. Haupteinflüsse für die Verteilung exhalierter Partikel sind die anfängliche Partikel- bzw. Tröpfchengeschwindigkeit und -richtung, die relativen Positionen zwischen der Infektionsquelle und anderen Personen, sowie das durch Temperatur und Druckdifferenzen bestimmte Luftströmungsmuster.

Bei den hier interessierenden Bioaerosolen handelt es sich um Viren im Größenbereich von ca. 0,05 μm bis 0,2 μm , die von einer Wasserhülle umgeben sind. Die Größenverteilung, die Konzentration und die Exhalationsgeschwindigkeit der Partikel hängen von der Lungenkapazität der jeweiligen Person und der Art des Ausstoßes ab (Sprechen, Rufen, Singen, Husten, Niesen). In erster Näherung lassen sich Partikelgrößen zwischen 1 μm und 1.000 μm sowie Ausstoßgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 20 m/s annehmen [35], [36]. Entsprechend ist auch die Anzahl infektiöser Partikel im Atemgas individuell stark unterschiedlich [46].

Wässrige Partikel unterliegen unter Umgebungsbedingungen einer hohen Dynamik. Zunächst reduziert sich die Partikelgeschwindigkeit durch Kollision mit Luftmolekülen innerhalb kurzer Distanz nach Ausstoß [47]. Eine schnelle Sedimentation innerhalb weniger Sekunden ist jedoch nur für Partikel mit einem Durchmesser größer 100 μm und in ruhiger Luft zu erwarten. Gleichzeitig reduziert sich der Durchmesser eines solchen Partikel bei raumüblichen Temperaturen und Luftfeuchten innerhalb von ca. 15 Sekunden

auf weniger als 1 μm [44], [45]. Man kann also davon ausgehen, dass sich ausgeatmete Luft, die eventuell mit Viren beladene Partikel enthält, ohne ausreichende Lüftung schnell vertikal und horizontal in einem Raum verteilt.

Ansteckung durch Bioaerosole im ÖV

Gemäß der Übersichtsarbeit von [48], die insgesamt 41 Studien berücksichtigt, kann das öffentliche Transportwesen eine wichtige Rolle bei der Übertragung von Bioaerosolen spielen. Speziell zur Übertragung von SARS-CoV-2 Viren in Bussen und Bahnen sind aber bisher nur wenige Arbeiten verfügbar. Zur Ansteckung mit COVID-19 in Bussen sind einige Fallstudien publiziert. In Hunan, China, steckte ein infizierter Reisender in einem vollbesetzten Bus bei geschlossenen Fenstern und eingeschalteter Lüftungsanlage mehrere Personen an [49]. In Zhejiang, China, wurden während der 150-minütigen Bustour, bei der die Lüftungsanlage mit Umluft betrieben wurde, 24 Personen infiziert [50]. Demgegenüber zeigt die Arbeit von [51], wie sich das Ansteckungsrisiko in Bussen durch entsprechende vorsorgende Maßnahmen reduzieren lässt. Eine Modellstudie ergab, dass das Infektionsrisiko in Bussen für andere Fahrgäste geringer wird, wenn sich die Infektionsquelle in der Nähe des Luftauslasses befand, und dass die Verdrängungslüftung das Risiko einer Infektion in der Luft wirksamer begrenzt [52].

[53] untersuchten die Ansteckungswahrscheinlichkeit mit SARS-CoV-2-Viren in chinesischen Hochgeschwindigkeitszügen bei einem hohen Anteil infizierter Personen und stellten eine deutliche Abhängigkeit von der Sitzentfernung zur infizierten Person und zur Reisedauer fest (siehe auch Kapitel 4). Eine japanische Studie zeigte mit Modellrechnungen die Wirksamkeit von Gesichtsmasken gegenüber Influenzaviren in Zügen [54].

Zusammenfassend ist nur wenig Literatur zur Ausbreitung von SARS-CoV-2-Viren in öffentlichen Transportmitteln, insbesondere in Bussen und Bahnen, verfügbar. Zur Ausbreitung an Stationen sind noch weniger Daten verfügbar als für die Transportmittel im ÖV. Dennoch lässt sich aus den vorliegenden Informationen aber bereits ableiten, dass sich das Infektionsrisiko mittels ausreichender Frischluftzufuhr, Einhaltung von Abstand und dem richtigen Tragen von geeigneten Gesichtsmasken effektiv reduzieren lässt.

3.2 Technische und betriebliche Maßnahmen zum Schutz vor Ausbreitung im ÖV

In diesem Kapitel werden zunächst Maßnahmen beschrieben, die geeignet sind, das Infektionsrisiko zu mindern. Darauf folgen Empfehlungen für den Betrieb von Klima- und Lüftungsanlagen in Verkehrsmitteln des ÖV sowie eine Beschreibung des Einsatzes von Filter- und Reinigungstechnologien. Neben den Filtern wird der Einsatz von UV-C-Strahlen diskutiert, die geeignet scheinen, um SARS-CoV-2 wirksam zu inaktivieren, sowie weitere strahlungsbasierte Technologien.

Alle identifizierten technischen Schutzmaßnahmen sind in Tabelle 2 und 3 jeweils mit Vor- und Nachteilen niedergelegt. Organisatorische und betriebliche Schutzmaßnahmen finden sich in Tabelle 4.

Maßnahmen zur Reduktion des Infektionsrisikos durch Luftübertragung

In Bezug auf die Luftübertragungsrouten sind folgende Maßnahmen geeignet, das Infektionsrisiko zu mindern:

- höhere Luftwechselraten
- kein Umluftbetrieb und wenn, dann nur mit hocheffizienten Filtersystemen
- Verdrängungslüftung (Quelllüftung)

- Tragen von Gesichtsmasken (vor allem FFP2)
- Maximaler Abstand zwischen den Personen
- Händewaschen und Desinfektion

In Verkehrsmitteln, in denen sich die Passagiere einerseits hin und her bewegen und andererseits gewisse Oberflächen sehr häufig berührt werden, kann der Übertragungsweg durch kontaminierte Oberflächen relevant für das Infektionsrisiko sein. Händewaschen und -desinfektion, insbesondere nach dem Berühren dieser besonders exponierten Oberflächen (wie z. B. WC-Türen), sowie regelmäßige Oberflächendesinfektion gelten als geeignete Gegenmaßnahmen.

Empfehlungen für den Betrieb von Klima- und Lüftungsanlagen im ÖV

Die Außenlufttraten (d. h. Frischluftmenge) pro Person sind bei unterschiedlichen Fahrzeugkategorien und Umgebungstemperaturen für Fahrzeuge mit Lüftungs- und Klimaanlage festgelegt. Hier gelten die Normen DIN EN 14750-1 (Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter, August 2006) und DIN EN 13129 (Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs – Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen, Dezember 2016). Bei sehr hohen oder sehr niedrigen Umgebungstemperaturen liegen diese Bereiche bei 8 m³/h – 10 m³/h pro Person mit Klimaanlage und 8 m³/h – 15 m³/h pro Person mit Lüftungsanlage.

Bei moderaten Umgebungstemperaturen liegen die Luftvolumenströme bei 10 m³/h – 20 m³/h pro Person mit Klimaanlage und 10 m³/h – 30 m³/h pro Person mit Lüftungsanlage. Im Vergleich dazu empfiehlt die American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) als Basis für den erforderlichen Luftaustausch 7 l/s – 10 l/s pro Person (diese Werte entsprechen den von der europäischen Norm EN 15251 empfohlenen 25 m³/h – 36 m³/h pro Person).

Bei älteren Fahrzeugflotten mit Lüftungsanlage (ohne Klimaanlage) dürften daher unter bestimmten Bedingungen bessere lufthygienische Verhältnisse (mit geringerem CO₂-Level) herrschen (sofern sie gemäß Norm entwickelt wurden).

Der Stand der Technik ist gekennzeichnet durch den Einsatz von CO₂-Sensoren, um auf Grundlage der CO₂-Messwerte auf die Anzahl von Fahrgästen und Personal zu schließen und die entsprechende Außenluftmenge zu dosieren. Da die CO₂-Konzentration leicht messbar ist, dient sie als Leitindex für die Konzentration weiterer, potentiell problematischer Riech- und Ekelstoffe in der Raumluft.

Alternative Methoden zur Ermittlung der Anzahl von Fahrgästen und Personal (Signal über das Beladungsgewicht oder Gesichtserkennung) sind denkbar, aber möglicherweise aus anderen Gründen problematisch.

Entsprechend den geltenden Normen DIN EN 14750-1 und DIN EN 13129 müssten die Fahrgäste abhängig von Fahrzeugkategorie und Umgebungstemperaturen mit folgenden Außenluftmengen versorgt werden, wobei sich folgende CO₂-Konzentrationen im Innenraum (Abbildung 1) ergeben.

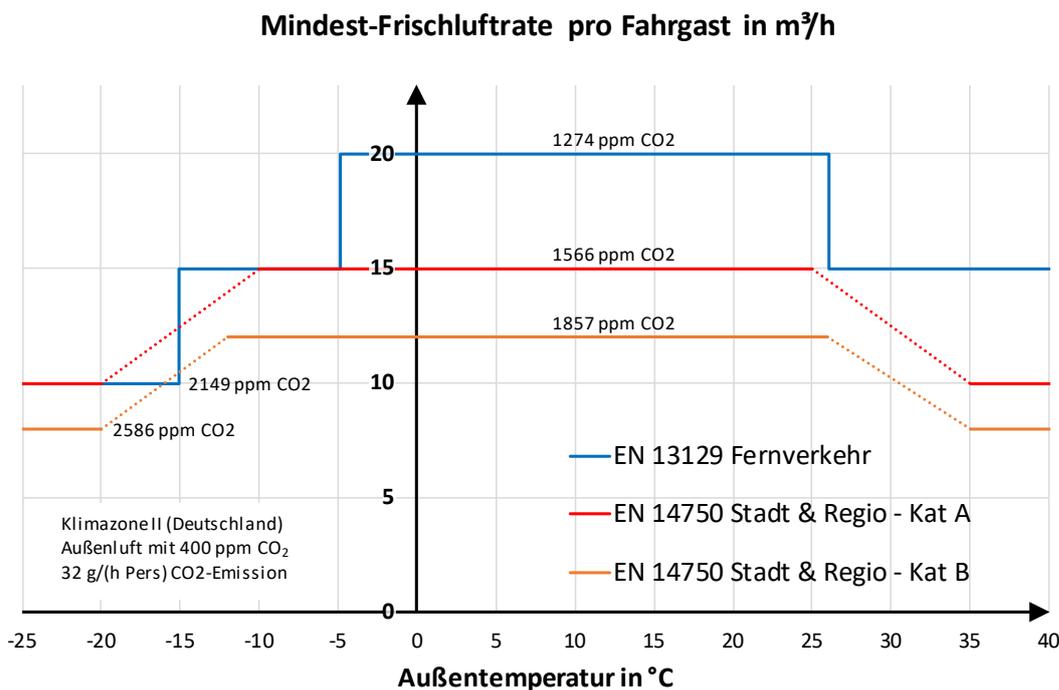


Abbildung 1: CO₂-Konzentrationen im Schienenfahrzeug-Innenraum für Fernverkehr, Regionalverkehr (Kategorie A) und Nahverkehr (Kategorie B).

Praktisch werden Außenluftmengen anhand bestimmter CO₂-Schaltschwellen im Innenraum in diskreten Schritten gemäß EN 14750-1 bzw. EN 13129 geändert. Nicht die Außenluftmenge pro Person, sondern das Erreichen bestimmter CO₂-Limits ist angestrebt.

Die derzeit in der Bundesrepublik Deutschland anerkannten Leitwerte für Kohlendioxidkonzentrationen in der Innenraumluft [55] unterscheiden zwischen „hygienisch unbedenklich“ (CO₂ ≤ 1.000 ppm), „hygienisch auffällig“ (1.000 ppm < CO₂ ≤ 2.000 ppm) und „hygienisch inakzeptabel“ (2.000 ppm < CO₂). Danach gibt es theoretisch im normalen Fahrgastbetrieb bei Realisierung der Außenluftmengen gemäß Normen

- in keiner Fahrzeugkategorie hygienisch unbedenkliche Raumluftzustände und
- in Fahrzeugen des Regional- und Städtischen Verkehrs hygienisch inakzeptable Raumluftzustände nahe der Design-Umgebungstemperaturen (etwa unterhalb -10 °C und oberhalb +25 °C).

Auf Grundlage der geltenden Normen würden sich demzufolge im normalen Betrieb dauernd Raumluftzustände zwischen „hygienisch auffällig“ und „hygienisch inakzeptabel“ einstellen, da im Bereich der CO₂-Konzentrationen im Innenraum zwischen 1.500 und 2.100 ppm keine Änderung der Außenluftfrate erfolgt.

Folgende HLK-Strategien (Heizung, Lüftung, Klimatechnik) haben laut [56] das Potenzial, die Risiken der Verbreitung von infektiösen Aerosolen zu verringern:

- Art und Weise der Luftverteilung
- Räume mit Druckgefälle
- personalisierte Belüftung
- Quelllüftung (Verdrängungslüftung)
- Filterung (zentral oder lokal)
- Kontrolle von Temperatur und relativer Luftfeuchte
- UV-C-Reinigung

Die Belüftung mit effektiver Luftverteilung ist eine primäre Strategie zur Kontrolle von Infektionskrankheiten. Dadurch wird nicht nur die Konzentration von infektiösen Erregern in der Raumluft um eine Quelle herum verdünnt, sondern die Erreger werden auch aus dem belüfteten Innenraum abtransportiert.

Die wenigen verfügbaren Untersuchungen liefern noch keinen ausreichenden Beweis dafür, dass das SARS-CoV-2-Virus von HLK-Systemen verbreitet werden kann [57]. Allerdings ist die allgemeine Empfehlung plausibel, dass während einer SARS-CoV-2-Pandemie die Rezirkulation der Luft zu vermeiden ist (kein Umluftbetrieb) [58], da erstens selbst für den Fall, dass geeignete Filter vorhanden wären, die konkreten Filterwirkungsgrade im konkreten Einzelfall nicht zu jedem Zeitpunkt bekannt sind. Dazu kommt, dass die meisten Umluftsysteme zwar mit Luftfiltern ausgestattet sind, diese aber in der Regel gegen Viren nicht ausreichend wirksam sind. In den meisten Fällen handelt es sich um Filter mit grober oder mittlerer Filtereffizienz (Filterklasse G4/M5 oder ISO-Grob/ePM10).

Einsatz von Filter- und Reinigungstechnologien im ÖV

VDI 6032 (Blatt 1 Lufttechnik, Luftqualität in Fahrzeugen – Hygieneanforderungen an die Lüftungstechnik, Mai 2015) formuliert Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb, Wartung, Instandhaltung und zeigt Maßnahmen auf, um bei bestimmungsgemäßem Betrieb der Klimaanlage einen hygienisch einwandfreien Zustand der Fahrzeuginnenräume nach dem Stand der Technik sicherzustellen. Die Funktion der Filter in Klimaanlagen von Schienenfahrzeugen besteht danach darin, den Eintrag von Schadstoffen in die Fahrgasträume und die Komponenten der Lüftungsanlage zu minimieren (priorisiert also die Filterung der Außenluft). Dafür sollen Filter mindestens der Filterstufe G4 nach EN 779 verwendet werden (entspricht aktuell etwa ISO Coarse 60 % gemäß EN ISO 16890). Der Einsatz höherer Filterklassen wird empfohlen.

Der Stand der Technik ist gekennzeichnet durch

- Führung der Außenluft durch ein Wetterschutzgitter und anschließende Filterung, parallel Filterung der Umluft, dann Mischung und Luftbehandlung oder
- Führung der Außenluft durch ein Wetterschutzgitter, Mischung mit Umluft, dann Filterung und Luftbehandlung.

Für die Filterung der Umluft oder Mischluft werden Filter der Filterklassen ISO Coarse 60 %, in einzelnen Fahrzeugprojekten auch ISO ePM10 50 % eingesetzt.

Höhere Filterklassen werden diskutiert, einem Einsatz stehen bisher jedoch folgende Nachteile entgegen:

- Filterflächen können aufgrund der Zwänge bei der Integration in ein Schienenfahrzeug nicht nennenswert vergrößert werden, daher steigen Druckverluste über Filter stark an mit der Konsequenz größerer Lüfter und höherer Schalldruckpegel.
- Filtertauschzyklen sind als bedeutender Kostenfaktor in den Wartungsregimen der Betreiber identifiziert, eine Reduzierung zum Beispiel auf Zyklen kleiner als 90 Tage erscheint bisher als nicht vermittelbar.

Eine mögliche Maßnahme zur schnellen Reaktion im Pandemiefall ist ein unmittelbarer Austausch der in Klimaanlagen konventionell eingesetzten Filter (z. B. der Filterklasse ISO Coarse 60 %) durch passgenaue Alternativen mit spezieller Beschichtung/Imprägnierung mit dem Potential, Aerosolpartikel zurückzuhalten und darin befindliche Viren innerhalb kurzer Zeit zu eliminieren. Das mögliche Problem damit verbundener höherer Druckverluste und reduzierter Luftmengen oder kürzerer Filtertauschzyklen erscheint lösbar, aber nachrangig.

Luftfiltergeräte können im Umluftbetrieb die Konzentrationen an infektiösen Aerosolen in Räumen sehr wirksam reduzieren (mechanische Filtersysteme bewirken eine Verringerung der Partikelkonzentrationen

in der Innenluft um 20 % bis 80 %; 50 % ist ein typischer Wert). Die Empfehlung laut ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017 (Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size) ist hier eine Verbesserung der Filterung der zentralen Luftversorgung und anderer HVAC-Systeme (Heating Ventilation Air Condition) auf die Filterklasse MERV-13 (Minimum Efficiency Reporting Value) oder das höchste erreichbare Niveau.

In vielen Luftverteilungssystemen werden sowohl die Außenluft als auch die Umluft gefiltert mit dem Ziel, die Staubkonzentration im Raum und im System selbst zu begrenzen. HVAC-Einheiten sind so konzipiert, dass sie mit einer definierten Filterklasse arbeiten. Die in der Regel in Schienenfahrzeugen installierten Filter sind so ausgelegt, dass sie Staub, d. h. 40 % bis 60 % der Partikel von 10 µm, blockieren. Die Filtrationseffizienz hängt von Luftstrom, Luftdruck und der Geschwindigkeit ab. Der Wirkungsgrad passiver Filter hat einen direkten Einfluss auf den Luftdruck und den Komfort im Fahrgastraum.

Die üblicherweise in Raumluftechnik und Klimaanlage verwendeten Filter sind in der Lage, große Tröpfchen, jedoch keine Aerosole (kleine Tröpfchen und Tröpfchenkerne) zurückzuhalten. HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Air) haben eine gute Leistung bei Partikeln der Größe von SARS-CoV-2 (ca. 70 nm – 120 nm) gezeigt und wurden bislang nur in Flugzeugen, Kfz der Oberklasse und im Gesundheitswesen eingesetzt [59].

Hocheffiziente Schwebstofffilter (HEPA-Filter) können Aerosole zurückhalten, die SARS-CoV-2 enthalten. Um richtig filtern zu können, müssen verschiedene Parameter wie Luftdruck und -geschwindigkeit oder die effektive Oberfläche der Filter bestimmte Werte erreichen. HEPA-Filter benötigen einen hohen Luftdruck und eine hohe Luftgeschwindigkeit, um zu funktionieren. Die derzeitigen Belüftungssysteme in Zügen sind nicht dafür ausgelegt, einen solchen Luftstrom zu erzeugen. Die Aufrüstung des HVAC-Systems, um die Verwendung von HEPA-Filtern zu ermöglichen, bedingt:

- Aufrüstung der Ventilatoren
- Änderungen im Kanalnetz
- Erhöhung des Energieverbrauchs
- Erhöhung des Lärmpegels
- Änderungen des thermischen Komforts

Darüber hinaus ist je nach Zugtyp (Doppelstock- oder Niederflur-Züge) die Aufrüstung möglicherweise nicht möglich, da nicht genügend Platz für die Installation des aufrüsteten HVAC-Systems zur Verfügung steht. Es gibt alternative Lösungen zur Neutralisierung von Krankheitserregern, wie z. B. in Lüftungskanälen montierte UV-C-Strahlungsquellen, thermische Exposition oder Ionisierungssysteme. Deren Wirksamkeit gegen SARS-CoV-2 wurde im Bahnumfeld jedoch noch nicht ausreichend nachgewiesen.

Eine Studie [60], bei der eine Fallstudie zur Übertragung von Influenza über die Luft für modellhafte Schätzungen der relativen Influenza-Risikoreduzierung verwendet wurde, zeigte für ein hypothetisches Büro einen positiven Zusammenhang zwischen Risikoreduzierungen und der Verwendung einer höheren Filterqualität gemäß den MERV-Filterklassifikationen von ASHRAE. Die größte Risikoreduktion zu den niedrigsten Kosten zeigte sich bei MERV-13-Filtern.

Die Rolle von HEPA-Filtern in Gebäuden außerhalb des Gesundheitswesens zur Reduzierung der Übertragung von Infektionskrankheiten ist unklar. Für SARS-CoV-2 zeigte eine Modellstudie wie das Infektionsrisiko durch drei Arten von Belüftungssystemen in relativ großen Verkehrsflugzeugen modifiziert wurde. Von den drei untersuchten Systemen ging von dem Mischbelüftungssystem das höchste Risiko und von dem konventionellen Verdrängungssystem das geringste Risiko aus [61].

Einsatz von UV-C zur Inaktivierung von SARS-CoV-2

Humanpathogene Viren werden in vielen Fällen über die Luft übertragen und als Partikel in der Luft oder auf Oberflächen verteilt, so dass bereits in der Vergangenheit der Einsatz von Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) als ein hilfreiches Mittel angesehen wurde, um die potentielle Transmission von Pathogenen zu verringern bzw. zu stoppen [62].

Neueste Daten sprechen dafür, dass auch SARS-CoV-2 UV-empfindlich und auf diesem Weg inaktivierbar ist [63].

Auf eventuell auftretende Mutationen durch die UV-Bestrahlung, die eine höhere Pathogenität bedingen könnten, wurde sowohl in dieser Studie als auch in den meisten Coronavirus-Inaktivierungsstudien nicht getestet.

Für die mikrobielle Desinfektion wird bei ausreichender UV-Licht-Exposition mithilfe von UVGI das mikrobielle Erbgut ausreichend geschädigt, sodass entstandene Mutationen zur Behinderung der Replikation bis hin zum Replikationsstopp führen [64], [65]. Hierbei wird das Ausmaß der Schädigung des bakteriellen und viralen Erbguts durch die UVGI-Intensität und der Belichtungsdauer bedingt. Zudem spielt der biochemische Aufbau dieser Mikroorganismen eine wichtige Rolle, wobei beispielsweise eine bakterielle Zellwand Schutz vor UVGI-Inaktivierung bietet. Da Viren keine Zellwand besitzen, ist die Desinfektion mit UVGI sehr effizient [66], [62], [67], [68].

Obwohl nicht alle Studien miteinander übereinstimmen, scheinen einige weitere Faktoren bei der UV-Inaktivierung eine wichtige Rolle zu spielen. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit verschlechtert die UV-Inaktivierung aerosolisierter Viren. Es wird angenommen, dass die Anreicherung von Wasser auf der Virusoberfläche protektiv wirkt [69], [70], [71], [72]. Eine Studie zeigte, dass Viren im Aerosol um das 7- bis 86-fache anfälliger für UV-Inaktivierung waren als in Flüssigkeit [73].

Da SARS-CoV-2 in gewissem Umfang auch über Kontakte an Oberflächen übertragen wird und dort meist erstaunlich lange infektiös bleibt [23], ist neben der geeigneten Belüftung und der Vermeidung von Tröpfchenübertragung die systematische Inaktivierung von Krankheitserregern auf Oberflächen, die von einer großen Anzahl von Menschen häufig berührt werden, essentiell, um das Pandemiegeschehen wirksam einzudämmen. Neben der Inaktivierung der Viren durch Hitze kann auch UVGI zur Dekontamination erfolgreich eingesetzt werden [74], [75], [76].

Auch nach einer 60-minütigen Behandlung einer Stahloberfläche mit UV-Strahlung (Wellenlänge 254 nm) konnte eine geringe Menge an infektiösen SARS-CoV-2-Viren gefunden werden. Aus diesem Grund erscheint eine Kombinationsapplikation von UV mit Desinfektionsmitteln, wie etwa Ethanol, empfehlenswert, um infektiöse Partikel und RNA-Kontaminationen vollständig zu beseitigen [77]. Zudem wird angenommen, dass die Anwesenheit von Proteinen protektiv für Viren auf trockenen Oberflächen ist und dass diese auch nach UV-Behandlung infektiös sein können [78].

Eine weitere Studie zeigte, dass SARS-CoV-2 mit experimentell imitiertem Sonnenlicht (eine Kombination aus UV-A- und UV-B-Strahlung) inaktiviert werden konnte [79]. Das Virus wurde entweder in simuliertem Speichel (Ähnlichkeiten in Bezug auf Tonizität, pH und Proteinhalt) oder Zellkulturmedium auf einer Edelstahlfläche getrocknet und anschließend zwischen 2 und 18 min bestrahlt. Im Medium wurde SARS-CoV-2 zu 90 % bei einer Dosis von 1,6 und 0,7 W/m² entsprechend nach 14,3 und 17,6 min inaktiviert. Diese Daten geben erste Hinweise auf die natürliche Inaktivierung von SARS-CoV-2 durch Sonnenlicht.

Die Inaktivierung mit UV ist bei vielen Viren, unter anderem ssRNA (single-stranded RNA) SARS-CoV-2 in Flüssigmatrizes höher, als in der Luft. Das Inaktivierungspotenzial von UV-Licht auf inerten Oberflächen

ist dagegen sehr stark vom Oberflächentyp abhängig. Mit konventionellen UV-Quecksilberlampen konnten bereits eine Vielzahl an erfolgreichen Inaktivierungsstudien veröffentlicht werden, die Viren verschiedenster Art untersuchten (RNA/DNA-Genom, einzelsträngig/doppelsträngig, Genom- und Virusgröße, umhüllt/nicht-umhüllt, Kapside, Schutzproteine).

Generell ist die Methode mittels UV-C chemikalienfrei, die Reaktionszeit ist im Allgemeinen sehr kurz. Zusätzlich ist hervorzuheben, dass keine Geruchs- oder Geschmacksbeeinträchtigungen durch die Anwendung stattfinden. Da die UV-C-Strahlung für den Menschen jedoch gefährlich ist, sind entsprechende Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Aus Studien ergeben sich erste Hinweise auf die natürliche Inaktivierung von SARS-CoV-2 durch Sonnenlicht [79]. Aufgrund der starken UV-Sperrung der üblicherweise eingesetzten Kalk-Natron-Gläser ist die Wirksamkeit der Sonnenstrahlung in Innenräumen stark herabgesetzt.

Zu unterscheiden ist zwischen Lösungen zur Luftreinigung (Aerosole) und Oberflächenbehandlung. Generell gibt es Evidenz, dass für die Wirkung auf Aerosole geringere Dosen erforderlich sind als für die Wirkung auf Flüssigkeiten, z. B. in Speichel auf Oberflächen [80], [81].

Die Luftbehandlung mit UV-C erfolgt meist zentral in Lüftungs-/Klimaanlagen oder lokal in den Räumen selbst, und zwar in geschlossenen UV-Bestrahlungsmodulen, die auf den Luftstrom einwirken. In der Regel werden hohe Bestrahlungsdosen eingesetzt, da die Expositionszeit der Luftpartikel insgesamt kurz ist (Sekunden bzw. Bruchteile von Sekunden). Für ÖV-Lüftungssysteme werden von verschiedenen Herstellern (Nachrüst-) Module angeboten.

Verfügbar sind auch mobile Luftbehandlungsgeräte. Jedoch ist der Einsatz solcher Geräte im ÖV hinsichtlich genereller Machbarkeit zunächst zu prüfen. Um eine Exposition von Menschen gegenüber der Strahlung auszuschließen, bringen UV-Deckenluftsysteme unter besonderen Schutzmaßnahmen technischer organisatorischer Art UV-Strahlung in den Überkopfbereich ein und inaktivieren mikrobiell belastete Aerosole in der Luft [81]. Diese Systeme sind für Raumsituationen geeignet, in denen hohe Luftwechselraten nicht oder nur schwer zu realisieren sind. Dieser Ansatz müsste für den Bereich ÖV aufgrund niedriger Raumhöhen in Zügen gesondert geprüft werden. In höheren Räumen, z. B. von Bahnstationen, könnten sich solche Systeme unter Umständen eignen.

Die Oberflächeninaktivierung erfolgt durch direkte Bestrahlung mit stationären, zumeist aber noch mobilen (temporär eingebrachten) Einrichtungen, die wiederum teilweise von Hand geführt werden. Bei stationären Systemen bietet sich die Integration mit der Beleuchtung an. Bisher wurde eine direkte UV-C-Bestrahlung vornehmlich im Gesundheitsbereich eingesetzt, z. B. zur Entkeimung von OP-Besteck, Entkeimung von OPs und Patientenzimmern. Anwendungen finden sich des Weiteren in der Verpackungs- und Textilindustrie. Im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel waren bereits vor der Corona-Pandemie einzelne Anwendungen zu finden.

Da die Desinfektion im Wesentlichen nur über direkte Bestrahlung erfolgt, d. h. in Schattenbereichen keine Inaktivierung stattfindet, ist die richtige Platzierung der Strahlereinheiten wesentlich. Hinzu kommen Effekte der Mikroschattierungen. In [82] wird auf einen „Canyon Wall Effect“ hingewiesen, nachdem schon geringe Unebenheiten (Textures) von Oberflächen Mikroschatten hervorrufen. In diesen ist die Inaktivierung insbesondere kleiner Mikroorganismen wie Viren eingeschränkt. Inaktivierungsraten werden somit herabgesetzt. Bestrahlung von Oberflächen aus verschiedenen Winkelbereichen kann die Raten erheblich verbessern, bzw. die Strahlungsrichtung und Dosis sind auf die jeweiligen Oberflächentypen abzustimmen. Mit Ansätzen des sogenannten „Hygienic Design“ [83] wird z. B. versucht, Raumstrukturen und Oberflächeneigenschaften hygienisch optimiert, u. a. leicht zu reinigen, auszulegen (Übertragung aus dem Gesundheitsbereich auf ÖV). Die positive Wirkung speziell reflektiver Oberflächen wird anhand des Fallbeispiels von Patientenzimmern in Krankenhäusern dargestellt [84].

In zahlreichen Untersuchungen konnten wirksame Inaktivierungen von Keimen nachgewiesen werden, dies bei aber zum Teil erheblich höheren erforderlichen Dosen als unter Laborbedingungen. Eine Studie gibt beispielsweise 5 bis 10-fach höhere Dosen (bis 450 J/m²) an, als unter idealen Laborbedingungen erforderlich wären [85].

Zu erwähnen ist die unterschiedliche Infektionsfähigkeit von SARS-CoV-2-Viren auf unterschiedlichen Oberflächen bei einer starken Temperaturabhängigkeit. Dies kann Implikationen für die Entkeimungszyklen haben. Erforderliche Dosen als Funktion der Oberflächen werden nicht angegeben [23].

Wogegen bei Luftbehandlungssystemen ein Schutz von Personen vor UV-Belastung durch Schirmung (Gehäuse) einfach zu realisieren ist, ist dies bei der Oberflächenreinigung anderweitig sicherzustellen. Entsprechende Sicherheitseinrichtungen, welche die Anwesenheit bei Betrieb der Strahlungsquellen ausschließen, sind vorzusehen. Bei Handgeräten sind Haut und Augen der Anwender entsprechend zu schützen.

Durch UV-Strahlung verspröden Kunststoffe. Angaben in der Literatur hierzu divergieren. Raumbooberflächen sind bei den erforderlichen Dosen im Allgemeinen unempfindlich [85]. Empfohlen wird eine entsprechende Auswahl unempfindlicher Oberflächen oder Oberflächenbeschichtungen.

Verschiedene Beispiele von UV-Anwendungen in öffentlichen Verkehrsmitteln wurden recherchiert. Bereits im Juli 2009 gab es in den USA eine ausführliche Untersuchung, welche vom „Transportation Research Board of the National Academies“ durchgeführt wurde [86]. In dieser wurden Klimageräte für den Busverkehr evaluiert und eindeutig eine sehr hohe Wirksamkeit der Technologie im Praxiseinsatz nachgewiesen: „Die Tests zeigten eine 99 %ige Reduktion der häufigsten Viren“.

In Moskau werden neben den Zügen auch die Handläufe einer Rolltreppe mit Strahlung desinfiziert. Außerdem werden in einigen Passagen auch luftreinigende UV-C-Technologien eingesetzt. Eine Untersuchung der LIT Technology Russia und der LIT bescheinigt eine vorbeugende Wirkung vor viralen Infektionen in der Station und den Zügen [85].

Durch die Corona-Pandemie hat das Thema UVGI erheblich an Bedeutung gewonnen. Alleine in China werden unzählige Anlagen zur Reinigung von Bussen und Zügen in Betrieb genommen. Diese zielen, im Gegensatz zur Reinigung der Luft durch Klimageräte, auf die Desinfektion der Flächen durch direkte Bestrahlung mit UV-C-Lichtquellen ab. Die Hauptargumente, die dabei von den Verantwortlichen benannt werden, sind:

- die belastbaren Erkenntnisse aus anderen Bereichen wie Krankenhäusern (insbesondere Operationssälen) oder der Wasseraufbereitung [87],
- die Zeitersparnis (Reduktion von 40 auf 5 Minuten) und damit ein höherer Durchlauf bzw. Personalsparnisse [88],
- das Schonen der Materialien (im Vergleich zu chemischen Reinigungsvorgängen) [88].

Hohe Sicherheitsvorkehrungen für die Mitarbeiter sind zu beachten. Quellen zur Wirksamkeit bzw. der Qualitätssicherung konnten in der Recherche nicht gefunden werden; wissenschaftliche und medizinische Aussagen sind in den Pressemeldungen [89], [87] nachlesbar.

Auch in den USA werden in New York unter Kooperation der ansässigen Metropolitan Transportation Authority (MTA) New York City Transit und der Columbia University Züge der Metro und Busse mit UV-Hochleistungslampen desinfiziert [90].

In Krakau hat die Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. (MPK S.A.) im April 2020 bei ersten Reinigungseinsätzen im von ihnen betriebenen Straßenbahnnetz begonnen, mit UV-Lampen Züge zu desinfizieren. Vor allem die Zeitersparnis und die Möglichkeit, Flächen zu reinigen, die für das Personal nur schwer zugänglich sind, waren hier die Treiber [91].

UV-C-Inaktivierung lässt sich prinzipiell betriebsicher und wirkungsvoll in raumlufttechnische Systeme im ÖV integrieren. Bzgl. der Desinfektion von Oberflächen ist ein differenzierteres Bild zu zeichnen. Die Reinigung von Sitzbereichen kann nur in leeren Zügen erfolgen. Derzeit verfolgte Ansätze sind noch recht aufwendig. Hier ist zukünftig eine stärkere Automatisierung von Lösungen zu erwarten, die auch variabel auf unterschiedliche Oberflächentexturen reagieren können und zugleich über entsprechende integrierte Detektorsysteme die Qualitätssicherung der Prozesse übernehmen. Auch die Integration von UV-C-Strahlern stationär (in die Beleuchtungssysteme) ist mit entsprechenden Sicherungssystemen vorstellbar.

Kompakte UV-C-LED-Lösungen werden beispielsweise für die Bestrahlung von Bedien- und Tastenfeldern, Griffen, Bedienknöpfen entwickelt. Auf diese Weise können insbesondere sehr häufig berührte Oberflächen desinfiziert werden. Unterstützend kann auf ein „Hygienic Design“ der Zugraumstrukturen und Oberflächen geachtet werden.

Aktuell fehlt eine Auskunft zu geeigneten UV-Produkten für Betreiber des ÖV. Im Bereich Raumlufttechnik schreiten die Standardisierungsbemühungen dagegen voran.

Weitere technische und betrieblich-organisatorische Schutzmaßnahmen

Durch eine Recherche nach bereits geplanten oder umgesetzten Schutzmaßnahmen im ÖV konnte ein erster Überblick für die weitere Projektbearbeitung geschaffen werden. Vor allem in Arbeitspaket 3 werden abschließend Empfehlungen für Maßnahmen und Handlungsanweisen erarbeitet. Die folgenden Maßnahmen in Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 sind das Ergebnis einer Datenerhebung zu technischen Schutzmaßnahmen in Fahrzeugen sowie an Stationen des ÖV. Des Weiteren wurden organisatorische und betriebliche Maßnahmen identifiziert. Die Einschätzungen zu Vor- und Nachteilen einzelner Maßnahmen wurden durch Mitarbeiter des IFB Institut für Bahntechnik GmbH im Zuge der Projektbearbeitung abgegeben.

TABELLE 2: TECHNISCHE SCHUTZMASSNAHMEN IN FAHRZEUGEN DES ÖV

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Kapazitätsbegrenzung	Verbot von Stehplätzen oder Absperrung von Sitzplätzen reduziert die Gesamtkapazität von Fahrzeugen	Erhöhung des Abstands zwischen Fahrgästen	Reduzierte Einnahmen	[92]
Stationäre Barrieren	Insbesondere Glas- oder Plexiglasscheiben zur Trennung zwischen Fahrgästen (Sitz/Sitz oder Sitz/Gang) oder zwischen Fahrgast und Fahrpersonal (Busfahrende)	Reduktion Tröpfcheninfektion möglich	Kosten Zulassung bei fester Montage	[92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99]
Desinfektionsmittelspender	Ermöglicht regelmäßige Handreinigung für Fahrgäste und Personal	Reduktion Schmierinfektion möglich	Kosten	[92] [94] [95]
Demontage Mobiliar	Reduktion von Menschenansammlungen bei Reduktion von Sitzgelegenheiten	Erhöhung Abstand möglich	Reduktion Sitzplätze (bes. für alte, kranke Menschen)	[94]
Berührungslose Abfalleimer	Besonders zur Entsorgung von potentiell keimbelasteten Abfällen (Masken, Taschentüchern)	Reduktion Schmierinfektion möglich	Falls nicht vorhanden, kostenintensiver Umtausch	[94]
Photokatalytische Beschichtung von Oberflächen	Lack, der auf Oberflächen aufgetragen wird und diese bei Lichteinfall durch energetische Aktivierung von Sauerstoff desinfiziert	Reduktion Schmierinfektion möglich	Beschichtungsvorgang erzeugt Zusatzkosten	[95]
Bargeldloses Ticketing	Reduktion von Berührflächen und Mensch-zu-Mensch-Kontakten durch (bargeldlose) Fahrscheinautomaten in Fahrzeugen	Reduktion Schmierinfektion und Kontakt Fahrgäste – Personal	Kosten	[95]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Markierungen/Leitsysteme	Markierungen auf dem Boden helfen Fahrgästen, gegenseitigen Abstand zu halten Anzeigesystem für freie Sitzplätze	Reduktion Tröpfcheninfektion möglich	Aufwand zur Montage und Wartung Platzmangel	[97] [99]
Fieberthermometer	Besonders bei längerem Aufenthalt im Fahrzeug kann beim Einstieg die Körpertemperatur der Fahrgäste gemessen werden	Symptomerkennung	Kosten Begrenzte Aussagekraft (Fieber nur ein Symptom von vielen)	[99]
Fahrgastzählung/Auslastungsanzeige	Die Fahrgäste können über Apps oder Anzeigen am Bahn-/Bussteig über die Auslastung einzelner Fahrzeuge informiert werden. Dazu müssen Fahrgäste gezählt werden. Optional Verknüpfung mit historischen Fahrgastzahlen, um Voraussagen treffen zu können.	Gleichmäßige Auslastung von Fahrzeugen Auf Auslastung abgestimmte Reiseplanung Erhöhung des Abstands	Kosten für Fahrgastzählung (außer durch Fahrpersonal durchgeführt), Software und Anzeigen	[100]
Absperrung Fahrerraum mit Absperrband	In als ausreichend angesehenem Abstand trennt ein Absperrband den Fahrerraum vom Fahrgastraum visuell ab, mit Aufhebung des Fahrkartenverkaufs durch Fahrer.	Abstandswahrung der Fahrgäste zum Fahrer	Kundeninformation durch Fahrer erschwert (nur akustisch ohne direkten Sichtkontakt)	[94] [101] [102] [103]
Absperrung Fahrerraum mit voll abschließender Schutzfolie	Eine (teilweise durchsichtige) Schutzfolie schließt den Fahrerraum vom Fahrgastraum physisch ab, mit Aufhebung des Fahrkartenverkaufs durch Fahrer.	Abstandswahrung der Fahrgäste zum Fahrer und Trennung der Aerosolausbreitungsgebiete von Fahrgästen und Fahrer	Kundeninformation durch Fahrer unmöglich	[94] [103] [104]
Automatisches Öffnen und Schließen der Fahrgasttüren	An jeder Station werden die Fahrgasttüren selbsttätig zentral geöffnet und geschlossen, sofern dies technisch möglich ist.	Durchlüftung während Halt an jeder Station	Kontraproduktiv zur Innentemperatur des Fahrgastraums bei künstlicher Heizung/Kühlung	[98] [104] [105] [106] [107]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Frischluftzufuhr über offene Fenster	Fenster im Fahrgastraum werden geöffnet, soweit dies technisch möglich ist.	Ständige Durchlüftung während Halt und Fahrt	Kontraproduktiv zur Innentemperatur des Fahrgastraums bei künstlicher Heizung/ Kühlung; Zugluft während Fahrt	[98] [105] [106] [107]

TABELLE 3: TECHNISCHE SCHUTZMASSNAHMEN AN HALTESTELLEN & STATIONEN DES ÖV

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Stationäre Barrieren	Insbesondere Glas- oder Plexiglasscheiben zur Trennung zwischen Fahrgästen (Sitz/Sitz) oder zwischen Fahrgast und Verkaufspersonal (Fahrkartenschalter)	Reduktion Tröpfcheninfektion möglich	Kosten	[92] [93] [108]
Desinfektionsmittelspender	Ermöglicht regelmäßige Handreinigung für Fahrgäste und Personal	Reduktion Schmierinfektion möglich	Kosten	[92] [93] [95]
Demontage Mobiliar	Reduktion von Menschenansammlungen bei Reduktion von Sitzgelegenheiten	Erhöhung Abstand möglich	Reduktion Sitzplätze (bes. für alte, kranke Menschen)	[93]
Berührungslose Abfalleimer	besonders zur Entsorgung von potentiell keimbelasteten Abfällen (Masken, Taschentüchern)	Reduktion Schmierinfektion möglich	Falls nicht vorhanden, kostenintensiver Umtausch	[93]
Photokatalytische Beschichtung von Oberflächen	Lack, der auf Oberflächen aufgetragen wird und diese bei Lichteinfall durch energetische Aktivierung von Sauerstoff desinfiziert	Reduktion Schmierinfektion möglich	Beschichtungsvorgang erzeugt Zusatzkosten Nur an entsprechend beleuchteten Stellen	[95]
Bargeldloses Ticketing	Reduktion von Berührflächen und Mensch-zu-Mensch-Kontakten durch (bargeldlose) Fahrscheinautomaten in Fahrzeugen	Reduktion Schmierinfektion und Kontakt Fahrgäste – Personal	Kosten	[95]
Markierungen/Leitsysteme	Markierungen auf dem Boden helfen Fahrgästen, gegenseitigen Abstand zu halten beim Warten am Bahn-/Bussteig auf (Roll-)Treppen und Wegen beim Warten an Fahrzeugtüren (bei gleichbleibenden Türpositionen)	Reduktion Tröpfcheninfektion möglich	Aufwand zur Montage und Wartung Platzmangel	[97] [99]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Fieberthermometer	Beim Betreten von Stationen kann die Körpertemperatur der Fahrgäste gemessen werden	Symptomerken- nung	Kosten Begrenzte Aussagekraft (Fieber nur ein Symptom von vielen)	[99]
Notfall-Isolations-Kits	An Stationen kann persönliche Schutzausrüstung und/oder Isolationsmaterial vorgehalten werden.	Reduktion Infektionsrisiko im Einzelfall möglich	Kosten Aufwand Pflege, Instandhaltung	[99]
Fahrgastzählung/Auslastungsanzeige	Die Fahrgäste können über Anzeigen am Bahn-/Bussteig über die Auslastung einzelner Fahrzeuge informiert werden. Erfordert Fahrgastzählung und optional Verknüpfung mit historischen Fahrgastzahlen, um Voraussagen treffen zu können.	Gleichmäßige Auslastung von Fahrzeugen Erhöhung des Abstands	Kosten Fahrgastzählung (wenn nicht durch MA durchgeführt), Software und Anzeigen	[100]
Social Distancing durch Videoüberwachung	KI-basiertes System, dass Unterschreitungen von Mindestabständen detektiert und Warnsignale initiieren kann. Auch der Zugang zu betroffenen Bereichen kann beschränkt werden.	Erhöhung des Abstands	Kosten Eingriff in Persönlichkeitsrechte	[109]

TABELLE 4: ORGANISATORISCHE UND BETRIEBLICHE SCHUTZMASSNAHMEN IM ÖV

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Einstellung des ÖV	Der ÖV wird temporär eingestellt.	Eliminierung Infektionsrisiko im ÖV	Vollständige Verletzung der Gewährleistung der Verkehrsdienstleistung; Fixkosten stehen keinerlei Einnahmen gegenüber	[99] [101] [110] [111]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Reduzierung des ÖV auf Mindestangebot	Der ÖV wird auf ein Mindestangebot reduziert.	Aufwandsentsprechend Ertragsminimierung zur Einhaltung vorheriger betriebswirtschaftlicher Abhängigkeiten	Partielle Verletzung der Gewährleistung der Verkehrsdienstleistung, Abstandshaltung u. U. nicht gewährleistetbar	[99] [110] [111] [112] [113]
Gewährleistung des ÖV-Angebots ohne Änderung	Das ÖV-Angebot wird ohne Änderung weiterbetrieben.	Vollständige Gewährleistung der Verkehrsdienstleistung	Keine Anpassung an sinkende Fahrgastzahlen, unwirtschaftlich	[93] [99] [110] [112] [114] [115]
Ausweitung des ÖV-Angebots	Das ÖV-Angebot wird ausgeweitet; es werden zusätzliche Fahrten und/oder mehr Sitzplätze angeboten.	Maximierung des Abstands und Gewährleistung Verkehrsdienstleistung	Mehraufwand, erhöhter Wartungsaufwand, unwirtschaftlich	[99] [114] [116]
Halt an jeder Station	Auch Bedarfshaltestellen werden stets bedient.	Fahrgäste brauchen keine Haltewunschtaaste mehr anfassen	Bedienung von Bedarfshaltestellen auch ohne Fahrgastwechsel	[105] [106]
Vermeidung von Verkehrsspitzen	Mittels Aufrufen an Fahrgäste wird um Vermeidung der ÖV-Nutzung während Verkehrsspitzen gebeten, um mit gleichmäßigerer Tagesganglinie eine gleichbleibende Auslastung des ÖV über den Betriebstag zu versuchen.	Gleichmäßigere Auslastung des ÖV	Abhängigkeit von individuellen Umständen der Fahrgäste	[99] [117]
Aufruf zur Vermeidung der ÖV-Nutzung	Mittels Aufrufen werden potentielle Fahrgäste gebeten, den ÖV zu vermeiden.	Reduzierung der potentiellen Infektionen im ÖV	U. U. langfristige Abschreckung von ÖV-Kunden	[99] [117]
Reservierungspflicht	Das Verkehrsmittel kann nur mit reserviertem Sitzplatz benutzt werden.	Vermeidung von Stehplätzen zur Abstandshaltung	Widerspricht der freien Nutzung von Verkehrsverbindungen, auch bei Anschlussverlust	[108]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Einschränkung reservierbarer Sitzplätze	Für ausgewählte Sitzplätze wird die Reservierungsmöglichkeit entzogen (eine Nicht-Besetzung der Sitze kann aber durch Verhinderung der Reservierung nicht garantiert werden. Bei zeitgleicher Buchung mehrerer Tickets können auch Plätze nebeneinander gebucht werden).	Erhöhung der Abstandshaltung	Reduzierung der Reservierungsmöglichkeit	[108] [111] [116]
Vermeidung aerosolbelastender Kommunikation	Vermeidung aerosolbelastender Kommunikation wie (lautem) Sprechen, zum Beispiel mittels auffällig gekennzeichnete und klar beschriebener Ruhewagen.	Aktive Verringerung der Aerosolbelastung	Abhängigkeit der Maßnahme von (aktiver) Kommunikationskultur der Fahrgäste	[118] [119]
Mund-Nasen-Schutz	Tragen von Mund-Nasen-Schutz („Masken“).	Passive Verringerung der Aerosolbelastung	Abhängigkeit der Maßnahme von (passiver) Schutzkultur der Fahrgäste	[93] [94] [104] [105] [106] [107] [111]
Hinweise zum Selbstschutz	Akustisch/Visuell/Virtuell werden Fahrgäste auf Möglichkeiten zum gesundheitlichen Selbstschutz hingewiesen und um Einhaltung der zusätzlichen Regeln gebeten.	Motivation zum Selbstschutz (Akzeptanz) („Pull“)	Abhängigkeit der Maßnahme von Schutzkultur der Fahrgäste	[93] [94] [99] [105] [106] [107] [111]
Sanktionierung bei Regelverletzung	Regelverletzungen werden durch Geldbußen bis hin zu Ausschluss von der Beförderung sanktioniert.	Druck zur Regeleinhaltung („Push“)	Juristischer Konflikt mit Beförderungspflicht; Förderung aggressiven Verhaltens (Reaktanz)	[104] [116]
Zusätzliche Reinigung	Die ÖV-Fahrzeuge und -Stationen werden zusätzlich bzw. häufiger gereinigt.	Minderung des Infektionsrisikos	Zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand	[104] [105] [106] [107] [115] [116]

Maßnahme	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quellen
Schulung des Personals	Das Personal wird ergänzend geschult, Maßnahmen zu koordinieren, deren Einhaltung zu überprüfen und Fahrgästen behilflich zu sein.	Förderung der Maßnahmeneinhaltung	Zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand	[93] [94] [99] [111]
Schutz des Personals	Das Personal wird mit zusätzlichen Schutzzutensilien ausgerüstet (v. a. Masken, Desinfektionsmittel und Schutzhandschuhe).	Personal kann auch im Pandemiefall Fahrgästen körperlich behilflich sein	Zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand	[94] [99] [111]
Protokollierung von Verdachtsfällen	Verdachtsfällen einer Erkrankung und/oder Übertragung werden mit den für die Gesundheitsbehörden maßgebenden Daten protokolliert.	Unterstützung der Gesundheitsbehörden und Eindämmung der Ausbreitung	Zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand; ggf. datenschutzrechtliche Klärung nötig	[108] [111]
Protokollierung von Maßnahmen	Durchgeführte Maßnahmen werden protokolliert.	Qualitätskontrolle der Umsetzung der Maßnahmen	Zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand	[99] [111]

3.3 Verhalten und Lenkung von Fahrgästen im ÖV

Die Fahrgastzahlen im ÖV sind mit dem Beginn der Pandemie in allen betrachteten Gebieten quer durch alle untersuchten Gruppen deutlich gesunken (siehe Abbildung 2).

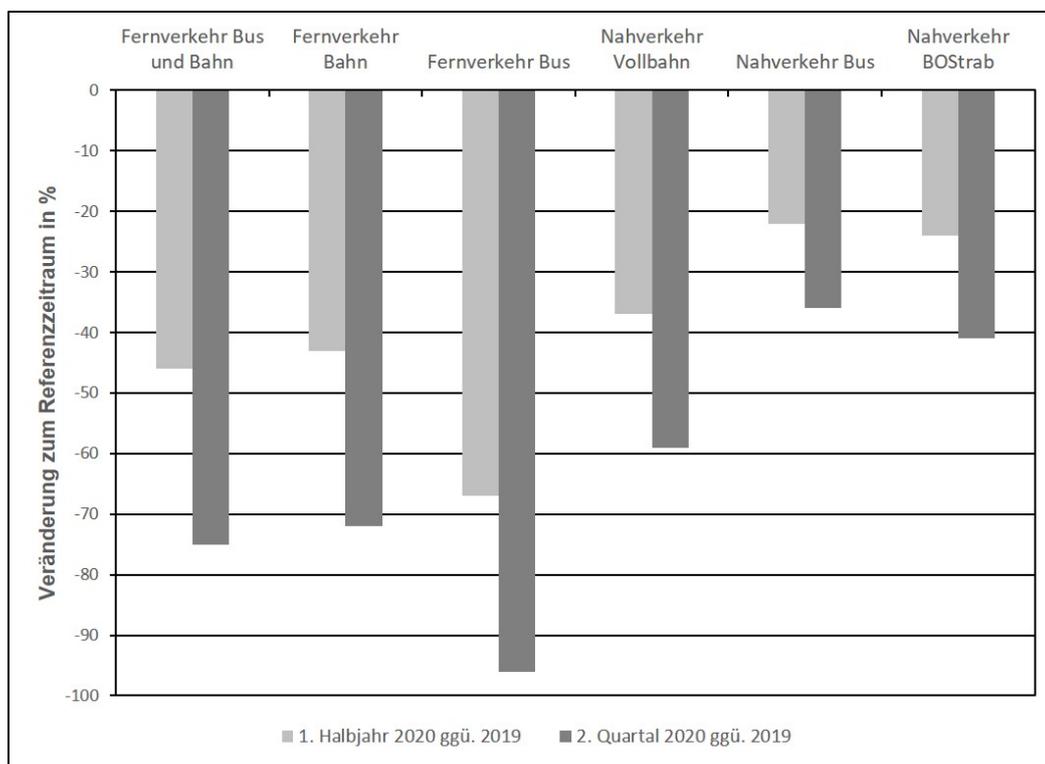


Abbildung 2: Prozentuale Veränderung der Fahrgastzahlen im Vergleich zum Zeitraum des Vorjahres [120].

Die Statistiken für den Nahverkehr Bus und den Nahverkehr BOStrab (Straßenbahnen, Stadtbahnen, U-Bahnen) sind eventuell verzerrt durch Zeitkarten, da diese wahrscheinlich anders genutzt wurden. Bei diesen Werten ist eine Unterschätzung des Rückgangs wahrscheinlich.

Der Rückgang in der Stadt ist stärker als in ländlichen Gebieten und die Angst vor Ansteckung bei älteren Menschen ist größer als bei jüngeren. Auch eine Abhängigkeit der Nutzung des ÖV vom sozialen Status deutet sich an, so können wohlhabendere Menschen eher auf das Auto ausweichen [121].

Besonders deutlich ist der Rückgang im Fernverkehr, sowohl bei der Bahn und insbesondere in Fernbussen [120]. Es werden Gründe für die reduzierte Nutzung genannt ("Ansteckungsgefahr, Virus, Angst", "Performance der Bahn", "Nutze (lieber) andere Verkehrsmittel") und Gegenmaßnahmen vorgeschlagen ("Besondere Preisangebote anbieten", "Auf erweiterte Maßnahmen zu Sauberkeit und Hygiene hinweisen", "Die max. Anzahl der Personen begrenzen, dass ein ausreichender Sicherheitsabstand gewährleistet ist") [122].

In den Niederlanden ist eine deutlich größere Reduktion der Bahn-Nutzung zur Hauptverkehrszeit im Vergleich zur Nebenverkehrszeit festzustellen, was in anderen Studien nicht untersucht wurde [123]. Es besteht hier Forschungsbedarf, wie die Verteilung der Fahrgäste über den Tag optimiert werden kann, da eine Abmilderung von Lastspitzen bei ansonsten vergleichsweise hoch bleibender Nachfrage zu einer geringeren Belegungsdichte in Fahrzeugen des ÖV führen kann.

Infektionsrelevantes Verhalten und Regelkonformität von Fahrgästen im ÖV

Zum Zeitpunkt der Recherche im 3. bis 4. Quartal 2020 scheinen nur wenige Feldstudien (basierend auf Beobachtungs- und Befragungsdaten) zum regelkonformen und infektionsrelevanten Verhalten Reisender im öffentlichen Straßen- und Schienenverkehr zu existieren. Studien zu Verhaltensänderungen im Pandemieverlauf waren gar nicht auffindbar.

In sechs Studien zum Individualverhalten werden folgende Inhalte und Ergebnisse berichtet:

Drei Studien befassen sich mit dem sogenannten „face-touching behavior“ und dem Tragen von Masken im Kontext des öffentlichen Verkehrs [124], [125], [126]. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Maskentragen die Angewohnheit, sich ins Gesicht zu fassen, nicht zu verstärken scheint.

Eine Studie zum Tragen von Mund-Nasen-Bedeckungen legt nahe, dass diese in Deutschland im öffentlichen Bereich weitestgehend konsequent getragen werden [127]. Die Autoren beobachteten eine Gesamt-Compliance von 97,2 % im Mai 2020 in öffentlichen Bereichen (u. a. öffentlichen Verkehr) in Deutschland. Die verschiedenen Mund-Nasen-Bedeckungen kamen mit folgenden Häufigkeiten zum Einsatz: medizinische Einmal-Maske oder auch chirurgischer Mund-Nasen-Schutz (44,9 %), Stoffmasken (39,8 %), FFP-Masken (7,1 %) und Schals (5,4 %). In 30,4 % der Fälle wurden allerdings Anwendungsfehler beobachtet, am häufigsten wurde die „Maske unter der Nase getragen“ (41,4 %) oder der „Nasenbügel nicht angepasst“ (20,8 %).

Bezüglich der Einhaltung anderer persönlicher Schutzmaßnahmen (Abstandhalten und Handhygiene) im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel existieren vereinzelt Studien aus dem nicht-europäischen Ausland, z. B. aus Ghana und dem Iran [128], [129]. Die Ergebnisse aus diesen Studien zeigten, dass die Maßnahmen von der Bevölkerung nicht mehrheitlich eingehalten werden, aufgrund der Untersuchungszeiträume und -orte ist die Übertragbarkeit auf Deutschland als eingeschränkt zu betrachten.

Mehrheitlich adressieren die zum Verhalten Reisender auffindbaren Studien das Mobilitätsverhalten und die Bewegungsmuster, insbesondere die Veränderung der Reishäufigkeit.

Zum Mobilitätsverhalten, einschließlich assoziierter Einstellungen wurden insgesamt 30 Studien identifiziert. Erwartungsgemäß hat sich das Verhalten Reisender und Pendler während der Pandemie im Vergleich zu Zeiten vor der Corona-Pandemie stark verändert.

Die Veränderungen werden sowohl als Folge politischer Entscheidungen und Maßnahmen („Lockdown“, Empfehlungen zur Arbeit im Home-Office) als auch als Folge von Individualentscheidungen basierend auf der Sorge vor Ansteckung betrachtet. Nachfolgend werden einige der Studien zum Mobilitätsverhalten beispielhaft berichtet.

In einer weltweit verbreiteten Befragung im Mai 2020 wurden Veränderungen beim Anlass der Reise, bei der Wahl des Verkehrsmittels, der zurückgelegten Strecke und der Häufigkeit der Reisen beobachtet. Zudem beeinflusste die Pandemie die Wahl des Verkehrsmittels hin zu einem signifikanten Wechsel von öffentlichen auf private Verkehrsmittel. Bei der Wahl der Verkehrsmittel hatten Corona bezogene Bedenken eine hohe Priorität. In Folge dessen rückten andere Faktoren (Komfort, Kosten, Zeitersparnis) in den Hintergrund [130].

In diesem Zusammenhang ergab die Auswertung von 1,8 Millionen „smart cards“ (Dauerkarten) in Schweden, dass die individuelle Neigung zum Verzicht auf den öffentlichen Nahverkehr in Folge der Corona-Pandemie von demographischen Faktoren abhängt: Personen mit höherem Bildungsstand und Einkommen, ältere Personen und Personen, die öffentliche Verkehrsmittel bereits zuvor weniger genutzt hatten,

hören mit höherer Wahrscheinlichkeit auf, den öffentlichen Verkehr aufgrund und während der Pandemie zu nutzen [131].

In weiteren Studien wurde das wahrgenommene Risiko, sich zu infizieren, als Prädiktor für die weniger häufige Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und den Umstieg auf andere Verkehrsmittel identifiziert [132], [133].

Veränderungen der Einstellungen von Fahrgästen

Es gilt zu bedenken, dass sich Verhaltensweisen von Bevölkerungsgruppen und Individuen im Verlauf der Pandemie möglicherweise verändern, beispielweise als Folge einer Gewöhnung an die „neue Normalität“, aktueller Fahlzahlen, geltender Beschränkungen, medialer Darstellungen etc. Dabei gilt, dass Einstellungen psychologisch als wichtige Prädiktoren von Verhalten betrachtet werden.

Eine australische Studie dokumentiert anhaltende Bedenken gegenüber der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel nach Lockerung der Restriktionen und einer etwa 4- bis 6-wöchiger Phase geringer Neuerkrankungszahlen Ende Mai, Anfang Juni 2020 [134]. In zwei Arbeiten, die sich allerdings vornehmlich auf den Tourismus beziehen, werden Corona bedingte Reiseangst und ihre Folgen, u. a. Bewältigungsstrategien, Resilienzsteigerung und vorsichtigeres Reiseverhalten berichtet [135], [136]. In welchem Umfang Bedenken und Reiseängste bestehen bleiben werden und wie sich das Mobilitätsverhalten aufgrund der Pandemieerfahrung langfristig (post-Corona) verändern wird, lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zuverlässig abschätzen.

Es fehlen weitere Studien zu Einstellungsänderungen Reisender und Pendler, möglicherweise entwickelter Reiseangst und Bewältigungsstrategien, insbesondere für Deutschland und Europa.

Daher lassen sich Beobachtungsdaten eines spezifischen Zeitraumes nicht uneingeschränkt auf andere Zeiträume übertragen. Bei der Interpretation der Studien muss immer bedacht werden, dass es sich um Momentaufnahmen in einem sehr dynamischen aktuellen Geschehen handelt und sich menschliches Verhalten in Folge dieser Dynamik verändern kann.

Fahrgastlenkung und Crowd Management

Zur Thematik der Maßnahmen der ÖV-Betreiber zur Fahrgastlenkung an Stationen des ÖV während der COVID-19-Pandemie zeigt sich, dass diese nicht über ein Anbringen von Markierungen auf dem Boden oder an Objekten zur Unterstützung des Abstandhaltens hinausgehen. Besonders in hochfrequentierten Bereichen vor Geschäften, Reisezentren o. ä. sind demnach Markierungen und zum Teil Absperrungen installiert worden [137], [138].

Einzig die Hamburger Hochbahn AG hat ein Pilotprojekt zur Lenkung von Fahrgastströmen in zwei Haltestellen gestartet. Dabei wird durch Mittellinien und Pfeile die Gehrichtung vorgegeben, was besonders an Ausgängen Fahrgastbegegnungen reduzieren soll. Bereits ohne diese Maßnahmen gehen etwa 80 % der Menschen an den beiden Haltestellen auf der rechten Seite, wobei an einigen Ausgängen bis zu 40 % der Menschen im Gegenverkehr laufen, so dass dichtes Gedränge entsteht [139].

Zum Verhalten und zur Steuerung Reisender auf übergeordneter Ebene (Crowd Behavior and Management) wurden insgesamt fünf Literaturquellen identifiziert, die auf das Erhöhen interpersonaler physischer Distanzen und die Verringerung der Personendichte sowie auf die Messung dieser Variablen abzielen.

In einer Arbeit wird eine technische Maßnahme zur Steuerung der Massen vorgeschlagen. Intelligente Verhaltenssteuerung soll mittels Reiseempfehlungen auf Basis lernender Algorithmen erfolgen. Beispielsweise sollen Personen unter 60 und Personen über 60 Jahren unterschiedliche Empfehlungen für Reisezeitpunkte und Routen erhalten, um diese Personengruppen stärker voneinander zu trennen, Überfüllung zu vermeiden und Risikogruppen besser zu schützen [140].

Ein Abstandswarnsystem könnte auf Basis der Analyse von Wifi-Signalen (Wireless Fidelity) mobiler Endgeräte funktionieren und im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel eingesetzt werden [141].

Forscher aus den Niederlanden entwickelten ein Tool zum Echtzeit-Tracking der „Passantendynamik“ zur Analyse der interpersonellen Abstände, welches an Bahnhöfen in den Niederlanden bereits erprobt wurde. Die Technologie soll gemeinsam reisende Familienmitglieder von Fremden unterscheiden können, wobei die Privatsphäre laut der Autoren gewahrt bleibt [142].

Insgesamt fehlt, insbesondere für Deutschland und Europa, die breite wissenschaftliche Grundlage (Beobachtungsstudien, Maßnahmenevaluationen) zur Beschreibung und Quantifizierung des pandemierelevanten Verhaltens im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs, zu Verhaltensänderungen im Pandemieverlauf sowie zur Evaluation geeigneter Maßnahmen zur Förderung und dauerhaften Aufrechterhaltung des gewünschten Verhaltens.

Insbesondere wäre die Identifikation spezifischer Prädiktoren (wie möglicherweise die Reisedauer) regelkonformen Verhaltens im Kontext öffentlicher Verkehrsmittel zur Ableitung spezieller verhaltensbezogener Maßnahmen wichtig.

Regionale und kulturelle Unterschiede können in verschiedenen Kontexten menschlichen Verhaltens eine Rolle spielen (z. B. Verbreitung des Maskentragens). Weiterhin sollten die jeweils regional und aktuell geltenden Regelungen (z. B. Maskenpflicht) zum Umgang mit dem Virus das Verhalten beeinflussen. Die Übertragbarkeit der wenigen Beobachtungs- und Befragungsstudien aus dem nichteuropäischen Ausland (u. a. China, Ghana) auf Europa im Allgemeinen und Deutschland im Speziellen, ist daher möglicherweise eingeschränkt.

Empfehlungen und Maßnahmen zur Förderung regelkonformem Verhaltens

Trotz der noch dünnen Befundlage im Bereich des Verhaltens im öffentlichen Verkehr lassen sich einige Empfehlungen und Maßnahmen ableiten.

Regelkonformes Verhalten, welches nachweislich dem Ziel der Pandemiebekämpfung dient, sollte erstens gefördert und zweitens kontrolliert und korrigiert werden. Hier gibt es einige wenige Anhaltspunkte aus Studien, die im Kontext des öffentlichen Verkehrs durchgeführt wurden, und mehrere weitere wissenschaftliche Untersuchungen und Ansätze, die sich allerdings nicht auf das Verhalten in öffentlichen Verkehrsmitteln beziehen.

Die hier berichteten Studien zeigten, dass Masken bei der Nutzung in öffentlichen Verkehrsmitteln häufig nicht korrekt angelegt werden, weshalb ihr Schutzpotenzial nicht voll ausgeschöpft wird. Eine gezielte und intensiviertere Wissensvermittlung zur Maskenanwendung an die Bevölkerung unter Berücksichtigung der beobachteten Tragefehler ist daher sehr zu empfehlen [127].

Hinweise auf das korrekte Anlegen der Masken sind daher auch im Bereich des öffentlichen Verkehrs sinnvoll. In der bereits berichteten deutschen Studie trugen lediglich 7 % der beobachteten Personen FFP-Masken, viele trugen Alltagsmasken und Schals [127]. Es sollte unter Beachtung vorhandener Ressourcen in Erwägung gezogen werden, eine Empfehlung auszusprechen, für die Dauer einer Reise und während des Aufenthalts an Bus- und Bahnstationen Masken mit geprüfter bzw. nachweislich höherer

Schutzwirkung (z. B. FFP2 ohne Ventil) zu tragen. Entsprechende Hinweise sollten möglichst im Vorfeld der Reise erfolgen.

Zwar scheint das Maskentragen das „face-touching behavior“ den aktuellen Studien zu Folge nicht zu erhöhen. Die Befundlage ist allerdings noch dünn. Weiterhin sollte das „Sich-ins-Gesicht-Fassen“ möglichst ganz unterlassen werden. An Bahnhöfen und in Verkehrsmitteln könnten entsprechende Hinweise ergänzt werden. Es ist zu beachten, dass es sich hier um eine starke Gewohnheit handelt, die nur schwer „abtrainiert“ werden kann. Daher wurde in einer Studie eine Smartwatch-Anwendung vorgeschlagen, die den Nutzer warnt, sobald die Hand zum Gesicht geführt wird [126].

Nicht zuletzt sollten zur Erfassung und Förderung des Abstandhaltens und der Vermeidung von Crowding auch die technischen Lösungsansätze zum Crowd Management weiterverfolgt und -entwickelt werden.

4 Erste Gefahreinstufung im ÖV

Die systematische Suche zum Thema COVID-19 und öffentlicher Verkehr wie Bahn und Bus in den einschlägigen elektronischen Datenbanken ergab nur sehr wenige Studien, die mittels verlässlicher Methoden einen Zusammenhang zwischen COVID-19 und öffentlichem Verkehr wie Bus und Bahn untersucht haben [143]. Insgesamt wurden anfänglich 746 Publikationen gefunden, wobei nach Anwendung der Ausschlusskriterien nur 9 Beobachtungsstudien in Betracht gezogen wurden.

Einfluss des Reisens auf die Verbreitung von SARS-CoV-2

Zahlreiche Studien auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene zeigten, dass die Ausbreitung von COVID-19 entscheidend von der Mobilität abhängt. Beispielhaft sollen dazu einige wenige Publikationen angeführt werden.

Auf lokaler Ebene wurden die tagesspezifischen COVID-19-Fälle in Wuhan, China, für den Zeitraum 23.01.2020 bis 08.03.2020 analysiert [144]. Am 07.02.2020 wurde der gesamte innerstädtische private und öffentliche Verkehr (von wenigen Ausnahmen abgesehen) blockiert. Während sich die Anzahl von COVID-19-Erkrankungen bis zum 07.02.2020 vervielfachte, verblieben diese ab dem 08.02.2020 konstant. Die Blockierung des gesamten lokalen Verkehrs war zwar nur eine von mehreren präventiven Maßnahmen in Wuhan, die Autoren der Studie schlussfolgern dennoch, dass die Verkehrsrestriktionen einen Beitrag zur Senkung des Ansteckungsrisikos mit SARS-CoV-2 geleistet haben [144].

Auf Länderebene zeigt eine umfassende Studie die Verbreitung von COVID-19 in China, ausgehend von Wuhan [145]. Bewegungsprofile bzw. Reisen von über 11 Millionen Personen aus Wuhan zeigen die Höhe der Infektionsraten (SARS-CoV-2) in den 296 untersuchten Präfekturen in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen, die in diese Präfekturen in der ersten Phase der Epidemie bis zum 19. Februar 2020 gereist sind. Ferner zeigt diese Studie deutlich, dass mit Einführung des Reisestops in Wuhan die weitere geographische Verbreitung des Virus gestoppt werden konnte. Weitere ähnliche Studien bestätigten dieses Ergebnis [146], [147], [148], [149], [150]. Während die meisten dieser chinesischen Studien die Mobilität insgesamt untersucht haben, weisen andere auf den spezifischen Effekt von Flug- [147] oder Bahnreisen [151] auf die COVID-19-Verbreitung hin.

Ähnliche Assoziationen wurden auch für Italien [152], [153], Brasilien [154] und Kalifornien [155] beschrieben. Interessant ist im Besonderen die Studie [155], welche die Verbreitung verschiedener genetischer Varianten von SARS-CoV-2 genutzt hat, um die geographischen Transmissionswege und die Verbreitung des Virus zu analysieren. Dabei konnten Virusgenome von infizierten Flugreisenden und Teilnehmern an Kreuzfahrtschiff-Reisen im Hinblick auf die spezifische weitere Verbreitung von COVID-19 in Kalifornien analysiert werden. Auch hier war die Mobilität entscheidend für die weitere Verbreitung des Virus. Methodisch handelt es sich bei den meisten Studien um ein ökologisches Studien-Design. Dabei werden räumlich oder zeitlich aggregierte Daten zu Reiseaktivitäten mit Daten zu SARS-CoV-2-Infektionen in assoziative Verbindung gebracht. Die Korrelation dieser verschiedenen Daten sagt nichts aus über die Kausalität und nicht einmal über die Richtung des Effektes.

Zusammenfassend ist aber unstrittig und naheliegend festzustellen, dass Reisen von (infizierten) Personen maßgeblich zur Verbreitung der SARS-CoV-2-Infektionen beitragen. Diese Studien sind allerdings nicht geeignet, die Frage nach dem Erkrankungsrisiko durch Reisen mit Bahn, Bus oder Transport im öffentlichen Personennahverkehr auch nur annähernd zu beantworten.

Zusammenhang von Reisen im ÖV und COVID-19

Mit Ausnahme der kleinen Studie von [156] zeigen alle in [143] erwähnten fünf Studien einen Zusammenhang zwischen Reisen und COVID-19. Die Studien, die das reisebedingte Risiko mit der Exposition im häuslichen Umfeld verglichen haben [156], [157], [158], [159], zeigen übereinstimmend, dass das Risiko für den häuslichen Bereich im Vergleich zu Expositionen auf Reisen um eine Größenordnung höher liegt. Allerdings liefern von den insgesamt sechs identifizierten Studien lediglich zwei belastbare Ergebnisse, die nach [143] von ausreichender Qualität sind [160], [157]. Beide Studien weisen darauf hin, dass die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs [160] oder allgemein des öffentlichen Verkehrs [157] ein Risiko für COVID-19-Erkrankungen mit sich bringt. Allerdings ist das mit der Nutzung des öffentlichen Verkehrs verbundene Risiko deutlich geringer als das Infektionsrisiko durch den Aufenthalt an anderen Orten. Diese Studienergebnisse sind eventuell auch auf deutsche Verhältnisse zu übertragen.

Das Robert-Koch-Institut Berlin (RKI) stellte mit Stand vom 11.08.2020 alle Ausbrüche von COVID-19 (mit mindestens zwei laborbestätigten Fällen) in dem Epidemiologischen Bulletin [161] untergliedert nach dem Infektionsumfeld zusammen. Den fast 8.000 Ausbrüchen wurden über 55.000 Erkrankungsfälle zugeordnet. Bahn und Bus wurden dabei nur 0 (Bahn) bzw. 13 (Bus) Ausbrüchen mit 0 bzw. 66 Fällen zugeordnet. Wohnstätten und dabei insbesondere der private Haushalt sowie Alten- und Pflegeheime spielen sowohl für die Ausbrüche (3.902 bzw. 709) wie auch das Fallaufkommen (12.315 bzw. 13.314) die entscheidende Rolle. Die Autoren merken an, dass sich Ausbrüche in der Bahn u. U. schwer ermitteln lassen, weil die Identität eines Kontaktes nicht immer nachvollziehbar ist. Demzufolge ist von einer Untererfassung auszugehen. Das trifft vermutlich auch auf die Nutzung des Busses zu. Bei einer belastbaren Bewertung der möglichen Infektionsumfelder wären zusätzliche Angaben einer vergleichbaren Gruppe von Nicht-Infizierten nötig, die als „Kontrollgruppe“ dienen könnten. Diese Informationen fehlen allerdings. Dennoch verdeutlichen die Zahlen des RKI bei aller Vorsicht schon, dass die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln zum gesamten Infektionsgeschehen in Deutschland vermutlich nur einen geringen Beitrag geliefert hat. Es gibt derzeit keine plausiblen Gründe, warum sich an dieser ersten Einschätzung zukünftig etwas ändern sollte.

Infektionsrisiko im öffentlichen Personenverkehr

In [143] werden neun Publikationen ausgewertet, welche speziell das Infektionsrisiko während Reisen (auch Fernreisen) mit Bahn und Bus untersuchen [143]. Die qualitativ besten Studien aus China zeigen ein hohes Ansteckungsrisiko, wenn infizierte Personen im selben Waggon oder Bus mitreisen. Das Risiko ist zwar deutlich erhöht bei unmittelbar daneben sitzenden Mitreisenden, beschränkt sich aber nicht auf jene Mitreisende. Vermutlich trägt die Belüftung bzw. Klimatisierung des Fahrgastraumes zur Verbreitung des Virus über Aerosole bei. Bei den Studien zu Busreisen handelte es sich um mit Umluft klimatisierte Busse. Dass Klimaanlage, die einen höheren Anteil Frischluft nutzen (können) und damit Aerosole „verdünnen“, das Infektionsrisiko im Vergleich zu reinen Umluftanlagen senken, ebenso wie HEPA-Filter, erscheint möglich, kann aber aufgrund fehlender Angaben in den eingeschlossenen Studien nicht evidenzbasiert eingeschätzt werden.

Hinsichtlich des Effekts des räumlichen Abstands bei Zugreisenden zeigte sich, dass die durchschnittliche Infektionsrate zwischen den Reihen unterschiedlich war [53]. Passagiere auf Sitzen innerhalb der gleichen Reihe wie der infizierte Reisende hatten die höchste Ansteckungsrate mit einer erhöhten durchschnittlichen Ansteckungsrate von 1,5 (95 % Konfidenzintervall (KI) 1,3;1,8) im Vergleich mit anderen Sitzreihen ohne Indexpatienten. Das relative Risiko betrug in diesen Fällen 11,2 (95 % KI 8,6;14,6). Unmittelbare Sitznachbarn zu einem Indexpatienten hatten mit einer erhöhten Ansteckungsrate von 18,0 (95 % KI 13,9;23,4) das höchste Risiko, sich mit SARS-CoV-2 zu infizieren. Das Ansteckungsrisiko bei Passagieren der gleichen Sitzreihe ist etwa 10-mal höher im Vergleich zu dem Risiko der Reisenden, die eine oder zwei Reihen entfernt sitzen. Zu beachten ist hierbei, dass das Tragen eines Mund-Nasen-Schutzes (MNS) wäh-

rend des Beobachtungszeitraumes der Studie noch nicht verpflichtend war. Damit kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Ergebnis unterschiedlich ausgefallen wäre, wenn alle Passagiere bereits MNS getragen hätten.

Die Reisedauer in [53] variierte zwischen 0,13 und 13,8 Stunden mit einem Mittelwert von 2,1 Stunden (Standardabweichung von 1,8). Die Assoziation zwischen der SARS-CoV-2-Infektionsrate und der Reisedauer mit einem Indexpatienten folgte einer quadratischen Beziehung, und die Stärke der Assoziation war grösser, wenn die gemeinsame Reisezeit mit einem Indexpatienten über 4 Stunden hinausging. Die Ansteckungsrate nahm durchschnittlich mit 0,15 % ($p = 0,005$) pro Reisedauer von einer Stunde zu. Für unmittelbare Sitznachbarn nahm das Ansteckungsrisiko um 1,3 % pro einer Stunde Reisedauer zu und war damit fast 10-mal so hoch im Vergleich zum Durchschnitt aller Reisenden. Bei jenen Reisenden, die die gleichen Abfahrts- und Zielbahnhöfe wie die Indexpatienten hatten, war die durchschnittliche Infektionsrate signifikant erhöht im Vergleich mit den anderen Passagieren. Inwieweit dies auf Expositionen in Bahnhöfen und/oder auf das Infektionsgeschehen in den Start- und Zielkommunen zurückzuführen ist, wird in der Publikation nicht diskutiert. Interessanterweise ergab die Studie auch, dass die Infektionsrate mit SARS-CoV-2 unter den Zugfahrgästen, die die zuvor von den Indexpatienten belegten Sitze benutzten, keinen signifikanten Unterschied zur durchschnittlichen Infektionsrate aufwies. Das spricht gegen Schmierinfektionen als ein wichtiger Übertragungsweg bei Bahnreisen.

Mehrere Studien, die retrospektiv das Infektionsumfeld von SARS-CoV-2-Infizierten eruierten, zeigen, dass Reisen mit Bahn und Bus auch von Bedeutung sind, aber die Infektionsrisiken um Größenordnungen geringer ausfallen als durch Kontakte im häuslichen Umfeld und mit gewissen Einschränkungen auch durch Besuche von Restaurants und Cafés (und Fitnesscentern). Die nachweisbaren Ansteckungsrisiken in Bahn und Bus, wenn infizierte Personen in der Nähe mitreisen, ist intuitiv und nicht verwunderlich. Interessant ist dabei allerdings anzumerken, dass sich das Ansteckungsrisiko nicht auf die unmittelbaren Sitznachbarn beschränkt. Insofern hat die allgemeine Empfehlung von Kontaktbeschränkungen und die allgemeine Empfehlung zu Reiseeinschränkungen zur Senkung des Ansteckungsrisikos mit SARS-CoV2 selbstverständlich auch für Reisen mit Bahn und Bus ihre Berechtigung. Es ist dabei aber auch zu berücksichtigen, dass keine einzige Studie bislang gezeigt hat, dass das Infektionsrisiko während Reisen mit Bahn und Bus höher ist als ein vergleichbarer Aufenthalt in anderen Umgebungen. Im Gegenteil, mehrere Studien und darunter auch die Darstellung des Infektionsumfeldes von SARS-CoV-2-Infektionen des RKI haben konsistent darauf hingewiesen, dass andere Infektionsumfelder wie Wohnstätten jeglicher Art, medizinische oder pflegerische Behandlungseinrichtungen und bestimmte Arbeitsplätze mit intensiven Personenkontakten ein höheres Infektionsrisiko haben im Vergleich zu Reisen mit Bus und Bahn. Auch die Studie von [162] zu branchenbezogenen Vergleichen von COVID-19-Fällen bei einem großen deutschen Versicherer weist die höchsten Ansteckungsrisiken für Beschäftigte mit Patientenkontakt und in der Pflege älterer Menschen hin, aber nur gering und nicht signifikant erhöht für Personal im Nahverkehr und Fern-Bahnverkehr.

Trotz aller Unterschiede zwischen Reisen mit Bahn und Bus in China und Deutschland besteht kein grundsätzlicher Zweifel daran, dass die berichteten Ergebnisse aus China in qualitativer Hinsicht auch auf Deutschland zu übertragen sind. Entscheidend für das Infektionsrisiko ist dabei die aktuelle Infektionsrate in der Allgemeinbevölkerung. Wenn diese hoch ist, wie in der ersten Welle der Pandemie in China, ergibt sich auch ein gewisses Risiko bei Reisen mit öffentlichen Transportmitteln. Bei strikter Identifizierung von infizierten Personen, der strikten Quarantäne und konsequentem Tragen von MNS sinkt das Risiko, sich während Reisen mit Bahn und Bus mit SARS-CoV-2 anzustecken.

Ein umfängliches Nachverfolgen (auch ohne explizites Einverständnis der betroffenen Personen) von infizierten Personen und der unmittelbaren Kontaktpersonen während und Tage nach der Reise ist eine Voraussetzung für belastbare Ergebnisse und im Gegensatz zu China in anderen Ländern wegen Datenschutzerfordernissen schlicht nicht möglich. Hinzu kommt, dass sich alle Reisenden in den Hochgeschwindigkeitszügen Chinas vorab registrieren müssen. Ähnliche Daten werden in anderen Ländern weder erhoben

noch gespeichert. Insofern ist die Datenlage in China weltweit einzigartig und erlaubt es, valide Studien zum Infektionsrisiko während Fernreisen mit Bus und Bahn durchzuführen. Eine zweite Frage ist, warum es keine Studien zu dem Infektionsrisiko bei Nutzung des ÖPNV gibt. Dies hat auch etwas mit der fehlenden Registrierung der Fahrgäste bei Nutzung des ÖPNV zu tun. Insofern wird es dazu auch zukünftig kaum Beobachtungsstudien in Europa bzw. Deutschland geben.

Wegen dieser fehlenden Beobachtungsdaten wird man das Infektionsrisiko bei Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs auf der Grundlage des Luftaustausches im Fahrgastinnenraum, der Reisedauer, des Abstandes zu anderen Fahrgästen und letztendlich der Fahrgastdichte nur modellhaft abschätzen können.

Generelle Risikoeinschätzung

Das Robert Koch-Institut schätzt „die Gefährdung für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland insgesamt als sehr hoch ein [163]. Diese Einschätzung kann sich kurzfristig durch neue Erkenntnisse ändern.“ Die Bewertung des RKI ist eine umweltmedizinische Risikoeinschätzung. Damit wird das Risiko der Allgemeinheit (vom Säugling bis zum Greis) bewertet, an COVID-19 aufgrund der Virusinfektion mit SARS-CoV-2 zu erkranken. Es geht also um das Risiko der gesamten Bevölkerung, sich in Alltagssituationen wie der Freizeit, in der Arbeit, beim Einkaufen oder eben auch bei der Fahrt mit dem ÖV anzustecken.

Die spezifische Beurteilung des Risikos einer Ansteckung während der Arbeit erfolgt hingegen durch arbeitsmedizinische Risikoeinschätzungen. So ordnete z. B. der Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) das SARS-CoV-2-Virus der Risikostufe 3 zu, gemäß den Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA 462) [164].

Die Biostoffverordnung definiert in § 3 Biostoffe der Risikogruppe 3 wie folgt: „Biostoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Beschäftigte darstellen können; die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung kann bestehen“ [165]. Die Autoren betonen in ihrer Einschätzung des Weiteren „Normalerweise ist eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung möglich.“

Beispielhafte Gefährdungseinstufung

In einer Studie von Pfenninger et al. [166] wird eine Gefährdungseinstufung durchgeführt, die sich auf Literaturquellen, Praxiserfahrungen und Untersuchungen der Autoren, nationalen Verordnungen und arbeitsmedizinische Richtlinien sowie Infektionszahlen stützt. Das Ziel der Studie von Sommer 2020 war es, das Infektions- und Erkrankungsrisiko für medizinisches Personal zu bewerten. Dabei wurde sowohl ungeschütztes als auch mit persönlicher Schutzausrüstung (PSA) ausgestattetes medizinisches Personal betrachtet.

Um das Ergebnis darzustellen, wurde in eine Risikomatrix erstellt, siehe Abbildung 3 adaptiert nach Nohl [167]. Aufgetragen ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für medizinisches Personal, an COVID-19 zu erkranken, unter korrekter Verwendung geeigneter persönlicher Schutzausrüstung gegenüber den möglichen Gesundheitsfolgen.

Schadensschwere Eintrittswahrscheinlichkeit	Keine gesundheitlichen Folgen	Bagatellfolgen	Mäßig schwere Folgen	Schwere Folgen
	Fast unmöglich	Extrem gering	Extrem gering	Sehr gering
Vorstellbar, aber unwahrscheinlich	Extrem gering	Sehr gering	Eher gering	mittel
Gelegentlich möglich	Sehr gering	Eher gering	mittel	hoch
Möglich	Sehr Gering	mittel	hoch	Sehr hoch
Fast gewiss	Sehr gering	mittel	Sehr hoch	Extrem hoch

Abbildung 3: Risikomatrix. Legende Risikoeinstufung: rot - hohes Risiko, gelb - mittleres Risiko, grün - geringes Risiko [167].

Das Infektionsrisiko für die ungeschützte Gesamtbevölkerung, an COVID-19 zu erkranken, wurde zum Zeitpunkt der Studie vom RKI damals nur mit „hoch“ eingestuft.

Die Studie von Pfenninger beschreibt, dass das tatsächliche Risiko einer Infektionsmöglichkeit für Klinikpersonal (außer- und innerklinisch) trotz hoher Patientenkontakte und Kontaktzeiten im Sommer 2020 in etwa dem Risiko der Gesamtbevölkerung entspricht. Besonders bemerkenswert ist, dass die Infektionsrate des medizinischen Personals verglichen mit der Allgemeinbevölkerung in Deutschland deutlich niedriger als in anderen Ländern ist [168]. Die Mortalitätsrate des medizinischen Personals beträgt in Deutschland nur einen Bruchteil der Mortalitätsrate der Gesamtbevölkerung. „Dies ist spekulativ vor allem der Aussetzung einer geringeren Viruslast durch die sachgerechte Verwendung Persönlicher Schutzausrüstung (PSA) zu verdanken.“ Alles in allem kamen die Autoren deshalb zur Bewertung, dass die Gefahr für Klinikpersonal nur mit „mittel“ im Vergleich zur Gesamtbevölkerung einzuschätzen wäre.

Schlussfolgerung für Gefährdungseinstufung im ÖV

Durch die Literaturrecherche konnten keine Studien identifiziert werden, die explizit eine Gefährdungseinstufung für Nutzer von öffentlicher Verkehrsmitteln vergleichbar dem für das oben dargestellte Klinikpersonal ermittelt. Es kann auf der Basis der Literaturrecherche an dieser Stelle nur gemutmaßt werden, welche Einstufung der Gefährdung bei der Nutzung von öffentlicher Verkehrsmitteln korrekt ist: „sehr hoch“, eher „hoch“ oder gar „mittel“.

Zum einen lassen sich die Risikoeinschätzungen für Arbeitsplätze nicht eins zu eins auf die Normalbevölkerung übertragen, da in derartigen Risikoeinschätzungen z. B. vulnerable Gruppen nicht berücksichtigt werden müssen. Zudem unterscheiden sich die Grenzwerte für Konzentrationen von Gefahrstoffen an Arbeitsplätzen von den Gefährdungsbeurteilungen der Umweltmedizin. So kann man z. B. die Gefährdungseinstufungen an einer konkreten Arbeitsstätte wie z. B. für Zugbegleiter nicht direkt vergleichen mit der Einschätzung für die Gesamtbevölkerung oder von Fahrgästen, die ein öffentliches Verkehrsmittel nutzen.

Der Fahrgast sitzt möglicherweise sehr lange neben einem SARS CoV-2 Emitter, während der Zugbegleiter in der Regel nur kurz die Fahrkarte eines Emitters kontrolliert und dann weitergeht.

Risikoreduzierend für den ÖV wirkt zwar, dass die Nutzung des ÖV insgesamt stark zurückgegangen ist. Daraus ergibt sich für die verbleibenden Fahrgäste eine insgesamt geringere Wahrscheinlichkeit, dass sich ein potentiell infektiöser Fahrgast im jeweiligen Verkehrsmittel befindet. Wie hoch die Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu anderen Bereichen des allgemeinen (derzeit erlaubten) Lebens aber genau ist, ist derzeit unbekannt.

Dazu kommt, dass seit dem Beginn dieser Untersuchung die Verwendung von MNS obligatorisch ist. In Bayern besteht seit dem 18.01.2021 die Verwendungspflicht von FFP2 Masken im ÖV. Es ergeben sich also Unterschiede im Vergleich zu anderen Bundesländern.

Eine Gefährdungseinstufung ist somit lediglich nur qualitativ und im Analogieschluss möglich: Die konsequente und insbesondere korrekte Verwendung des MNS im ÖV spricht dafür, dass eine Reduktion der Gefährdungseinstufung plausibel ist. Da jedoch auch andere, risikohöhen Effekte wie Bioaerosol-Bildung in Innenräumen von Verkehrsmitteln die Risikoeinstufung ungünstig beeinflussen, müsste man diese Effekte in ihrer Größe kennen oder durch Beobachtungsstudien ermitteln. Studien, die die Größe dieser Effekte im Detail untersuchen, liegen jedoch noch nicht vor. Ohne diese Untersuchungen kann eine Gefährdungseinstufung auf der Basis der Literaturlauswertung also nicht oder nur dem allgemeinen Risiko, laut RKI mit „sehr hoch“ abgeschätzt werden.

Limitationen

Die SARS-CoV-2-Pandemie ist in Deutschland und weltweit ein sehr dynamisches Geschehen, siehe dazu die täglichen RKI-Lageberichte. Auch wenn fortlaufend neue Forschungsergebnisse publiziert werden, bestehen bisher immer noch ungenügende Erkenntnisse zu vielen Details. Damit handelt es sich bei der hier dargestellten Einschätzung und den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen um eine Status-quo-Darstellung von Oktober bis Ende Dezember 2020.

Kategorisierung identifizierter Risikofaktoren

Tabelle 5 stellt zusammenfassend die in Abschnitt 3.1 identifizierten Gefahrenquellen und Haupteinflussfaktoren auf die Ausbreitung bzw. -ansteckung bezüglich SARS-CoV-2 im ÖV dar und leitet mögliche Schutzmaßnahmen ab, welche in Abschnitt 3.2 als Ergebnis der Recherche erhoben wurden. Für den weiteren Verlauf des Projekts ist es von Bedeutung, die Einflussgrößen und Risikofaktoren zu verstehen, um diese in Arbeitspaket 2 entsprechend in der Modellbildung berücksichtigen zu können (siehe Kapitel 5). Hierbei müssen jedoch die Grenzen des gewählten Modellierungsansatzes berücksichtigt werden. Eine Beschreibung des Modellierungsansatzes ist dem Zwischenbericht für Arbeitspaket 2 zu entnehmen.

TABELLE 5: RISIKOFAKTOREN UND ABGELEITETE MASSNAHMEN

Nr.	Risikofaktoren im ÖV	Beschreibung	Abgeleitete Schutzmaßnahmen
1	Aufenthaltsdauer im Fahrzeug	Längere Aufenthaltsdauer erhöht das Infektionsrisiko	Vermeidung langer Aufenthaltsdauern
2	Belegungsdichte im Fahrzeug	Höhere Belegung erhöht das Infektionsrisiko	Demontage Mobiliar Kapazitätsbegrenzung Reservierungspflicht (mit Einschränkung Sitzplätze) Fahrgastzählung/Auslastungsanzeige Vermeidung von Verkehrsspitzen Aufruf zur Vermeidung der ÖV-Nutzung
3	Belüftungssituation und -qualität im Fahrzeug	Geringe Luftwechselraten erhöhen das Infektionsrisiko. Einsatz von geeigneten Filtersystemen senkt das Infektionsrisiko. Ist die Infektionsquelle in der Nähe des Luftaustlasses, sinkt das Infektionsrisiko. Verdrängungslüftung senkt begrenzt wirksamer das Infektionsrisiko als andere Lüftungsarten.	Erhöhung Frischluftanteil über HLK (falls möglich Öffnen von Fenstern) Einsatz von HEPA-Filtersystemen bei Rezirkulation (mind. MERV-13) Kontrolle von Temperatur und relativer Feuchtigkeit UV-C-Inaktivierung (in Raumlufttechnik integriert) Regelungstechnische Anpassung CO ₂ -geführter Lüftungsanlagen
4	Berührungshäufigkeit kontaminierter Flächen	Häufige Berührung erhöht das Infektionsrisiko.	UV-C-Inaktivierung (durch Bestrahlung von Oberflächen) Desinfektionsmittelspender Berührungslose Bedienung technischer Einrichtungen Photokatalytische Beschichtung von Oberflächen Automatisches Öffnen und Schließen der Fahrgasttüren Bargeldloses Ticketing Halt an jeder Station Zusätzliche Reinigung
5	Verhaltensabhängige Rate der Virenemission	Lautes Sprechen und hohe Atemfrequenz erhöhen das Infektionsrisiko.	Einschränkung der Kommunikation Informationsangebote zum Selbstschutz und Schutz anderer Passagiere

Nr.	Risikofaktoren im ÖV	Beschreibung	Abgeleitete Schutzmaßnahmen
	(z. B. Sprechverhalten und Tragen eines MNS)	Korrekte Nutzung und höheres Schutzniveau von MNS verringern das Infektionsrisiko.	Sanktionierung bei Regelverletzung Bereitstellen von MNS mit ausreichender Schutzwirkung
6	Verhaltensabhängige Rate der Virenaufnahme (durch Einatmen, ins Gesicht fassen)	Höhere Aktivitätslevel erhöhen das Infektionsrisiko. Häufiges Fassen ins Gesicht erhöht das Infektionsrisiko.	Informationsangebote zum Selbstschutz und Schutz anderer Passagiere Verhaltensregeln im ÖV festlegen
7	Umweltfaktoren (Temperatur, relative Feuchte (RF), UV, Feinstaub)	UV-Strahlung, höhere Lufttemperaturen (> 22 °C) und höhere relative Luftfeuchte (50 % bis 60 %, nicht unter 40 %) sowie generell schadstoffärmere Luft verringern das Infektionsrisiko	Anpassung der HLK (Anlagenregelung) soweit möglich (Problem mit Luftfeuchte/Kondensat) Einsatz von Filtersystemen zur Reinigung der Zuluft von außen
8	Regelkonformität der Passagiere (bzgl. AHA, Quarantäne)	Einhalten der AHA-Regeln verringert das Infektionsrisiko [163].	Absperrung Fahrerraum mit Absperrband/voll abschließender Schutzfolie Stationäre Barrieren Social Distancing durch Videoüberwachung Markierungen/Leitsysteme Fiebermessung bei Fahrgästen Schulung des Personals Protokollierung von Verdachtsfällen
9	Mobilitätsverhalten der Bevölkerung	Einschränkung des Mobilitäts-/Reiseverhaltens senkt das Infektionsrisiko	Einstellung oder Reduktion des ÖV-Angebots Aufruf zur Vermeidung der ÖV-Nutzung
10	Aktuelle Infektionsrate in der Allgemeinbevölkerung	Eine hohe Inzidenz erhöht das Infektionsrisiko.	Infektionsschutzmaßnahmen von Bund und Ländern

5 Eingangsparameter für Modellbildung

Dieses Kapitel bezieht sich auf die in Arbeitspaket 2 (AP 2) „Ausbreitungsmodellierung und Risikobewertung“ durchgeführten Modellierung von ausgewählten Szenarien, die als Grundlage für eine Risikobewertung dienen. Zur Analyse der Szenarien werden zonale Simulationsmodelle entwickelt. Die zonale Modellierung unterteilt den Raum in typischerweise 100–500 Zonen, die miteinander im Luftaustausch stehen. Quellen und Senken in Form von Luftein- und -auslässen, Fenstern, Türöffnungen bestimmen den Gesamluftaustausch des betrachteten Raumes. Menschen werden als Wärme-, Feuchte-, CO₂- und Aerosolquellen in das Modell integriert. Durch diesen Modellierungsansatz wird die lokale Aerosolkonzentration berechnet, die ein potentiell Infizierter verursacht. Zu beachten ist, dass die „Aerosolquelle Mensch“ derzeit noch ein Forschungsgegenstand ist und somit nur nach aktuellem Stand der Forschung implementiert werden kann. Eine detaillierte Beschreibung des Modellierungsansatzes ist Teil C (Arbeitspaket 2) zu entnehmen. Die folgenden Absätze führen die Eingangsparameter für die Szenarien und die Modellbildung ein. Die konkrete Bestimmung der Eingangsgrößen und der Wertebereiche für die modellbasierte Parameterstudie ist Teil von Arbeitspaket 2.

Allgemeine Modellannahmen

Generell zeigen die Ergebnisse der Literaturstudie, dass es ein Ansteckungsrisiko im ÖV gibt. Es gibt hinreichende Belege dafür, dass die Übertragung durch Partikel stattfindet, in denen SARS-CoV-2-Viren über einen längeren Zeitraum infektiös bleiben. Auch im ÖV gilt als Hauptübertragungsweg die respiratorische Aufnahme von Partikel (Tröpfchen/Aerosole), welche mit SARS-CoV-2-Viren beladen sind. Diese Partikel entstehen, wenn infizierte Personen husten, niesen, sprechen und sogar beim Atmen [169]. Während die im Verhältnis größeren Partikel rasch zu Boden sinken, können die kleineren Aerosolpartikel auch über längere Zeit in der Luft verbleiben und vor allem in geschlossenen Räumen kritische Konzentrationen erreichen. Es ist bekannt, dass durch korrekte Nutzung von MNS das Risiko reduziert wird, im unmittelbaren Umfeld eine weitere Person zu infizieren [170].

Entscheidend für das Risiko ist, ob sich die Passagiere über einen längeren Zeitraum mit einer infektiösen Person in einem geschlossenen Raum aufhalten, wie zum Beispiel im Fernverkehr. Als wichtigster Faktor spielt hier die Belüftungssituation und die eingesetzte Lufttechnik eine Rolle, denn die potentiell von einem Infizierten in die Luft abgegebenen virenhaltigen Partikel sollten möglichst rasch durch die Lüftung abgeführt, durch Reinigungssysteme abgeschieden oder inaktiviert, oder zumindest durch entsprechende Frischluftstraten in ihrer Konzentration verdünnt werden. Ansonsten besteht die Gefahr einer Übertragung durch Aerosole auch über eine größere Distanz als 1,5 m, insbesondere dann, wenn eine infektiöse Person besonders viele infektiöse Partikel abgibt (durch lautes Sprechen oder Lachen). Wenn diese virenhaltigen Aerosole über einen längeren Zeitraum in die Atemluft eingebracht werden, sich verteilen und über die Zeit anreichern, ist ein Mindestabstand ggf. nicht mehr als ausreichende Infektionsprävention anzusehen. Laut [4] kommen Übertragungen im Außenbereich selten vor, was bedeutet, dass hier der Mindestabstand zwischen den Personen als ausreichender Schutz angesehen werden kann.

Dahingegen sind Infektionen über kontaminierte Oberflächen im ÖV noch nicht durch wissenschaftliche Untersuchungen belegt. Es gibt sogar Hinweise, dass Passagiere, die denselben Platz benutzt haben wie zuvor ein nachweislicher Indexpatient, kein erhöhtes Infektionsrisiko aufweisen. Die Übertragung durch keimbelastete Oberflächen scheint zumindest im Zugverkehr einen geringen Beitrag zum Infektionsgeschehen zu haben [143]. Letztlich lässt sich dieser Übertragungsweg jedoch schwer nachvollziehen und ist durch viele Einflussfaktoren bedingt. Eine Übertragung durch kontaminierte Oberflächen ist insbesondere in der unmittelbaren Umgebung der infektiösen Person nicht auszuschließen. Für diesen Übertragungsweg sollten die allgemein empfohlenen Hygieneregeln (d. h. regelmäßiges Händewaschen und Fernhalten der Hände aus dem Gesicht) ein geeignetes Maß an zusätzlichem Schutz bieten.

Eine weitere Grundlage für die Modellbildung und vor allem für die Simulation des Aerosolverhaltens in geschlossenen Räumen ist, dass sich Aerosolpartikel in den betrachteten Größenmaßstäben ähnlich verhalten wie ein Spurengas [171]. Dadurch ist es möglich, die räumliche und zeitliche Verteilung der Aerosolpartikel in den betrachteten Bereichen des ÖV zu simulieren, um vor allem die Einflussfaktoren „Aufenthaltsdauer“ und „Abstand“ für eine quantitative Risikobetrachtung in das Simulationsmodell aufzunehmen.

Ausgewählte Modellszenarien

Für die Entwicklung der ausgewählten Szenarien ist es wichtig, insbesondere Kenntnis zu den folgenden Punkten zu haben:

- (1) mittlere Verweildauer/Wartezeiten an Stationen von Bahn und Bus,
- (2) mittlere Auslastung an Haltestellen für Busnahverkehr sowie Stadt- und Straßenbahn,
- (3) mittlere Auslastung an Haltestellen/Terminals für den Busfernverkehr,
- (4) mittlere Auslastung an Bahnsteigen im Schienenverkehr der EBO,
- (5) mittlere Verweildauer in ÖV-Fahrzeugen,
- (6) mittlere Auslastung in ÖV-Fahrzeugen,
- (7) Fahr- und Haltezeiten,
- (8) Ein- und Ausstiegsverhalten (Fahrgastlenkung) an Stationen.

Für (1) wurden insgesamt 3 Quellen mit Angaben zu den Verweildauern identifiziert [172], [173], [174], welche aus unterschiedlichen zeitlichen Perioden stammen. Für die weitere Arbeit im AP 2 wird anhand der Literaturquellen für den Schienenpersonenfernverkehr eine mittlere Wartezeit von 16,7 Minuten vorgeschlagen. Für den allgemeinen Nahverkehr wird eine Wartezeit (Verweildauer), welche der halben Kursfolgezeit bis zu einem maximalen Schwell-/Grenzwert von 7,5 Minuten entspricht, vorgeschlagen.

Bezüglich der mittleren Auslastung an Haltestellen (2) konnten keine öffentlich zugänglichen Quellen ermittelt werden. Grundsätzlich gilt die Vorgabe, dass die Abmaße der Haltestellen an den zu erwartenden Verkehrsstrom anzupassen sind [175], [176]. Anhand der gesetzlichen Vorgaben aus der BOStrab [175] und BOKraft [177] und weiteren Literaturquellen mit Gestaltungsempfehlungen [176], [170] wurden die Minimalabmaße hinsichtlich der Breite recherchiert. Der Ansatz für die weitere Bearbeitung im Arbeitspaket 2 „Simulationen“ sieht vor, dass bestimmte Szenarien entworfen werden müssen. Für diese Szenarien müssen jedoch noch weitere Daten erhoben und ausgewertet werden. Hinsichtlich der notwendigen Buslänge für die Bestimmung der Haltestellen-Mindestgeometrie werden die nach EU-Recht [178] drei gültigen Buslängen:

- 2-achsiger Kraftomnibus, 13,5 m Länge,
- Kraftomnibus mit mehr als 2 Achsen, 15 m Länge,
- Gelenkbus, 18,75 m Länge

als Grundlage verwendet. Eine statistische Auswertung aller beim Kraftfahrtbundesamt gemeldeten Busse mit Unterteilung in Reisebusse, Fernbusse, Busse für den Nah- und Regionalverkehr ist nicht möglich, da es die öffentlich zugängliche Datenlage diesbezüglich nicht zulässt.

Für die typischen Straßenbahnhaltestellen ist eine deutschlandweite statistische Auswertung zur Ermittlung des am häufigsten verkehrenden Straßenbahntyps durchgeführt worden. Hierbei zeigte sich die Längenkategorie 30 m, sowie eine 2+1 Bestuhlung als am häufigsten in Deutschland vorkommend. Anhand dieser Daten können im AP2 Haltestellenszenarien erstellt werden und die Auslastungsgrade über ebenfalls unterschiedliche Szenarien für die Simulationsrechnungen vorgegeben werden. Die Mindestbreiten werden der BOStrab [175] entnommen.

Die Recherchen (3) für die Auslastung der Haltestellen/Terminals für den Busfernverkehr haben die gleichen Wissenslücken wie für (2) hervorgebracht. Es ist möglich gewesen, anhand einer Empfehlung für die

Gestaltung von Fernbusterminals [179] eine Mindestgeometrie zu bestimmen, diese ist jedoch nicht zwingend vorgegeben. Daher wird diesbezüglich ebenfalls eine Szenario-basierte Vorgehensweise für das AP 2 vorgeschlagen.

Die Recherchen (4) zur Auslastung der Bahnsteige im Vollbahnbereich (EBO) haben zunächst keine Kennzahlen ergeben. Es hatte sich weitergehend gezeigt, dass eine enorm hohe Anzahl an unterschiedlichen Bahnsteiglängen in Deutschland existiert [180]. Gleichzeitig ist die Bandbreite und Abweichung zum Mittelwert hoch und die einzelnen Bahnsteiglängen weichen häufig von den Normlängen ab [181]. Bezüglich der Bahnsteigbreiten existieren keine gesetzlichen Mindestvorgaben in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [182]. Minimalvorgaben und die Aufforderung, die Breite an den zu erwartenden Verkehrsstrom anzupassen, befinden sich jedoch in einer Richtlinie der Deutschen Bahn [181]. Daher lautet die Empfehlung für die weitere Bearbeitung in AP 2, die geometrischen Abmaße eines realen Bahnhofes (Hauptbahnhof einer deutschen Großstadt/Metropole) zu verwenden. Bezüglich der zu erwartenden Ein- und Aussteiger je Doppelbahnsteig konnten Zahlenangaben zum Bauprojekt Stuttgart 21 (empirisch ermittelt und analytisch hochgerechnet) recherchiert werden [183].

Die Recherchen (5) zu den Verweildauern in Fahrzeugen des ÖV ergaben keine Quellen mit Zeitangaben. Es konnten jedoch sogenannte mittlere Reiseweiten für verschiedene Fahrzeuggattungen ermittelt werden [184], [185]. Zugleich zeigt der Abgleich der unterschiedlichen Quellen keine annähernde Übereinstimmung der jeweiligen Kennwerte. Für die weitere Bearbeitung im AP 2 ist es daher vermutlich zielführender, mit bestimmten Szenarien zu arbeiten, anstatt mit unterschiedlichen mittleren Reiseweiten, welche jedoch keine Angaben zur Reisedauer wiedergeben.

Die Recherchen (6) zur Auslastung in Fahrzeugen des ÖV haben nur Quellen mit allgemeinen Angaben hervorgebracht. Es konnten öffentlich zugängliche Quellen mit allgemeinen Auslastungsgraden identifiziert werden, jedoch nur wenige mit zeitbezogenen (z. B. Rush-Hour, Wochentag) oder linienbezogenen Angaben. Gleichzeitig ist die Quellenlage jedoch sehr gering. Auf diese Weise ist es zum Beispiel nicht möglich zu erfahren, welchen Auslastungsgraden sich insbesondere Berufspendler am Morgen im Berufsverkehr aussetzen. Ebenfalls ist ein Vergleich zwischen Nutzern in Ballungsräumen, Kleinstädten oder auf dem Land bzw. unterschiedlicher Linien und Fahrzeuge innerhalb eines Netzes nicht möglich, da die geringe Quellenlage diesbezüglich nicht hilfreich gewesen ist. Daher müssen für die weitere Bearbeitung im AP 2 anhand der technischen Daten zu den Fahrzeugen verschiedene Fallszenarien mit unterschiedlichen Besetzungsgraden auf Basis der vorhandenen geringen Anzahl an validen Quellen und Studien erstellt werden.

Die Recherche (7) zur Thematik der Fahr- und Haltezeiten hat ergeben, dass auf Basis von öffentlich einsehbaren Fahrplänen die entsprechenden Kennzahlen bestimmt werden müssen. Hierzu werden für die Simulationen im zweiten Arbeitspaket die Fahrpläne der Verkehrsmittel

- Regionalexpress,
- Regionalbahn,
- U-Bahn,
- S-Bahn,
- Straßenbahn,
- Stadtbus

analysiert, statistisch ausgewertet und für die weitere Bearbeitung ein Mittelwert gebildet. Für die statistische Auswertung werden die Fahrpläne von 9 Regionalexpress-Linien aus ganz Deutschland, 8 Regionalbahn-Linien aus ganz Deutschland, je 3 S-Bahn-Linien aus Berlin, Hamburg, München, alle U-Bahn-Linien aus München, alle Straßenbahn-Linien aus München und 10 zufällige Bus-Linien aus München ausgewer-

tet. Da auf Grund der Wagenkastenstruktur und des grundsätzlichen Reiseprinzips vor allem die genannten Fahrzeuge mit ihren Haltezeiten und demzufolge Türöffnungszeiten für die Simulationen relevant sind, werden der Fernverkehrszug und Fernverkehrsbus an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Die Recherche (8) zum Ein- und Ausstiegsverhalten (Fahrgastlenkung) an Stationen konnte keine Quellen mit einem Vergleich zwischen der Zeit vor der Pandemie und während der Pandemie ermitteln. Die Quellenlage hat den Anschein erweckt, dass außer der Anbringung von zusätzlichen Markierungen und Ab-sperrungen zur Einhaltung der Abstandspflicht keine zusätzlichen Maßnahmen zur Lenkung der Fahrgastströme getroffen wurden (z. B. [138]). Zwar gab es in der Vergangenheit mindestens ein umfangreicheres Projekt zur dynamischen Fahrgastlenkung [186] diesbezüglich und die Hamburger Hochbahn hat im Zuge der Pandemie an 2 Stationen mit einem entsprechenden Pilotprojekt zur Fahrgastlenkung über Markierungen und Pfeile begonnen [139], Ergebnisse sind jedoch nicht bekannt. Zusätzlich wurde in 2020 anscheinend erstmals ein Patent zur dynamischen Fahrgastlenkung unter Berücksichtigung der Auslastungsgrade in Fahrzeugen eingereicht [187]. Diese Punkte lassen die Vermutung zu, dass die Fahrgastlenkung und insbesondere die dynamische auslastungsgradbezogene Fahrgastlenkung bisher nicht im großen Fokus gelegen hat und erst durch die Pandemie an Bedeutung gewann.

Insgesamt lässt sich anhand der Recherche feststellen, dass zu vielen Punkten keine Angaben in Form von öffentlich zugänglicher Literatur ermittelt werden konnten. Diese Wissenslücke kann jedoch für die weitere Bearbeitung in AP 2 durch die Erstellung von datenbasierten Fallszenarien umgangen werden und es können vermutlich am Ende lediglich vergleichende Aussagen getroffen werden.

Eingangsparameter für die Ausbreitungsmodelle

Für die Modellierung der unterschiedlichen Aufenthaltsbereiche im ÖV wird die Geometrie der beispielhaft gewählten Fahrzeugtypen benötigt (Fernzug, Regionalzug, S-Bahn, U-Bahn, Fernbus, Stadtbus, Straßenbahn), sowie die Abmaße von beispielhaften Haltestationen und Bahnhöfen (sowohl oberirdisch als auch unterirdisch). Die geometrischen Parameter umfassen neben den Sitz- und Stehplätzen, auch Lüftungsöffnungen, Türen und ggf. Trennwände.

Um die Belüftungssituation im Fahrzeug modellieren zu können, werden die folgenden Eingangsdaten benötigt:

- Frischluftmengen
- Umluftmengen
- Filtereffizienz
- Außenluftführung (ggf. bedarfsgeführt)
- Lüftungsform (Heizen/Kühlen)
- Türöffnung
- Fahrzeit

Als wesentlicher Einflussfaktor für das Infektionsrisiko in den betrachteten Bereichen gelten auch die Menschen. Zu den Eingangsparametern zählen hierbei für das Modell:

- Verwendung und Schutzniveau von Mund-Nasen-Schutz
- Abstand zwischen den Personen in Abhängigkeit von der Belegungsdichte
- Verhaltensabhängige Partikelemission durch einen Infizierten

6 Wissens- und Informationslücken

Die im Zuge der internationalen Recherche identifizierten Informationslücken werden in Tabelle 6 dokumentiert und hinsichtlich ihres Aufarbeitungs-/Aussagepotentials bewertet. Die erste Spalte verweist auf das Themenfeld laut der Auflistung in Kapitel 2.

TABELLE 6: IDENTIFIZIERTE INFORMATIONSLÜCKEN

TF.	Beschreibung	Potential	Empfehlung
1	Fehlende Beobachtungsdaten bei Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs auf der Grundlage des Luftaustausches im Fahrgastinnenraum, der Reisedauer, des Abstandes zu anderen Fahrgästen und letztendlich der Fahrgastdichte	Modellhafte Abschätzung des Infektionsrisikos	Wells-Riley-Ansatz zur Risikoinschätzung in Kombination mit einem kalibrierten physikalischen Simulationsmodell des Fahrzeuginnenraum
4	Eine Frischluftzufuhr allein hilft zwar, die Viruslast zu senken, die einhergehende Lufttrocknung beim Aufheizvorgang erhöht aber die Empfänglichkeit für eine Virusaufnahme beim Menschen.	Wie genau die entsprechenden Raumklimaparameter auch in öffentlichen Verkehrsmitteln gesichert erreicht werden können, ist eine Frage, die den Ansatz für weitere Untersuchungen bildet.	Dynamisches Modell zur Simulation der Raumklimaparameter bei veränderlichen Betriebszuständen (z. B. Beginn bis Ende des Fahrzeugbetriebs)
5	In öffentlichen Verkehrsmitteln werden unterschiedliche Lüftungssysteme eingesetzt. Die Raumluftrömung ist jedoch entscheidend für den Transport und die Verteilung von Partikeln im Raum. Die jeweilige Raumluftrömung im Fahrzeug im realen Betrieb ist schwer zu ermitteln.	Optimierung der Lüftungssituation in verschiedenen Fahrzeugtypen und Betriebszuständen des ÖV	Feldstudien zur Erfassung von infektiösen SARS-COV-2-Virionen in der realen Umgebung. Kalibrierung physikalischer Simulationsmodelle der Fahrzeuge mit den Messungen im Realbetrieb
6	Keine der in recherchierten Maßnahmen wurde in einer repräsentativen, quantitativen Untersuchung auf ihre Wirksamkeit zur Reduktion des Infektionsrisikos in Fahrzeugen des ÖV überprüft.	Aufgrund des Mangels an belastbaren, empirischen Studien bietet Abschnitt 3.2 einen ersten Überblick und eine Grundlage für weitergehende Forschung.	Fortführung der Literaturrecherchen auf diesem Gebiet, um neue Erkenntnisse rechtzeitig zu erfahren.
9a	Insgesamt fehlt, insbesondere für Deutschland und Europa, die	Insbesondere wäre die Identifikation spezifischer Prädiktoren (wie	Zur Erfassung und Förderung des Abstandhaltens und der Vermeidung von

TF.	Beschreibung	Potential	Empfehlung
	breite wissenschaftliche Grundlage (Beobachtungsstudien, Maßnahmenevaluationen) zur Beschreibung und Quantifizierung des pandemielevanten Verhaltens im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs, zu Verhaltensänderungen im Pandemieverlauf sowie zur Evaluation geeigneter Maßnahmen zur Förderung und dauerhaften Aufrechterhaltung des gewünschten Verhaltens.	möglicherweise die Reisedauer) regelkonformen Verhaltens im Kontext öffentlicher Verkehrsmittel zur Ableitung spezieller verhaltensbezogener Maßnahmen wichtig.	Crowding sollten die technischen Lösungsansätze zum Crowd Management weiterverfolgt und -entwickelt werden.
9b	Es fehlen weitere Studien zu Einstellungsänderungen Reisender und Pendler, möglicherweise entwickelter Reiseangst und Bewältigungsstrategien, insbesondere für Deutschland und Europa.	Ermöglicht Prognosen zum Reiseverhalten.	Fortführung der Literaturrecherchen auf diesem Gebiet, um neue Erkenntnisse rechtzeitig zu erfahren. Koordinierte, deutschlandweite Untersuchung von Fahrgastzahlen (etwa im Tagesverlauf), um daraus weitere Maßnahmen ableiten zu können.
10	Bezüglich der viralen Parameter zur UV-C-Inaktivierung werden in der Literatur divergierende Schlussfolgerungen beschrieben.	Fortschritte im Bereich der germiziden Licht-Technologie und große Menge an experimentell generierten Datensätzen	Beobachtung wissenschaftlicher Fortschritte und fortgeführte Literaturstudie zu viralen Parametern der UV-C-Inaktivierung.
11a	UV-Deckenluftsysteme bringen UV-Strahlung in den Überkopfbereich und inaktivieren mikrobiell belastete Aerosole in der Luft. Wie UV-Deckenluftsysteme oder andere Verfahren mit mobilen Luftbehandlungsgeräte in Bereichen des ÖV eingesetzt werden können, ist nicht bekannt.	UV-Deckenluftsysteme sind insbesondere geeignet für Raumsituationen, in denen hohe Luftwechselraten ansonsten nur schwer zu realisieren sind.	Dieser Ansatz muss für den Bereich ÖV aufgrund niedriger Raumhöhen in Zügen gesondert geprüft werden. In höheren Räumen von Bahnstationen kann er sich eignen.
11b	Beobachtet werden unterschiedliche Infektionsfähigkeit von SARS-CoV-2-Viren auf unterschiedlichen Oberflächen bei einer starken Temperaturabhängigkeit. Erforderliche Dosen UV-Strahlung als Funktion der Oberflächen wurden nicht gefunden.	Die Kenntnis zu Infektionsfähigkeit von Viren auf unterschiedlichen Oberflächen kann Implikationen für die Entkeimungszyklen haben.	Fortführung der Literaturrecherchen auf diesem Gebiet, um neue Erkenntnisse rechtzeitig zu erfahren.

TF.	Beschreibung	Potential	Empfehlung
11c	Durch UV-Strahlung versprühen Kunststoffe. Angaben in der Literatur hierzu divergieren.	Raumoberflächen sind bei den erforderlichen Dosen im Allgemeinen unempfindlich.	Empfohlen wird eine entsprechende Auswahl unempfindlicher Oberflächen oder Oberflächenbeschichtungen.
11d	Auf dem Gebiet der Raumlufttechnik in Kombination mit UV-C schreiten die Standardisierungsbemühungen voran. Aktuell fehlt Betreibern die Auskunft über geeignete Produkte zur Entkeimung mittels UV-C im Bereich des ÖV.	UV-C basierte Entkeimung und Desinfektion kann einen wichtigen Beitrag zum Infektionsschutz im ÖV leisten.	Fortführung der Recherchen auf diesem Gebiet, um Einsatzfähigkeit der UV-C-Technologien bewerten zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick Teil B

Grundsätzlich gilt für alle Bereiche des ÖV die Annahme, dass die Übertragung von SARS-CoV-2 durch drei Arten stattfindet. Durch den direkten Kontakt mit dem Virus durch eine infizierte Person oder indirekt, indem virusbelastete Tröpfchen von dieser Person abgegeben und sich in der näheren Umgebung auf Oberflächen absetzen. Des Weiteren kann SARS-CoV-2 durch luftgetragene Tröpfchen und Partikel (Aerosole) übertragen werden, die teils über längere Zeit in der Luft schweben und auf diese Weise größere Distanzen überwinden können.

Das infektiöse Potential der Virenpartikel hängt in allen genannten Fällen von einer Reihe von äußeren Bedingungen ab. Die Virenpartikel sind Umwelteinflüssen ausgesetzt und können außerhalb eines Wirtskörpers nur für einen gewissen Zeitraum aktiv bleiben.

Infektiöses SARS-CoV-2 konnte bis zu 3 Stunden in Aerosolen bei Raumtemperatur und 65 % relativer Luftfeuchte nachgewiesen werden, andere Studien sprechen sogar von bis zu 16 Stunden. Es wird dabei mit einer Halbwertszeit von 1,1 Stunden gerechnet.

Es gibt Hinweise, dass die Coronaviren auf Oberflächen bei mittlerer relativer Luftfeuchte (40-65 %) und kühlen bis mäßig-warmen Temperaturen länger stabil und damit infektiös bleiben können. Eine Studie ergab, dass SARS-CoV-2 bei 25 °C und relativer Luftfeuchte von 45 % bis 55 % durchschnittlich bis zu 9 Stunden auf menschlichen Hautpräparaten infektiös bleibt, was eine Voraussetzung für die Kontaktübertragung ist.

Für aerosolgebundene Viren zeigt sich, dass sie bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von unter 33 % und bei 100 % intakt bleiben, während bei Werten der relativen Feuchte zwischen 34 % und 99 % die Infektiosität des SARS-CoV-2 erheblich reduziert ist. Insbesondere ergibt sich bei relativen Luftfeuchtwerten um die 55 % bis 60 % eine deutlich geringere Infektionsfähigkeit der Viren. Die Begründung liegt im Verdunstungsvorgang der Tröpfchen, der maßgeblich durch die Luftfeuchte beeinflusst wird. Dabei erweist sich der sogenannte Anreicherungsfaktor als wichtige Größe. Bei niedriger relativer Luftfeuchte (< 43 %) steigt der Anreicherungsfaktor mit der Tröpfchenverdampfung schnell an, um nach vollständiger Austrocknung die Viruslast freizugeben. Die mittleren Werte der Luftfeuchte (55 %-60 %) erweisen sich also als entscheidend zur Reduzierung der Infektiosität der Viren im Aerosol, da die Konzentration der gelösten Stoffe deutlich ansteigt, aber das Tröpfchen nie vollständig verdunstet.

Als günstige Raumluftbedingungen, bei denen die Übertragung von SARS-CoV-2 reduziert ist, gelten Lufttemperaturen oberhalb von 22 °C und relative Luftfeuchtigkeit zwischen 50 % und 60 %, wobei eine relative Luftfeuchte von 40 % möglichst nicht unterschritten werden sollte, da bei diesen Werten wiederum beim Menschen die Anfälligkeit für virale Atemwegsinfektionen steigt.

Da SARS-CoV-2 über Kontaktflächen übertragen wird und dort lange infektiös bleiben kann, ist neben der geeigneten Belüftung und der Vermeidung von Tröpfchenübertragung die systematische Inaktivierung von Viren auf Oberflächen eine bedeutende Maßnahme. Diese Reinigung der Flächen kann sowohl mit chemischen Mittel erfolgen, als auch mit UV-Strahlung (Ultraviolet Germicidal Irradiation). Generell ist die Methode mittels UV-C-Bestrahlung chemikalienfrei und es kommt zu keiner Geruchs- oder Geschmacksbeeinträchtigung durch die Anwendung. Da die UV-C-Strahlung für den Menschen jedoch gefährlich ist, sind entsprechend zusätzliche Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Studien zeigen 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.

Die Luftbehandlung mit UV-C erfolgt meist zentral in Lüftungs-/Klimaanlagen oder lokal in den Räumen selbst, in geschlossenen UV-Bestrahlungsmodulen, die auf den Luftstrom einwirken. In der Regel werden hohe Bestrahlungsdosen eingesetzt, da die Expositionszeit der Luftpartikel insgesamt kurz ist.

Die Oberflächeninaktivierung kann nur durch direkte Bestrahlung mit stationären, zumeist aber noch mobilen Geräten erfolgen. Bisher wurde eine direkte UV-C-Bestrahlung vornehmlich im Gesundheitsbereich eingesetzt, aber auch in der Verpackungs- und Textilindustrie. Im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel waren bereits vor der Corona-Pandemie einzelne Anwendungen zu finden.

UV-C-Inaktivierung lässt sich prinzipiell betriebssicher und wirkungsvoll in raumlufttechnische Systeme im ÖV integrieren. Bezüglich der Desinfektion von Oberflächen ist ein differenzierteres Bild zu zeichnen. Die Reinigung von Sitzbereichen kann nur in leeren Zügen erfolgen. Derzeit verfolgte Ansätze sind noch recht aufwendig. Hier ist zukünftig eine stärkere Automatisierung von Lösungen zu erwarten, die auch variabel auf unterschiedliche Oberflächentexturen reagieren können und zugleich über entsprechende integrierte Detektorsysteme die Qualitätssicherung der Prozesse übernehmen. Auch die Integration von UV-C-Strahlern stationär (z. B. in die Beleuchtungssysteme) ist mit entsprechenden Sicherungssystemen vorstellbar. Kompakte UV-C-LED-Lösungen werden beispielsweise für die Bestrahlung von Bedien- und Tastenfeldern, Griffen, Bedienknöpfen entwickelt. Somit können insbesondere sehr häufig berührte Oberflächen desinfiziert werden. Unterstützend kann auf ein „Hygienic Design“ der Zugraumstrukturen und Oberflächen geachtet werden.

Die allgemeine Empfehlung lautet, während einer SARS-CoV-2-Pandemie die Rezirkulation der Luft zu vermeiden (kein Umluftbetrieb). Die meisten Umluftsysteme sind zwar mit Luftfiltern ausgestattet, diese sind aber in der Regel gegen Viren nicht ausreichend wirksam. Luftfiltergeräte können im Umluftbetrieb die Konzentrationen an infektiösen Aerosolen in Räumen sehr wirksam reduzieren (mechanische Filtersysteme bewirken eine Verringerung der Partikelkonzentrationen in der Innenluft um 20 % bis 80 %; 50 % ist ein typischer Wert).

Eine Studie, bei der eine Fallstudie zur Übertragung von Influenza über die Luft für modellhafte Schätzungen der relativen Influenza-Risikoreduzierung verwendet wurde, zeigte für ein hypothetisches Büro einen positiven Zusammenhang zwischen Risikoreduzierungen und der Verwendung einer höheren Filterqualität gemäß den MERV-Filterklassifikationen. Die größte Risikoreduktion zu den niedrigsten Kosten zeigte sich bei MERV-13-Filtern.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Literaturstudie, dass es während der COVID-19-Pandemie ein Ansteckungsrisiko im ÖV gibt. Vor allem zeigt die erhobene Datenlage, dass eine Übertragung durch sogenannte Aerosolpartikel stattfinden kann. Wie in allen anderen Bereichen des privaten und öffentlichen Lebens gilt im ÖV die respiratorische Aufnahme von Virenpartikeln als 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 nach Kenntnis der Autoren dieser Studie lediglich in begrenzter Anzahl anhand retrospektiver Studien, welche das Ausbruchsgeschehen in chinesischen Fernverkehrszügen und in Reisebussen untersucht haben. Diese Studien geben Hinweise dafür, dass die Dauer der Exposition, die Nähe zu infektiösen Personen in einem geschlossenen Raum sowie die Belüftungssituation eine große Rolle spielen. Dabei zeigten die Daten ein relativ hohes Ansteckungsrisiko, wenn sich eine infizierte Person im gleichen 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 Raumluft anreichern und über die Zeit verteilen. Dieses Risiko kann durch Hygienemaßnahmen und durch regelkonformes Verhalten gesenkt werden.

Das Infektionsrisiko durch kontaminierte Oberflächen sowie in Außenbereichen des ÖV scheint dahingegen untergeordnet, ist jedoch nicht auszuschließen. In diesem Fall kann ein Mindestabstand zwischen den Personen als ausreichender Schutz vor Ansteckung angesehen werden. Der Kontakt zu kontaminierten Oberflächen ist meist auch mit dem (engen) Kontakt infizierter Personen verbunden, so dass die Unterscheidung zur Tröpfcheninfektion schwierig ist. Auf Grundlage der ausgewerteten Studien in denen die Identifikation der Personen und Nachverfolgung der Infektionsketten möglich war, kann jedoch festgestellt werden, dass Passagiere, die denselben Platz benutzen haben wie zuvor ein nachweislicher Indexpatient, kein erhöhtes Infektionsrisiko aufweisen. Die Übertragung durch keimbelastete Oberflächen scheint zumindest im Zugverkehr einen geringen Beitrag zum Infektionsgeschehen zu haben.

Es wird angenommen, dass die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln bisher zum gesamten Infektionsgeschehen in Deutschland nur einen geringen Beitrag lieferte, verglichen mit anderen Infektionsorten, wie dem häuslichen Umfeld oder dem Pflegebereich. Jedoch ist das Infektionsgeschehen im ÖV aufgrund der schwierigen Kontaktverfolgung schwer zu ermitteln, so dass davon ausgegangen werden muss, dass viele Übertragungen im ÖV nicht erfasst werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass infektiöse Reisende maßgeblich zur Verbreitung der SARS-CoV-2-Infektionen beitragen. Die vorliegenden evidenzbasierten Daten sind allerdings nicht geeignet, das Erkrankungsrisiko durch Reisen mit Bahn, Bus oder durch die Nutzung des ÖV zu bestimmen.

Aus den vorliegenden Informationen lässt sich aber bereits ableiten, dass sich das Infektionsrisiko mittels ausreichender Frischluftzufuhr, Einhaltung von Abstand und dem richtigen Tragen von geeigneten Gesichtsmasken effektiv reduzieren lässt.

Wegen dieser fehlenden Beobachtungsdaten lässt sich das Infektionsrisiko bei Nutzung des ÖV auf der Grundlage der situationsabhängigen Belüftung des Fahrgastinnenraums, der Nutzungsdauer, des Abstandes zu anderen Fahrgästen und letztendlich der Fahrgastdichte nur modellhaft abschätzen. Ein geeigneter Modellansatz hierfür und die Eingangsparameter für die Modellbildung wird an dieser Stelle nur insoweit erläutert, wie sie dem Verständnis dienen. Eine vollständige Beschreibung der Methode und der Ergebnisse der Simulationsstudie sind dem Bericht für Arbeitspaket 2 (Teil C) zu entnehmen.

Auf Basis der Literaturstudie wurden Einflussfaktoren ermittelt (vgl. Tabelle 5), die im nachfolgenden Arbeitspaket 2 anhand einer Simulationsstudie untersucht werden. Hierbei werden sowohl technische als auch medizinische Risikofaktoren berücksichtigt, wie die Aufenthaltsdauer im Fahrzeug bzw. an Stationen, die Belegungsdichte, die Luftwechselraten, die Filtereffizienz im Umluftbetrieb, die Verwendung von MNS sowie der Ausstoß von virenbelasteten Partikeln durch einen Emittenten. Weitere Parameter zur Szenarienbildung wurden ermittelt, so dass im weiteren Projektverlauf auf dieser Basis typische Fahrprofile, Auslastungsgrade und mittlere Aufenthalts- bzw. Verweildauern bestimmt werden können.

Auf Grundlage der Simulationsstudie wird es möglich sein, ein Infektionsrisiko für unterschiedliche Bereiche des ÖV abzuleiten und die Wirksamkeit verschiedener Schutzmaßnahmen miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Derzeit fehlen belastbare Studien zur Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen im ÖV. Die Simulationsstudie soll hierzu erste Hinweise geben.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Literaturrecherche die Wissensgrundlagen und verschiedene Eingangsparameter für die Modellbildung liefern konnte. Jedoch ist in vielen Bereichen die Datenlage noch lückenhaft oder gänzlich fehlend. An dieser Stelle soll auf einige Bereiche eingegangen werden, die nach Einschätzung der Autoren weiteren Handlungs- und Forschungsbedarf aufweisen, welcher über die Zielstellung dieses Projekts hinausgeht.

Insgesamt fehlt, insbesondere für Deutschland und Europa, die breite wissenschaftliche Grundlage (Beobachtungsstudien, Maßnahmenevaluationen) zur Beschreibung und Quantifizierung des pandemie relevanten Verhaltens im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs, zu Verhaltensänderungen im Pandemieverlauf sowie zur Evaluation geeigneter Maßnahmen zur Förderung und dauerhaften Aufrechterhaltung des gewünschten Verhaltens.

Es fehlen weitere Studien zu Einstellungsänderungen Reisender und Pendler, möglicherweise entwickelter Reiseangst und Bewältigungsstrategien, insbesondere für Deutschland und Europa. Insbesondere wäre die Identifikation spezifischer Prädiktoren (wie möglicherweise die Reisedauer) regelkonformen Verhaltens im Kontext öffentlicher Verkehrsmittel zur Ableitung spezieller verhaltensbezogener Maßnahmen wichtig. Hier könnte eine koordinierte, deutschlandweite Untersuchung von Fahrgastzahlen und eine Befragung von ÖV Nutzern die nötige Datengrundlage schaffen.

Regelkonformes Verhalten, welches nachweislich dem Ziel der Pandemiebekämpfung dient, sollte umfassend gefördert werden und die Nutzer des ÖV bestmöglich motiviert werden, mitzumachen. In manchen Bereichen sind jedoch auch wirksame Kontrollen und Sanktion unvermeidlich. Hierzu sollten weitere Studien, im Kontext des öffentlichen Verkehrs durchgeführt werden.

Da MNS im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel durch fehlerhafte Anwendung ihre Schutzwirkung verlieren, sollte eine gezielte und intensivierte Wissensvermittlung zur Maskenanwendung angestrebt werden.

Die Recherche zeigte, dass Maßnahmen der ÖV-Betreiber zur Fahrgastlenkung an Stationen nicht über ein Anbringen von Markierungen zur Unterstützung des Abstandhaltens hinausgehen. Nicht zuletzt sollten zur Erfassung und Förderung des Abstandhaltens und der Vermeidung von Crowding 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.

Abbildungsverzeichnis Teil B

Abbildung 1: CO ₂ -Konzentrationen im Schienenfahrzeug-Innenraum für Fernverkehr, Regionalverkehr und Nahverkehr	51
Abbildung 2: Prozentuale Veränderung der Fahrgastzahlen im Vergleich zum Zeitraum des Vorjahres	66
Abbildung 3: Risikomatrix.	75

Tabellenverzeichnis Teil B

Tabelle 1: Methoden der Literaturrecherche für Untersuchte Themenfelder (TF).....	39
Tabelle 2: technische Schutzmassnahmen in Fahrzeugen des ÖV.....	58
Tabelle 3: technische Schutzmassnahmen an Haltestellen & Stationen des ÖV.....	61
Tabelle 4: Organisatorische und betriebliche Schutzmassnahmen im ÖV.....	62
Tabelle 5: Risikofaktoren und abgeleitete Massnahmen.....	77
Tabelle 6: Identifizierte Informationslücken.....	83
Tabelle 7: Normen, Regelwerke und Richtlinien bezüglich Fahrzeugen des ÖV.....	104
Tabelle 8: Normen, Regelwerke und Richtlinien bezüglich Stationen des ÖV.....	107
Tabelle 9: Normen, Regelwerke, Richtlinien zu organisatorischen Abläufen im ÖV.....	109

Quellenverzeichnis Teil B

- [1] **Prather**, K.A., Wang, C.C., and Schooley, R.T., (2020): *Reducing transmission of SARS-CoV-2*. In: Science.
- [2] **World Health Organization and others**, (2020): *Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions*. In: scientific brief, 09 July 2020.
- [3] **Centers for Disease Control and Prevention** (2021): *How COVID-19 Spreads* [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>.
- [4] **Robert Koch Institut**, (2020): *SARS-CoV-2 Steckbrief zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19)* [Online]. [Zugriff am: 16.11.2020] Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html.
- [5] **Madewell**, Z.J., Yang, Y., Longini, I.M., Halloran, M.E. et al., (2020): *Household Transmission of SARS-CoV-2: A Systematic Review and Meta-analysis*. In: JAMA Netw Open 3(12):e2031756, doi:[10.1001/jamanetworkopen.2020.31756](https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.31756).
- [6] **Buitrago-Garcia**, D., Egli-Gany, D., Counotte, M.J., Hossmann, S. et al., (2020): *Occurrence and transmission potential of asymptomatic and presymptomatic SARS-CoV-2 infections: A living systematic review and meta-analysis*. In: PLoS medicine 17(9):e1003346, doi:[10.1371/journal.pmed.1003346](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003346).
- [7] **Cevik**, M., Marcus, J.L., Buckee, C., and Smith, T.C., (2020): *SARS-CoV-2 transmission dynamics should inform policy*. In: Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America, doi:[10.1093/cid/ciaa1442](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1442).
- [8] **World Health Organisation**, (2014): *Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care: WHO guidelines*. Geneva, ISBN 9789241507134.
- [9] **Kwon**, S.-B., Park, J., Jang, J., Cho, Y. et al., (2012): *Study on the initial velocity distribution of exhaled air from coughing and speaking*. In: Chemosphere 87(11):1260–1264, doi:[10.1016/j.chemosphere.2012.01.032](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.032).
- [10] **Liu**, J., Liao, X., Qian, S., Yuan, J. et al., (2020): *Community transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, Shenzhen, China, 2020*. In: Emerging infectious diseases 26(6):1320–1323.
- [11] **Chan**, J.F.-W., Yuan, S., Kok, K.-H., To, K.K.-W. et al., (2020): *A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster*. In: Lancet (London, England) 395(10223):514–523, doi:[10.1016/S0140-6736\(20\)30154-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30154-9).
- [12] **Huang**, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L. et al., (2020), “Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China,” *The Lancet* 395(10223):497–506, doi:[10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5).
- [13] **Hamner**, L., Dubbel, P., Capron, I., Ross, A. et al., (2020): *High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice - Skagit County, Washington, March 2020*. In: MMWR. Morbidity and mortality weekly report 69(19):606–610, doi:[10.15585/mmwr.mm6919e6](https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6919e6).
- [14] **Luo**, L., Liu, D., Liao, X., Wu, X. et al., (2020): *Modes of contact and risk of transmission in COVID-19 among close contacts*. medRxiv.
- [15] **Mittal**, R., Ni, R., and Seo, J.-H., (2020): *The flow physics of COVID-19*. In: Journal of fluid Mechanics 894.
- [16] **Bourouiba**, L., (2020): *Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19*. In: JAMA 323(18):1837–1838, doi:[10.1001/jama.2020.4756](https://doi.org/10.1001/jama.2020.4756).

- [17] **Asadi, S., Bouvier, N., Wexler, A.S., and Ristenpart, W.D., (2020):** *The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles?* In: *Aerosol science and technology: the journal of the American Association for Aerosol Research* **0(0)**:1–4, doi:[10.1080/02786826.2020.1749229](https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1749229).
- [18] **Wit, E. de, van Doremalen, N., Falzarano, D., and Munster, V.J., (2016):** *SARS and MERS: recent insights into emerging coronaviruses.* In: *Nature reviews. Microbiology* **14(8)**:523–534, doi:[10.1038/nrmicro.2016.81](https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.81).
- [19] **Brankston, G., Gitterman, L., Hirji, Z., Lemieux, C. et al., (2007):** *Transmission of influenza A in human beings.* In: *The Lancet infectious diseases* **7(4)**:257–265.
- [20] **Smither, S.J., Eastaugh, L.S., Findlay, J.S., and Lever, M.S., (2020):** *Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity.* In: *Emerging microbes & infections* **9(1)**:1415–1417, doi:[10.1080/22221751.2020.1777906](https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1777906).
- [21] **van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G. et al., (2020).** *Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1:* In: *N Engl J Med* **382(16)**:1564–1567, doi:[10.1056/NEJMc2004973](https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973).
- [22] **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)**, doi:[10.3201/eid2609.201806](https://doi.org/10.3201/eid2609.201806).
- [23] **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: *Virology* **17(1)**, doi:[10.1186/s12985-020-01418-7](https://doi.org/10.1186/s12985-020-01418-7).
- [24] **van Doremalen, N., Bushmaker, T., and Munster, V.J., (2013):** *Stability of Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) under different environmental conditions.* In: *Euro surveillance: bulletin Europeen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin* **18(38)**, doi:[10.2807/1560-7917.es2013.18.38.20590](https://doi.org/10.2807/1560-7917.es2013.18.38.20590).
- [25] **Chan, K.H., Peiris, J.S.M., Lam, S.Y., Poon, L.L.M. et al., (2011):** *The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus.* In: *Advances in Virology 2011*:1–7, doi:[10.1155/2011/734690](https://doi.org/10.1155/2011/734690).
- [26] **Chin, A., Chu, J., Perera, M., Hui, K. et al., (2020):** *Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions.* In: medRxiv.
- [27] **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 diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, doi:[10.1093/cid/ciaa1517](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1517).
- [28] **Hermes, M. and Holl, Christina, Seitz-Bisenberger, Anna-Christina,** *Datenerhebung zur Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln.: Einfluss von Raumklimaparametern,* in Review.
- [29] **Ahlawat, A., Wiedensohler, A., and Mishra, S.K., (2020):** *An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments.* In: *Aerosol Air Qual. Res.* **20(9)**:1856–1861, doi:[10.4209/aaqr.2020.06.0302](https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0302).
- [30] **Offenbächer, M., Hölzl, B., Gaisberger, M., Untner, H. et al., (2020):** *Der Gasteiner Heilstollen und eine mögliche Ansteckungsgefahr im Therapiebereich mit Viren.* In: *rheuma plus* **19(4)**:144–151, doi:[10.1007/s12688-020-00350-6](https://doi.org/10.1007/s12688-020-00350-6).
- [31] **Lowen, A.C., Mubareka, S., Steel, J., and Palese, P., (2007):** *Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature.* In: *PLoS Pathog* **3(10)**:e151, doi:[10.1371/journal.ppat.0030151](https://doi.org/10.1371/journal.ppat.0030151).
- [32] **Moriyama, M., Hugentobler, W.J., and Iwasaki, A., (2020):** *Seasonality of Respiratory Viral Infections.* In: *Annual Review of Virology* **7(1)**:83–101, doi:[10.1146/annurev-virology-012420-022445](https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445).

- [33] **Do an**, B., Ben Jebli, M., Shahzad, K., Farooq, T.H. et al., (2020): *Investigating the Effects of Meteorological Parameters on COVID-19: Case Study of New Jersey, United States*. In: Environmental Research 191:110148, doi:[10.1016/j.envres.2020.110148](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110148).
- [34] **Bashir**, M.F., Ma, B., Bilal, Komal, B. et al., (2020): *Correlation between climate indicators and COVID-19 pandemic in New York, USA*. In: Science of The Total Environment 728:138835, doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.138835](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138835).
- [35] **Asadi**, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S. et al., (2019): *Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness*. In: Sci Rep 9(1), doi:[10.1038/s41598-019-38808-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z).
- [36] **Chao**, C., Wan, M.P., Morawska, L., Johnson, G.R. et al., (2009): *Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening*. In: Journal of Aerosol Science 40(2):122–133, doi:[10.1016/j.jaerosci.2008.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.10.003).
- [37] **Edwards**, D.A., Man, J.C., Brand, P., Katstra, J.P. et al., (2004): *Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols*. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 101(50):17383–17388, doi:[10.1073/pnas.0408159101](https://doi.org/10.1073/pnas.0408159101).
- [38] **Loudon**, R.G. and Roberts, R.M., (1967): *Droplet expulsion from the respiratory tract*. In: The American review of respiratory disease 95(3):435–442, doi:[10.1164/arrd.1967.95.3.435](https://doi.org/10.1164/arrd.1967.95.3.435).
- [39] **Xie**, X., Li, Y., Sun, H., and Liu, L., (2009): *Exhaled droplets due to talking and coughing*. In: J. R. Soc. Interface 6(suppl_6), doi:[10.1098/rsif.2009.0388.focus](https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0388.focus).
- [40] **Han**, Z.Y., Weng, W.G., and Huang, Q.Y., (2013): *Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze*. In: J. R. Soc. Interface 10(88):20130560, doi:[10.1098/rsif.2013.0560](https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0560).
- [41] **Yang**, C., Yang, X., and Zhao, B., (2016): *Person to person droplets transmission characteristics in uni-directional ventilated protective isolation room: The impact of initial droplet size*. In: Build. Simul. 9(5):597–606, doi:[10.1007/s12273-016-0290-7](https://doi.org/10.1007/s12273-016-0290-7).
- [42] **Xu**, C., Nielsen, P.V., Liu, L., Jensen, R.L. et al., (2017), “Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique,” *Building and Environment* 112:190–199, doi:[10.1016/j.buildenv.2016.11.032](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.032).
- [43] **Tang**, J.W., Nicolle, A.D., Klettner, C.A., Pantelic, J. et al., (2013): *Airflow Dynamics of Human Jets: Sneezing and Breathing - Potential Sources of Infectious Aerosols*. In: PloS one 8(4):e59970, doi:[10.1371/journal.pone.0059970](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059970).
- [44] **Hinds**, W.C., (1999): *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons.
- [45] **Gesellschaft für Aerosolforschung**, *Positionspapier zum Verständnis der Rolle von Aerosolpartikeln beim SARS-CoV-2 Infektionsgeschehen* [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.info.gaef.de/positionspapier>.
- [46] **Buonanno**, G., Stabile, L., and Morawska, L., (2020): *Estimation of airborne viral emission: quantification of emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment*. In: Environment International:105794.
- [47] **Olmedo**, I., Nielsen, P.V., Ruiz de Adana, M., Jensen, R.L. et al., (2012): *Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies*. In: Indoor Air 22(1):64–76, doi:[10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x).
- [48] **Browne**, A., St-Onge Ahmad, S., Beck, C.R., and Nguyen-Van-Tam, J.S., (2016): *The roles of transportation and transportation hubs in the propagation of influenza and coronaviruses: a systematic review*. In: Journal of travel medicine 23(1):tav002.
- [49] **Luo**, K., Lei, Z., Hai, Z., Xiao, S. et al., (2020): *Transmission of SARS-CoV-2 in Public Transportation Vehicles: A Case Study in Hunan Province, China*. In: Open forum infectious diseases: ofaa430.

- [50] **Shen, Y.**, Li, C., Dong, H., Wang, Z. et al., (2020): *Community outbreak investigation of SARS-CoV-2 transmission among bus riders in eastern China*. In: *JAMA internal medicine* **180**(12):1665–1671.
- [51] **Di Carlo, P.**, Chiacchiarretta, P., Sinjari, B., Aruffo, E. et al., (2020): *Air and surface measurements of SARS-CoV-2 inside a bus during normal operation*. In: *PloS one* **15**(11):e0235943.
- [52] **Zhu, S.**, Srebric, J., Spengler, J.D., and Demokritou, P., (2012): *An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments*. In: *Building and Environment* **47**:67–75, doi:[10.1016/j.buildenv.2011.05.003](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.003).
- [53] **Hu, M.**, Lin, H., Wang, J., Xu, C. et al., (2020): *The risk of COVID-19 transmission in train passengers: an epidemiological and modelling study*. In: *Clinical Infectious Diseases*.
- [54] **Furuya, H.**, (2007): *Risk of Transmission of Airborne Infection during Train Commute Based on Mathematical Model*. In: *Environmental Health and Preventive Medicine* **12**(2):78–83, doi:[10.1265/ehpm.12.78](https://doi.org/10.1265/ehpm.12.78).
- [55] **Umweltbundesamt**, (2008): *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft*. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* **51**(11):1358–1369.
- [56] **Wargocki, P.**, Kuehn, T.B., Muller, C., and Conrad, E., (2018): *ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning*. ASHRAE, Atlanta.
- [57] **Chirico, F.**, Sacco, A., Bragazzi, N.L., and Magnavita, N., (2020): *Can Air-Conditioning Systems Contribute to the Spread of SARS/MERS/COVID-19 Infection? Insights from a Rapid Review of the Literature*. In: *IJERPH* **17**(17):6052, doi:[10.3390/ijerph17176052](https://doi.org/10.3390/ijerph17176052).
- [58] **Mingyue Guo**, Peng Xu, Tong Xiao, Ruikai He et al., (2021): *Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic*. In: *Building and Environment* **187**:107368, doi:[10.1016/j.buildenv.2020.107368](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107368).
- [59] **Bahl, P.**, Doolan, C., Silva, C. de, Chughtai, A.A. et al., (2020): *Airborne or droplet precautions for health workers treating COVID-19?* In: *J Infect Dis*, doi:[10.1093/infdis/jiaa189](https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa189).
- [60] **Azimi, P.** and Stephens, B., (2013): *HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs*. In: *Building and Environment* **70**:150–160, doi:[10.1016/j.buildenv.2013.08.025](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.025).
- [61] **You, R.**, Lin, C.-H., Wei, D., and Chen, Q., (2019): *Evaluating the commercial airliner cabin environment with different air distribution systems*. In: *Indoor Air* **29**(5):840–853, doi:[10.1111/ina.12578](https://doi.org/10.1111/ina.12578).
- [62] **Philips, G.B.** and NOVAK, F.E., (1956): *Applications of germicidal ultraviolet in infectious disease laboratories. II. An ultraviolet pass-through chamber for disinfecting single sheets of paper*. In: *Applied microbiology* **4**(2):95–96.
- [63] **Bianco, A.**, Biasin, M., Pareschi, G., Cavalleri, A. et al., (2020): *UV-C irradiation is highly effective in inactivating and inhibiting SARS-CoV-2 replication*. In: *Inactivating and Inhibiting SARS-CoV-2 Replication (June 5, 2020)*.
- [64] **Rastogi, R.P.**, Kumar, A., Tyagi, M.B., Sinha, R.P. et al., (2010): *Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair*. In: *Journal of nucleic acids* 2010.
- [65] **Muñoz, M.J.**, Moreno, N.N., Giono, L.E., Botto, A.E.C. et al., (2017): *Major roles for pyrimidine dimers, nucleotide excision repair, and ATR in the alternative splicing response to UV irradiation*. In: *Cell reports* **18**(12):2868–2879.
- [66] **Jensen, M.M.**, (1964), “Inactivation of airborne viruses by ultraviolet irradiation,” *Applied microbiology* **12**(5):418–420.
- [67] **Riley, R.L.**, Permutt, S., and Kaufman, J.E., (1971), “Room air disinfection by ultraviolet irradiation of upper air. Further analysis of convective air exchange,” *Archives of environmental health* **23**(1):35–39, doi:[10.1080/00039896.1971.10665951](https://doi.org/10.1080/00039896.1971.10665951).

- [68] **Hadi, J., Dunowska, M., Wu, S., and Brightwell, G., (2020):** *Control Measures for SARS-CoV-2: A Review on Light-Based Inactivation of Single-Stranded RNA Viruses*. In: *Pathogens* **9**(9):737.
- [69] **Tseng, C.-C. and Li, C.-S., (2005):** *Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation*. In: *Aerosol Science and Technology* **39**(12):1136–1142.
- [70] **Woo, M.-H., Grippin, A., Anwar, D., Smith, T. et al., (2012):** *Effects of relative humidity and spraying medium on UV decontamination of filters loaded with viral aerosols*. In: *Applied and environmental microbiology* **78**(16):5781–5787, doi:[10.1128/AEM.00465-12](https://doi.org/10.1128/AEM.00465-12).
- [71] **Cutler, T.D., Wang, C., Hoff, S.J., and Zimmerman, J.J., (2012):** *Effect of temperature and relative humidity on ultraviolet (UV 254) inactivation of airborne porcine respiratory and reproductive syndrome virus*. In: *Veterinary microbiology* **159**(1-2):47–52, doi:[10.1016/j.vetmic.2012.03.044](https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2012.03.044).
- [72] **McDevitt, J.J., Rudnick, S.N., and Radonovich, L.J., (2012):** *Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light*. In: *Applied and environmental microbiology* **78**(6):1666–1669, doi:[10.1128/AEM.06960-11](https://doi.org/10.1128/AEM.06960-11).
- [73] **Walker, C.M. and Ko, G., (2007):** *Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols*. In: *Environmental science & technology* **41**(15):5460–5465, doi:[10.1021/es070056u](https://doi.org/10.1021/es070056u).
- [74] **Derraik, J.G.B., Anderson, W.A., Connelly, E.A., and Anderson, Y.C., (2020):** *Rapid Review of SARS-CoV-1 and SARS-CoV-2 Viability, Susceptibility to Treatment, and the Disinfection and Reuse of PPE, Particularly Filtering Facepiece Respirators*. In: *International journal of environmental research and public health* **17**(17), doi:[10.3390/ijerph17176117](https://doi.org/10.3390/ijerph17176117).
- [75] **Purschke, M., Elsamaloty, M., Wilde, J.P., Starr, N. et al., (2020):** *Construction and validation of UV-C decontamination cabinets for filtering facepiece respirators*. In: *Applied optics* **59**(25):7585–7595, doi:[10.1364/AO.401602](https://doi.org/10.1364/AO.401602).
- [76] **Baluja, A., Arines, J., Vilanova, R., Cortiñas, J. et al., (2020):** *UV light dosage distribution over irregular respirator surfaces. Methods and implications for safety*. In: *Journal of occupational and environmental hygiene* **17**(9):390–397, doi:[10.1080/15459624.2020.1786576](https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1786576).
- [77] **Kariwa, H., Fujii, N., and Takashima, I., (2006):** *Inactivation of SARS coronavirus by means of povidone-iodine, physical conditions and chemical reagents*. In: *Dermatology (Basel, Switzerland)* **212** Suppl 1:119–123, doi:[10.1159/000089211](https://doi.org/10.1159/000089211).
- [78] **Sagripanti, J.-L. and Lytle, C.D., (2011):** *Sensitivity to ultraviolet radiation of Lassa, vaccinia, and Ebola viruses dried on surfaces*. In: *Archives of virology* **156**(3):489–494, doi:[10.1007/s00705-010-0847-1](https://doi.org/10.1007/s00705-010-0847-1).
- [79] **Ratnesar-Shumate, S., Williams, G., Green, B., Krause, M. et al., (2020):** *Simulated Sunlight Rapidly Inactivates SARS-CoV-2 on Surfaces*. In: *The Journal of infectious diseases* **222**(2):214–222, doi:[10.1093/infdis/jiaa274](https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa274).
- [80] **Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P., and Lingenfelder, C., (2020):** *Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation-review and analysis of coronavirus photoinactivation studies*. In: *GMS hygiene and infection control* **15**.
- [81] **Beggs, C.B. and Avital, E.J., (2020):** *Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study*. In: *PeerJ* **8**:e10196, doi:[10.7717/peerj.10196](https://doi.org/10.7717/peerj.10196).
- [82] **UVSolutions Magazine, Validation Needed for UV Surface Disinfection Applications** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://uvsolutionsmag.com/articles/2020/validation-needed-for-uv-surface-disinfection-applications/>.
- [83] **Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Hygienic Design: Produktflyer** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Reinst-und-Mikroproduktion/Produktflyer_Hygienic_Design.pdf.

- [84] **Rutala, W.A., Gergen, M.F., Tande, B.M., and Weber, D.J., (2014):** *Room decontamination using an ultraviolet-C device with short ultraviolet exposure time.* In: *Infection control and hospital epidemiology* **35**(8):1070–1072, doi:[10.1086/677149](https://doi.org/10.1086/677149).
- [85] **Kostyuchenko, S., Khan, A., Volkov, S., and Giller, H., (2009):** *UV Disinfection in Moscow Metro Public Transport Systems.* *IUVA News, Moscow.*
- [86] **Huston, L., (2009):** *Ultraviolet germicidal irradiation for transit buses.* IDEA Programs, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [87] **Agence France-Press, On mission to eradicate virus germs, China firms see the UV light** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.france24.com/en/20200313-on-mission-to-eradicate-virus-germs-china-firms-see-the-uv-light>.
- [88] **China Global Television Network, Buses undergo UV disinfection in China during COVID-19 outbreak** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://news.cgtn.com/news/2020-03-15/Buses-undergo-UV-disinfection-in-China-during-COVID-19-outbreak-OT20sGobeg/index.html>.
- [89] **XinhuaNet, UV-sterilization CT scanner speeds up diagnosis of coronavirus infection in China** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: http://www.xinhuanet.com/english/2020-02/19/c_138798798.htm.
- [90] **Vox Media, L., Here's how NYC is using powerful UV light to kill the coronavirus on subways and buses** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.theverge.com/2020/5/20/21265221/nyc-mta-ultraviolet-light-uvc-coronavirus-disinfect-puro-pictures>.
- [91] **TheMayor.EU, Krakow tests UV technology for disinfection of public transport** [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.themayor.eu/en/a/view/krakow-tests-uv-technology-for-disinfection-of-public-transport-4729>.
- [92] **American Public Transportation Association, Public Transit and COVID-19 Pandemic: Global Research and Best Practices** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: https://static1.squarespace.com/static/5bc63eb90b77bd20c50c516c/t/5f74915264a865029dafa27c/1601474930418/APTA+Covid+Best+Practices+-+09.29.2020_update.pdf.
- [93] **American Public Transportation Association, Summary: A Guide for Public Transportation Pandemic Planning and Response (NCHRP Report 769)** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: www.apta.com/wp-content/uploads/APTA-Coronavirus-Brief-03-05-20.pdf.
- [94] **European Union Agency for Railways, COVID-19 Rail Protocol: Recommendations for safe resumption of railway services in Europe: Version 1.4** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/covid-19-rail-protocol>.
- [95] **Groß, C. and Groß, J., (2020): Virenstop, Kabinen und Co. – Wie umgehen mit Corona?: Wie die Institutionen mit der Pandemie umgehen.** In: *DER NAHVERKEHR* 7+8/2020:35–38.
- [96] **Norddeutscher Rundfunk, Corona-Schutz: Busse in Hamburg bekommen Trennscheiben** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Corona-Schutz-Busse-in-Hamburg-bekommen-Trennscheiben,hvv554.html.
- [97] **Rakowitsch, M., von Stillfried, A., Schneider, P., Schindler, C., (2020): Möglichkeiten zur Minimierung des Infektionsrisikos von SARSCOV2 im Schienenpersonenverkehr.** In: *ZEVrail* **144**(8).
- [98] **Rundfunk Berlin-Brandenburg, BVG gibt Hunderttausende Euro für Spuckschutz in Bussen aus** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: www.rbb24.de/panorama/thema/2020/coronavirus/beitraege_neu/2020/07/bvg-busse-spuckschutz-plexiglasscheibe-fahrer.html.
- [99] **Transport Strategy Centre, How is the global transport sector responding to the Coronavirus (COVID-19)?** [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/centre-for-transport-studies/rtscc/covid-19/Imperial-College-TSC-Benchmarking---COVID-19-Key-Findings---July-2020.pdf>.

- [100] **Koenig, G.**, (2020): *Controlling occupancy in real time*. In: Metro Report International Autumn 2020:52–53.
- [101] **Berliner Verkehrsbetriebe**, *Bitte hinten einsteigen* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.bvg.de/de/Unternehmen/Medien/Presse/Pressemitteilungen/Detailansicht?newsid=3792>.
- [102] **BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG**, *Coronavirus: Ab Donnerstag nur noch hinterer Einstieg im Bus* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/tourismus/infos/verkehr/nachrichten/6106316-4357821-coronavirus-ab-donnerstag-nur-noch-hinte.html>.
- [103] **Norddeutscher Rundfunk**, *Schutz vor Corona: Busfahrer durch Trennwände abgeschirmt* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Schutz-vor-Corona-Busfahrer-durch-Trennwaende-abgeschirmt,trennwand114.html>.
- [104] **Hannover.de Internet GmbH**, *Schutzmaßnahmen bei Bussen und Stadtbahnen* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Gesundheit/Gesundheitsschutz/Coronavirus-in-der-Region-Hannover/Meldungen-zum-Coronavirus/Schutzmaßnahmen-bei-Bussen-und-Stadtbahnen>.
- [105] **Dresdner Verkehrsbetriebe AG**, *Coronavirus: Alle Infos auf einen Blick* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.dvb.de/de-de/meta/aktuelle-meldungen/corona-massnahmen/>.
- [106] **Freiburger Verkehrs AG**, *Maßnahmen gegen das Corona-Virus bei der VAG: Größtmöglicher Gesundheitsschutz* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://blog.vag-freiburg.de/coronavirus/>.
- [107] **Münchner Verkehrsgesellschaft mbH**, *Gemeinsam gegen Corona* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: www.mvg.de/services/aktuelles/coronavirus.htm.
- [108] **Deutsche Bahn AG**, *Sitzplatzreservierung: Weniger reservierbare Plätze für mehr Abstand* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.bahn.de/p/view/home/info/faq-corona-sitzplatzreservierung.shtml>.
- [109] **Yang, D.**, Yurtsever, E., Renganathan, V., Redmill, K.A. et al., (2020): *A Vision-based Social Distance and Critical Density Detection System for COVID-19*. *arXiv preprint arXiv:2007.03578*.
- [110] **Berliner Verkehrsbetriebe**, *Alles nach Plan macht der Mai* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.bvg.de/de/Unternehmen/Medien/Presse/Pressemitteilungen/Detailansicht?newsid=3888>.
- [111] **Internationaler Eisenbahnverband**, *RAILsilence: Reaktion des Bahnsektors auf die coronabedingten Ausgangsbeschränkungen* [Online]. Verfügbar unter: https://uic.org/IMG/pdf/3_railsilience_de.pdf.
- [112] **Berliner Verkehrsbetriebe**, *BVG hält Berlin weiterhin mobil* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.bvg.de/de/Unternehmen/Medien/Presse/Pressemitteilungen/Detailansicht?newsid=3809>.
- [113] **Ministerium für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen**, *Maßnahmen im Schienenpersonennahverkehr: Sonderfahrplan im Schienenpersonennahverkehr* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: https://www.vm.nrw.de/ministerium/Corona-Virus-in-NRW/Corona-Virus-Massnahmen-im-Bereich-OePNV_Nahverkehr/130_20_003_mobil_NRW_Sonderfahrplan_A4_210x297_V10.pdf.
- [114] **Verlag Der Tagesspiegel GmbH**, *BVG schickt ab Dienstag wieder mehr U-Bahnen los* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/infektionsgefahr-vermeiden-bvg-schickt-ab-dienstag-wieder-mehr-u-bahnen-los/25673824.html>.

- [115] **S-Bahn Berlin GmbH**, *Informationen zum Coronavirus (Covid-19)* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://sbahn.berlin/fahren/fahrplanaenderungen/informationen-zum-coronavirus-covid-19/>.
- [116] **Deutsche Bahn AG**: *Fahrplanwechsel: Der neue Winterfahrplan 2020/2021* [Online]. [Zugriff am: 02.12.2020] Verfügbar unter: <https://inside.bahn.de/winterfahrplan/>.
- [117] **Tirachini, A. and Cats, O.**, (2020): *COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs*. In: *Journal of Public Transportation* **22**(1):1.
- [118] **Lokomotive Fachbuchhandlung GmbH**, *Spanien: FGC will mit "Zügen der Stille" Corona-Ansteckungen verhindern* [Online]. [Zugriff am: 18.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.lok-report.de/news/europa/item/21381-spanien-fgc-will-mit-zuegen-der-stille-corona-ansteckungen-verhindern.html>.
- [119] **Polske Kolejowe Panstwowe**, *Intercity Spółka Akcyjna, Seat Reservation in the Quiet Zone* [Online]. [Zugriff am: 12.11.2020] Verfügbar unter: <https://www.intercity.pl/en/>.
- [120] **Statistisches Bundesamt**, *46 % weniger Fahrgäste im Fernverkehr mit Bussen und Bahnen im 1. Halbjahr 2020* [Online]. [Zugriff am: 21.01.2021] Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/10/PD20_424_461.html.
- [121] **Schelewsky, R. and Schelewsky, M.**, (2020): *Mobilitätsreport 02, Ergebnisse aus Beobachtungen per repräsentativer Befragung und ergänzendem Mobilitätstracking bis Ende Juni: Ausgabe 30.07.2020*.
- [122] **Krämer, A.**, (2020): *Wo steht der Bahnfernverkehr nach der Corona-Krise? Empirische Ergebnisse einer Verbraucher-Befragung in vier europäischen Ländern*. In: *ETR Juli + August 2020*(Nr. 7 + 8):12–17.
- [123] **Rail Business**, (2020): *Der Rushhour-Peak ist weg*. In: *Rail Business* (39/20):S. 9.
- [124] **Tao, Z., Dong, J., and Culleton, R.**, (2020): *The use of facemasks may not lead to an increase in hand-face contact*. In: *Transboundary and Emerging Diseases* **67**(6):3038–3040.
- [125] **Chen, Y.-J., Qin, G., Chen, J., Xu, J.-L. et al.**, (2020): *Comparison of Face-Touching Behaviors Before and During the Coronavirus Disease 2019 Pandemic*. In: *JAMA network open* **3**(7):e2016924, doi:[10.1001/jamanetworkopen.2020.16924](https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.16924).
- [126] **Sudharsan, B., Sundaram, D., Breslin, J.G., and Ali, M.I.**, (2020): *Avoid touching your face: A hand-to-face 3d motion dataset (covid-away) and trained models for smartwatches*. In: *10th International Conference 2020 on the Internet of Things Companion*: 1–9.
- [127] **Otchwemah, R., Duman, D., Neuwirth, M., Teves, S. et al.**, (2020): *Einsatz von Community-Masken in der Bevölkerung: Praxis und Anwendungsfehler während der COVID-19 Pandemie in Deutschland*. In: *Das Gesundheitswesen* **82**(11):821–828.
- [128] **Bonful, H.A., Addo-Lartey, A., Aheto, J.M.K., Ganle, J.K. et al.**, (2020): *Limiting spread of COVID-19 in Ghana: Compliance audit of selected transportation stations in the Greater Accra region of Ghana*. In: *PloS one* **15**(9):e0238971, doi:[10.1371/journal.pone.0238971](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238971).
- [129] **Jabbari, P., Taraghikhah, N., Jabbari, F., Ebrahimi, S. et al.**, (2020): *Adherence of the General Public to Self-protection Guidelines During the COVID-19 Pandemic*. In: *Disaster medicine and public health preparedness*: 1–12, doi:[10.1017/dmp.2020.445](https://doi.org/10.1017/dmp.2020.445).
- [130] **Abdullah, M., Dias, C., Muley, D., and Shahin, M.**, (2020): *Exploring the impacts of COVID-19 on travel behavior and mode preferences*. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* **8**:100255.
- [131] **Almlöf, E., Rubensson, I., Cebecauer, M., and Jenelius, E.**, (2020): *Who Is Still Travelling by Public Transport During COVID-19? Socioeconomic Factors Explaining Travel Behaviour in Stockholm Based on Smart Card Data*. Socioeconomic Factors Explaining Travel Behaviour in Stockholm Based on Smart Card Data (September 8, 2020).

- [132] **Tan, L.** and Ma, C., (2020): *Choice behavior of commuters' rail transit mode during the COVID-19 pandemic based on logistic model*. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- [133] **am Hagoort**, (2020): *Travel behaviour changes during times of COVID-19: A mixed methods research to the effects of COVID-19 on travel behaviour in the Netherlands*.
- [134] **Beck, M.J.** and Hensher, D.A., (2020): *Insights into the impact of COVID-19 on household travel and activities in Australia - The early days of easing restrictions*. In: *Transport Policy* **99**:95–119, doi:[10.1016/j.tranpol.2020.08.004](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.004).
- [135] **Zheng, D.**, Luo, Q., and Ritchie, B.W., (2021): *Afraid to travel after COVID-19? Self-protection, coping and resilience against pandemic 'travel fear*. In: *Tourism Management* **83**:104261.
- [136] **Turnšek, M.**, Brumen, B., Rangus, M., Gorenak, M. et al., (2020): *Perceived threat of COVID-19 and future travel avoidance: Results from an early convenient sample in Slovenia*. In: *Academica Turistica-Tourism and Innovation Journal* **13**(1).
- [137] **Deutsche Bahn AG**, *Aktuelle Informationen zum Coronavirus* [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.deutschebahn.com/pr-duesseldorf-de/aktuell/presseinformationen/Aktuelle-Informationen-zum-Coronavirus-5010540>.
- [138] **Schweizerische Bundesbahnen SBB**, *Coronavirus: Informationen zu den Bahnhöfen* [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: <https://www.sbb.ch/de/bahnhof-services/am-bahnhof/bahnhoefe/coronavirus-bahnhoefen.html>.
- [139] **Hamburger Hochbahn AG**, *Presseinformation. Im Test: Neue Wegeleitung zur U-Bahn* [Online]. [Zugriff am: 19.01.2021] Verfügbar unter: https://www.hochbahn.de/hochbahn/wcm/connect/de/1b639efb-0b20-4143-8938-6d4389f7fbc8/2020_0716_PI_Pilotversuch+Wegeleitung.pdf.
- [140] **Asad, S.M.**, Dashtipour, K., Hussain, S., Abbasi, Q.H. et al., (2020): *Travelers-Tracing and Mobility Profiling Using Machine Learning in Railway Systems*. In: *International Conference on UK-China*: 1-4.
- [141] **Oransirikul, T.** and Takada, H., *Social distancing warning system at public transportation by analyzing wi-fi signal from mobile devices*, Adjunct Proceedings of the 2020 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2020 ACM International Symposium on Wearable Computers:267–271, (2020).
- [142] **Pouw, C.A.S.**, Toschi, F., van Schadewijk, F., and Corbetta, A., (2020): *Monitoring physical distancing for crowd management: Real-time trajectory and group analysis*. In: *PloS one* **15**(10):e0240963, doi:[10.1371/journal.pone.0240963](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240963).
- [143] **Heinrich, J.**, Zhao, T., Quartucci, C., Herbig, B. et al., *SARS-CoV-2 Infektionen während Reisen mit Bahn und Bus. Ein systematisches Review epidemiologischer Studien: Datenerhebung zur Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln, Das Gesundheitswesen: (eingereicht als Publikation in Review)*.
- [144] **Chen, Y.**, Wang, Y., Wang, H., Hu, Z. et al., (2020): *Controlling urban traffic-one of the useful methods to ensure safety in Wuhan based on COVID-19 outbreak*. In: *Safety Science* **131**:104938, doi:[10.1016/j.ssci.2020.104938](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104938).
- [145] **Jia, J.S.**, Lu, X., Yuan, Y., Xu, G. et al., (2020): *Population flow drives spatio-temporal distribution of COVID-19 in China*. In: *Nature* **582**(7812):389–394, doi:[10.1038/s41586-020-2284-y](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2284-y).
- [146] **Du, Z.**, Wang, L., Cauchemez, S., Xu, X. et al., (2020): *Risk for Transportation of Coronavirus Disease from Wuhan to Other Cities in China*. In: *Emerging infectious diseases* **26**(5):1049–1052, doi:[10.3201/eid2605.200146](https://doi.org/10.3201/eid2605.200146).

- [147] **Liu, K., Ai, S., Song, S., Zhu, G. et al., (2020):** *Population movement, city closure in Wuhan and geographical expansion of the 2019-nCoV pneumonia infection in China in January 2020.* In: *Clinical Infectious Diseases*.
- [148] **Wei, J.-T., Liu, Y.-X., Zhu, Y.-C., Qian, J. et al., (2020):** *Impacts of transportation and meteorological factors on the transmission of COVID-19.* In: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 230:113610, doi:[10.1016/j.ijheh.2020.113610](https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113610).
- [149] **Zhao, S., Zhuang, Z., Ran, J., Lin, J. et al., (2020):** *The association between domestic train transportation and novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak in China from 2019 to 2020: A data-driven correlational report.* In: *Travel Medicine and Infectious Disease* 33:101568, doi:[10.1016/j.tmaid.2020.101568](https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101568).
- [150] **Zhu, Y., Xie, J., Huang, F., and Cao, L., (2020):** *The mediating effect of air quality on the association between human mobility and COVID-19 infection in China.* In: *Environmental Research* 189:109911, doi:[10.1016/j.envres.2020.109911](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109911).
- [151] **Zhang, Y., Zhang, A., and Wang, J., (2020):** *Exploring the roles of high-speed train, air and coach services in the spread of COVID-19 in China.* In: *Transport Policy* 94:34–42, doi:[10.1016/j.tranpol.2020.05.012](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.05.012).
- [152] **Carteni, A., Di Francesco, L., and Martino, M., (2020):** *How mobility habits influenced the spread of the COVID-19 pandemic: Results from the Italian case study.* In: *Science of The Total Environment* 741:140489, doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.140489](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140489).
- [153] **Carteni, A., Di Francesco, L., and Martino, M., (2021):** *The role of transport accessibility within the spread of the Coronavirus pandemic in Italy.* In: *Safety Science* 133:104999, doi:[10.1016/j.ssci.2020.104999](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104999).
- [154] **Coelho, M.T.P., Rodrigues, J.F.M., Medina, A.M., Scalco, P. et al., (2020):** *Global expansion of COVID-19 pandemic is driven by population size and airport connections.* In: *PeerJ* 8:e9708, doi:[10.7717/peerj.9708](https://doi.org/10.7717/peerj.9708).
- [155] **Deng, X., Gu, W., Federman, S., Du Plessis, L. et al., (2020):** *A Genomic Survey of SARS-CoV-2 Reveals Multiple Introductions into Northern California without a Predominant Lineage*
- [156] **Fan, J., Liu, X., Pan, W., Douglas, M.W. et al., (2020):** *Epidemiology of Coronavirus Disease in Gansu Province, China, 2020.* In: *Emerging infectious diseases* 26(6):1257–1265.
- [157] **Luo, L., Liu, D., Liao, X., Wu, X. et al., (2020):** *Contact Settings and Risk for Transmission in 3410 Close Contacts of Patients With COVID-19 in Guangzhou, China.* In: *Ann Intern Med* **173**(11):879–887, doi:[10.7326/M20-2671](https://doi.org/10.7326/M20-2671).
- [158] **Qian, G.-Q., Yang, N.-B., Ding, F., Ma, A.H.Y. et al., (2020):** *Epidemiologic and clinical characteristics of 91 hospitalized patients with COVID-19 in Zhejiang, China: a retrospective, multi-centre case series.* In: *QJM: An International Journal of Medicine* **113**(7):474–481, doi:[10.1093/qjmed/hcaa089](https://doi.org/10.1093/qjmed/hcaa089).
- [159] **Qian, H., Miao, T., Liu, L., Zheng, X. et al., (2020):** *Indoor transmission of SARS-CoV-2.* In: *Indoor Air*, doi:[10.1111/ina.12766](https://doi.org/10.1111/ina.12766).
- [160] **Clipman, S.J., Wesolowski, A.P., Gibson, D.G., Agarwal, S. et al., (2020):** *Rapid Real-time Tracking of Nonpharmaceutical Interventions and Their Association With Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) Positivity: The Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic Pulse Study.* In: *Clinical Infectious Diseases*, doi:[10.1093/cid/ciaa1313](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1313).
- [161] **Buda, S., Der Heiden, M. an, Altmann, D., Diercke, M. et al., (2020):** *Infektionsumfeld von erfassten COVID-19-Ausbrüchen in Deutschland.* doi:[10.25646/709](https://doi.org/10.25646/709).
- [162] **Möhner, M. and Wolik, A., (2020):** *Berufs- und branchenbezogene Unterschiede im COVID-19-Risiko in Deutschland.* In: *Deutsches Ärzteblatt* **117**:641–642.

- [163] **Robert Koch Institut**, *Risikobewertung zu COVID-19* [Online]. [Zugriff am: 22.02.2021] Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Risikobewertung.html/.
- [164] **Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe**, *Begründung zur Einstufung des Virus SARS-CoV-2 in Risikogruppe 3 und der Kennzeichnung mit "Z"* [Online]. [Zugriff am: 16.12.2020] Verfügbar unter: <https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Geschaeftsfuehrung-von-Ausschuessen/ABAS/pdf/SARS-CoV-2.pdf?blob=publicationFile&v=3>.
- [165] **Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege**, *Gefährdungsbeurteilung Biostoffe* [Online]. [Zugriff am: 22.02.2020] Verfügbar unter: <https://www.bgw-online.de/DE/Arbeitssicherheit-Gesundheitsschutz/Gefaehrdungsbeurteilung/Biostoffe/Biostoffe.html>.
- [166] **Pfenninger**, E.G., Christ, P., Neumüller, M., and Dinse-Lambracht, A., (2021): *Beurteilung des Infektionsrisikos durch SARS-CoV-2 für medizinisches Personal – Erkenntnisse aus der Praxis*. In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, doi:[10.1007/s00103-021-03277-1](https://doi.org/10.1007/s00103-021-03277-1).
- [167] **Nohl**, J. and Thiemecke, H., (1988): *Systematik zur Durchführung von Gefährdungsanalysen. 1. Theoretische Grundlagen*. Wirtschaftsverl. NW.
- [168] **Nguyen**, L.H., Drew, D.A., Graham, M.S., Joshi, A.D. et al., (2020): *Risk of COVID-19 among front-line health-care workers and the general community: a prospective cohort study*. In: The Lancet Public Health **5**(9):475-483.
- [169] **Dai**, H. and Zhao, B., (2020): *Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces*. In: Build. Simul. **13**(6):1321–1327, doi:[10.1007/s12273-020-0703-5](https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5).
- [170] **Robert Koch Institut**, *Mund-Nasen-Bedeckung im öffentlichen Raum als weitere Komponente zur Reduktion der Übertragungen von COVID-19*, *Epidemiologisches Bulletin* [Online]. [Zugriff am: 15.01.2020] Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2020/Ausgaben/19_20.pdf.
- [171] **Ai**, Z., Mak, C.M., Gao, N., and Niu, J., (2020): *Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment*. In: Build. Simul.:1–8, doi:[10.1007/s12273-020-0614-5](https://doi.org/10.1007/s12273-020-0614-5).
- [172] **Norta**, M., *Ein Verkehrsmittelwahlmodell für den Personenfernverkehr auf der Basis von Verkehrswiderständen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (2013).
- [173] **Müller**, H., *Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastflusses zu Haltestellen*. ETH Zürich, (1981).
- [174] **Weidmann**, U., (2020): *Bahninfrastrukturen: Planen-Entwerfen-Realisieren-Erhalten, vol. 1*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- [175] **Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz**, (1987): *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen vom 11.12.1987* (BGBl. I S. 2648): *Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab*,”
- [176] **FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**, (2007): *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*.
- [177] **Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz**, (1975): *Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr: BOKraft*.
- [178] **Europaparlament und Europäischer Rat**, (2002): *Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr: Richtlinie 2002/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*.
- [179] **FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**, (2019): *Hinweise für die Planung von Fernbushaltestellen und Fernbusterminals*.

- [180] **DB Station&Service AG**, (2020): *Bahnsteigdaten (Stand 03/2020)*.
- [181] **DB Station&Service AG**, (2005): *RiL 813.02 Personenbahnhöfe planen, Bahnsteige und Zuglängen planen*.
- [182] **Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz**, (1967): *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563)*.
- [183] **PTV Transport Consult GmbH**, (2013): *Stuttgart Hauptbahnhof S21 - Personenstromanalyse*
- [184] **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.**, (2020): *VDV-Statistik 2019*.
- [185] **Deutsche Bahn AG**: *Daten & Fakten 2019*.
- [186] **Verkehrsbund Berlin-Brandenburg**, *Kollektive und dynamische Fahrgastlenkung - Phase 3* [Online]. [Zugriff am: 22.02.2021] Verfügbar unter: <https://www.vbb.de/unsere-themen/projekte/fops-fahrgastlenkung-phase-3>.
- [187] **bahn manager Magazin**, *Lenkung von Fahrgastströmen in Bahnsystemen macht ÖPNV sicherer und komfortabler* [Online]. [Zugriff am: 22.02.2021] Verfügbar unter: <https://www.bahn-manager.de/lenkung-von-fahrgastströmen-in-bahnsystemen-macht-öpnv-sicherer-und-komfortabler/>.

Anhang Teil B

Normen und Regelwerke

Dieser Anhang gibt einen Überblick über das Regelwerk, die Normen und die Richtlinien, die im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie, der Ausbreitung von Viren in Fahrzeugen und der Umsetzung von Schutzmaßnahmen in Fahrzeugen, Stationen und dem Betrieb von öffentlichem Verkehr relevant sind.

Dabei werden einerseits die Gesetze und Regelungen zur Zulassung von Fahrzeugen, Stationen und Änderungen an diesen genannt. Andererseits werden die Normen und Richtlinien genannt, die auf praktischer Ebene Leitfäden für diese Zulassungen / Veränderungen sind. Dabei werden besonders Regelungen aufgeführt, die im Zusammenhang mit den erarbeiteten Schutzmaßnahmen stehen, indem sie deren Ausführung beeinflussen und möglicherweise behindern bzw. verzögern.

Analog zur Recherche der Schutzmaßnahmen in Abschnitt 3.2 sind die Regelungen in solche betreffend Fahrzeuge, solche zu Stationen und solche zum Betrieb des öffentlichen Verkehrs aufgeteilt. Dabei betreffen einige Regelungen, wie die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) alle diese Bereiche, während die genannten DIN-Normen oder VDV-Schriften sich auf Teilbereiche beziehen.

Als Leitfaden bei der Umsetzung von Maßnahmen (vgl. Abschnitt 3.2) soll hier ein Überblick über die zu beachtenden Regelungen gegeben werden. Die untersuchten Quellen listen verschiedene Normen, Regelwerke und Richtlinien der Zulassung von Fahrzeugen, Veränderung an Fahrzeugen und Stationen sowie Plangenehmigungen von Infrastrukturanlagen im Hinblick auf Maßnahmen zur Reduktion der Ausbreitung von SARS-CoV-2-Viren im ÖV und deren wesentliche Fallunterscheidungen auf. Es sind keine Normen, Regelwerke und Richtlinien bekannt, die dem Schutzziel der Vermeidung oder Verhinderung von Virusinfektionen im ÖV entsprechend den im Jahr 2020 allgemein anerkannten Präferenzen Rechnung tragen. Dies ist vor allem in der Kürze der Zeit begründet, die seit der Relevanz solcher Maßnahmen erst vergangen ist.

Die Normen und Regelwerke, die in diesem Bericht aufgeführt sind, orientieren sich an den Maßnahmen gegen die Ausbreitung von Corona, die für Fahrzeuge, Stationen und Betrieb des ÖV identifiziert wurden. Dazu sind in Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 in den Spalten „Relevanz bei Neubau von Fahrzeugen“ und „Relevanz bei Veränderungen an Fahrzeugen“ die Kategorien aufgeführt, in die diese Maßnahmen eingefügt werden können. So bestehen zum Beispiel die Kategorien „Kriterien für die Gestaltung des Innenraums von Stadtbahnfahrzeugen“ und „Zu beachten bei der Veränderung von Markierungen zur Fahrgastlenkung / Wegleitsystemen“. Auf diese Weise können für die aufgeführten Maßnahmen aus den oben aufgeführten Tabellen die zu beachtenden Normen und Regelwerke identifiziert werden. Aufgrund der Vielfalt der Maßnahmen sowie Normen ist eine vollständige, direkte Zuordnung des Regelwerks zu den Maßnahmen nicht zielführend.

Es werden nur die im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland anzuwendenden maßgeblichen Normen, Regelwerke und Richtlinien betrachtet. Die Bundesrepublik Deutschland ist als Mitgliedsstaat der Europäischen Union auch an deren Gesetzgebung gebunden. Ergänzend sei darauf hinzuweisen, dass insbesondere im Bereich des kommunalen ÖV, des nicht-schienenengebundenen ÖV und bei Bahnen besonderer Bauart eine Vielzahl spezifischer und teilweise bundeslandabhängiger Maßgaben ergänzend gelten, die hier nicht weiter betrachtet werden.

Im schienengebundenen ÖV ist nach der Bau- und Betriebsordnung zu differenzieren:

- EBO (Eisenbahn-Bau- und -Betriebsordnung): Vollbahnen auf Regelspurweite 1.435 mm
- BOStrab (Bau- und Betriebsordnung Straßenbahnen): Straßenbahnen, Stadtbahnen, U-Bahnen
- weitere Bau- und Betriebsordnungen: anderer schienengebundener ÖV, zum Beispiel Schmalspurbahnen auf geringeren als der Regelspurweite

Diese Ordnungen regeln Grundsätze des Baus und Betriebs von Schienenbahnen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland. Der darin verwendete Begriff eines „sicheren Betriebs“ entstammt dabei der Intention einer sicheren bahnbetrieblichen Durchführung der Verkehrsleistungen an sich, und versteht sich im Allgemeinen nicht im Sinne von Fragen des Infektionsschutzes.

Im straßengebundenen ÖV kommt die Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft) zu Anwendung.

Für die Beförderung von Personen gilt im Anwendungsgebiet von BOStrab und BOKraft das Personenbeförderungsgesetz (PBefG), das gemäß §22 PBefG auch eine Beförderungspflicht festlegt.

Folgende Normen, Regelwerke und Richtlinien zu Fahrzeugen des ÖV sind zu beachten, um die Ausbreitung von SARS-CoV-2 zu reduzieren (Tabelle 7):

TABELLE 7: NORMEN, REGELWERKE UND RICHTLINIEN BEZÜGLICH FAHRZEUGEN DES ÖV

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von Fahrzeugen	Relevanz bei Veränderungen an Fahrzeugen
Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (für bundeseigene Eisenbahnen)	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
Landesbevollmächtigte für Bahnaufsicht (LfB) (für nicht-bundeseigene Eisenbahnen)	Verordnung über die Sicherheit des Eisenbahnsystems (Eisenbahn-Sicherheitsverordnung – ESiV) vgl. auch Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
	Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) insbesondere: - TSI LOC&PAS (Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen) - TSI PRM (Eingeschränkt mobile Personen)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von Fahrzeugen	Relevanz bei Veränderungen an Fahrzeugen
	Fachmitteilung 11/2019 (Eisenbahn-Bundesamt, 05.04.2019)	Betriebliche Fahrzeug-Serienzulassung	
	<p>RICHTLINIE (EU) 2016/797 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR)</p> <p>(Anmerkung: Umsetzungsmodalitäten siehe Durchführungsverordnung 2018/545)</p>	<p>Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen</p> <p>Grundlage für Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen</p>	Grundlage für Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen
	<p>DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2018/545 DER KOMMISSION vom 4. April 2018 über die praktischen Modalitäten für die Genehmigung für das Inverkehrbringen von Schienenfahrzeugen und die Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen gemäß der Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates (Text von Bedeutung für den EWR)</p> <p>(Anmerkung: Durchführungsverordnung (DVO) zur Richtlinie 2016/797)</p>	<p>Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen</p> <p>Grundlage für Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen</p>	<p>Grundlage für Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen</p> <p>Änderung an bestehendem Fahrzeugtyp: Kategorie d gem. Art. 15(1) DVO 2018/545</p> <p>Kategorie b, c, d gem. Art. 15(1) DVO 2018/545 und Änderungsverwaltungsstelle nicht Inhaber Fahrzeugtypgenehmigung</p> <p>Änderung an bestehendem Fahrzeug: Kategorie d gem. Art. 15(1) DVO 2018/545</p>
(regional organisierte) Aufsichtsbehörden	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von Fahrzeugen	Relevanz bei Veränderungen an Fahrzeugen
für BOStrab-Betriebe	Personenbeförderungsgesetz (PBefG)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
(regional organisierte) Aufsichtsbehörden für BOKraft-Betriebe	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
	Personenbeförderungsgesetz (PBefG)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)	VDV-Schrift 150 Kapitel 7: Fahrgastraum	Kriterien für die Gestaltung des Innenraums von Stadtbahnfahrzeugen	Kriterien für die Gestaltung des Innenraums von Stadtbahnfahrzeugen
Deutscher Institut für Normung	DIN EN 15227 Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen	Zu beachten bei Gestaltung der Innenräume	Zu beachten bei Veränderung der Innenräume
	DIN EN 16186-4 Führerraum – Teil 4: Gestaltung und Zugang	Zu beachten bei Gestaltung der Führerräume	Zu beachten bei Veränderung der Führerräume
	DIN EN 45545-1 Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Regeln	Zu beachten bei Gestaltung der Innenräume	Zu beachten bei Veränderung der Innenräume
	DIN EN 45545-2 Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten	Zu beachten bei Gestaltung der Innenräume	Zu beachten bei Veränderung der Innenräume

Folgende Normen, Regelwerke und Richtlinien zu Stationen des ÖV sind zu beachten, um die Ausbreitung von SARS-CoV-2 zu reduzieren (Tabelle 8):

TABELLE 8: NORMEN, REGELWERKE UND RICHTLINIEN BEZÜGLICH STATIONEN DES ÖV

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von Stationen	Relevanz bei Veränderungen an Stationen
Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (für bundeseigene Eisenbahnen)	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
Landesbevollmächtigte für Bahnaufsicht (LfB) (für nicht-bundeseigene Eisenbahnen)	Verordnung über die Sicherheit des Eisenbahnsystems (Eisenbahn-Sicherheitsverordnung – ESiV) vgl. auch Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
	Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) insbesondere: - TSI INF (Infrastruktur) - TSI PRM (Eingeschränkt mobile Personen)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (für bundeseigene Eisenbahnen) Koordination durch Deutsche Bahn AG	DB-Ril 813.01 Personenbahnhöfe planen: Planungsgrundlagen	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
	DB-Ril 813.02 Personenbahnhöfe planen: Bahnsteige und ihre Zugänge		
	DB-Ril 813.03 Personenbahnhöfe planen: Wegeleit- und Informationssysteme		
	DB-Ril 813.04 Personenbahnhöfe planen: Planungshandbuch Anlagentechnik		
(regional organisierte) Aufsichtsbehörden für BOStrab-Betriebe	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
	Personenbeförderungsgesetz (PBefG)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Stationen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Stationen
Deutsches Institut für Normung	DIN 18040-1 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude	Zu beachten bei der Planung von Stationen	Zu beachten bei der technischen Veränderung von Stationen

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von Stationen	Relevanz bei Veränderungen an Stationen
	DIN 18040-3 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum	Zu beachten bei der Planung von Stationen	Zu beachten bei der technischen Veränderung von Stationen
	DIN 32984 Bodenindikatoren im öffentlichen Raum	Zu beachten bei der Planung von Markierungen zur Fahrgastlenkung / Wegleitsystemen	Zu beachten bei der Veränderung von Markierungen zur Fahrgastlenkung / Wegleitsystemen

Stationen des straßengebundenen ÖV sind in den Normen, Regelwerken und Richtlinien des Straßenverkehrs geregelt.

Die Richtlinie 813 „Personenbahnhöfe planen“ der Deutschen Bahn AG bezieht sich auf bundeseigene Eisenbahnen in der Bundesrepublik Deutschland, gilt aber als anerkannte Regel der Technik für das Eisenbahnwesen. Im Hinblick auf Maßnahmen zur Reduzierung der Ausbreitung von SARS-CoV-2-Viren dient diese Richtlinie sowohl als Maßgabe für Eingangsparameter in Modellrechnungen für Bahnhöfe, Haltestellen und Haltepunkte des deutschen Eisenbahnnetzes als auch als Orientierung zur Anpassung dieser Maßgaben an laufende Forschungsvorhaben. Ferner dient die Richtlinie dem vorgenannten übergeordneten Schutzziel auch im Hinblick auf eventuelle künftige Sensorik und Aktorik.

- DB-Ril 813.0101 Kapitel 4(1) Genehmigungspflicht:
„Anlagen der Eisenbahnen des Bundes, die Betriebsanlagen im Sinne des Allgemeinen Eisenbahngesetzes (AEG) sind,
- bedürfen vor Neubau oder wesentlicher Änderung einer Entscheidung nach § 18 AEG, die beim Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zu beantragen ist
und
- unterliegen gemäß dem Bundeseisenbahnverkehrsverwaltungsgesetz (BEVVG § 3 Abs. 1) der Bauaufsicht und der Eisenbahnaufsicht gemäß § 5 AEG durch das EBA.“
- DB-Ril 813.01 „Planungsgrundlagen“ unter anderem zu:
- „Maßgaben unter anderem zur Ermittlung der maßgebenden Reisendenzahlen für die Bemessung nach Reisendenaufkommen“
- „Brandschutz“
- DB-Ril 813.02 „Bahnsteige und ihre Zugänge“ unter anderem zu:
- „Bahnsteige konstruieren und bemessen“
- „Bahnsteigzugänge konstruieren und bemessen“
- „Wetterschutzanlage konstruieren und bemessen“
- „Ausstattung der Bahnsteige und ihrer Zugänge“
- „Ausstattung der Personenbahnhöfe mit taktilen Leitsystemen für Blinde und Sehbehinderte“
- DB-Ril 813.03 „Wegeleit- und Informationssysteme“ unter anderem zu:
- „Allgemeine Grundlage der Wegeleitung“
- „Bestandteile des Systems“
- „Dynamische Fahrgastinformation“
- „Informationselemente für Blinde und Sehbehinderte“
- ggf. „Sonderthemen“ – analog Kapitel 4 „Rauchfreier Bahnhof“

- DB-Ril 813.04 „Planungshandbuch Anlagentechnik“ unter anderem zu:
 - „Lufttechnische Anlagen“
 - „Telekommunikations- und Informationstechnische Anlagen“
 - „Förder-/Maschinentechnik“
 - „Planungsvorgaben Gebäudeautomation“

Folgende Normen, Regelwerke und Richtlinien zu organisatorischen Abläufen sind zu beachten, um die Ausbreitung von SARS-CoV-2-Viren zu reduzieren:

TABELLE 9: NORMEN, REGELWERKE, RICHTLINIEN ZU ORGANISATORISCHEN ABLÄUFEN IM ÖV

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von organisatorischen Abläufen	Relevanz bei Veränderungen an organisatorischen Abläufen
European Union Agency for Railways (ERA)	Europäisches Register genehmigter Fahrzeugtypen	relevant für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	relevant für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (für bundeseigene Eisenbahnen)	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Organisatorischen Abläufen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Organisatorischen Abläufen
Landesbevollmächtigte für Bahnaufsicht (LfB) (für nicht-bundeseigene Eisenbahnen)	Verordnung über die Sicherheit des Eisenbahnsystems (Eisenbahn-Sicherheitsverordnung – ESiV) vgl. auch Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Organisatorischen Abläufen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Organisatorischen Abläufen
	Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) insbesondere: - TSI OPE (Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung) - TSI LOC&PAS (Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen) - TSI INF (Infrastruktur) - TSI PRM (Eingeschränkt mobile Personen)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Organisatorischen Abläufen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Organisatorischen Abläufen
(regional organisierte) Aufsichtsbehörden für BOStrab-Betriebe	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen

Aufsichtsorgan	Norm, Regelwerk, Richtlinie	Relevanz bei Neubau von organisatorischen Abläufen	Relevanz bei Veränderungen an organisatorischen Abläufen
	Personenbeförderungsgesetz (PbefG)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
(regional organisierte) Aufsichtsbehörden für BOKraft-Betriebe	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen
	Personenbeförderungsgesetz (PbefG)	Grundlage für sämtliche Neubauten von Fahrzeugen	Grundlage für sämtliche Veränderungen an Fahrzeugen

Ergänzend sind Normen, Regelwerke und Richtlinien des Arbeitsschutzes zu beachten, die je nach Tätigkeit zu bestimmen sind.

Weitere Vorschriften des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), die für die Gestaltung und Zulassung von Fahrzeugen und Stationen relevant sind, sollten noch recherchiert werden. Hierzu sollte Kontakt zum VDV aufgenommen werden. Dabei war bisher die Recherche durch die Bearbeitungszeit in Kombination mit der Unsicherheit beim Thema der externen Kommunikation begrenzt.

Die bisherigen Normen, Regelwerke und Richtlinien des ÖV sind entsprechend den Forschungsergebnissen zur Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahr von Mikroorganismen und Viren im ÖV anzupassen.

Eine juristische Bewertung der Normen, Regelwerke und Richtlinien ist nur durch entsprechend fachkundige Juristen möglich, auch im Hinblick auf den Forschungsgegenstand; nach Kenntnis der Autoren dieses Reviews sind solche im Forschungsprojekt bisher nicht beauftragt.

Reinigung von ÖV-Fahrzeugen

Hinsichtlich der Reinigung von ÖV-Fahrzeugen sind drei Faktoren zu beachten:

1. Reinigungsgerechte Konstruktion von Fahrzeuginnenräumen
Die Kriterien zur reinigungsgerechten Konstruktion von Schienenfahrzeuginnenräumen sind der DIN EN 25150 „Schienenfahrzeuge – Innenräume – Konstruktive Anforderungen für die Reinigung“ zu entnehmen. Darin sind unter anderem Anforderungen an die Konstruktion von Sitzgestellen, Verkleidungen von Seitenwänden etc. aufgeführt.
2. Arbeitsschutz des Reinigungspersonals
Hinweise zur Reinigung von Schienenfahrzeugen aus Sicht des Reinigungspersonals sind dem Leitfaden der gesetzlichen Unfallversicherung zu entnehmen: Eisenbahn-Unfallkasse: Reinigen von Eisenbahnfahrzeugen zur Personenbeförderung. 2011-12.
3. Standard für ein Qualitätssicherungssystem für Dienstleister in der Reinigung von Verkehrsmitteln
Das Bahn-Media Institut für Management, Qualität und Verkehrsmittelreinigung UG hat 2015

mit seinem Arbeitskreis Schienenfahrzeugreinigung einen Standard für ein Qualitätssicherungssystem für Dienstleister in der Reinigung von Verkehrsmitteln entwickelt: „VR 115 – Eisenbahnfahrzeugreinigung“. Darin sind Anforderungen festgehalten, die die ordnungsgemäße Reinigung von Personenzügen gewährleisten sollen.

Quellennachweis für Normen und Regelwerke

Amtsblatt der Europäischen Union (DE): DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2018/545 DER KOMMISSION vom 4. April 2018 über die praktischen Modalitäten für die Genehmigung für das Inverkehrbringen von Schienenfahrzeugen und die Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen gemäß der Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates (Text von Bedeutung für den Europäischen Wirtschaftsraum (EWR)) (L90/66). Europäische Union, 06.04.2018.

Amtsblatt der Europäischen Union (DE): RICHTLINIE (EU) 2016/797 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR) (L138/44). Europäische Union, 26.05.2016.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG), Stand 03.12.2020. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Gesetz über die Eisenbahnverkehrsverwaltung des Bundes (Bundeseisenbahnverkehrsverwaltungsgesetz – BEVVG) (AEG), Stand 16.03.2020. unter: gesetze-im-internet.de (16.12.2020).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), Stand 05.04.2019. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Personenbeförderungsgesetz (PBefG), Stand 03.12.2020. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab), Stand 01.10.2019. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft), Stand 31.08.2015. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Verordnung über die Sicherheit des Eisenbahnsystems (Eisenbahn-Sicherheitsverordnung – ESiV), Stand 24.06.2020. unter: gesetze-im-internet.de (13.12.2020).

DB Station & Service AG: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik: Personenbahnhöfe planen: Planungsgrundlagen (81301). Berlin, 01.05.2012 (Regelwerk der Deutschen Bahn AG; hier kurz: DB-Ril 813.01).

DB Station & Service AG: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik: Personenbahnhöfe planen: Bahnsteige und ihre Zugänge (81302). Berlin, 01.05.2012 (Regelwerk der Deutschen Bahn AG; hier kurz: DB-Ril 813.02).

DB Station & Service AG: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik: Personenbahnhöfe planen: Wegeleit- und Informationssysteme (81303). Berlin, 01.04.2018 (Regelwerk der Deutschen Bahn AG; hier kurz: DB-Ril 813.03).

DB Station & Service AG: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik: Personenbahnhöfe planen: Planungshandbuch Anlagentechnik (81304). Berlin, 01.07.2015 (Regelwerk der Deutschen Bahn AG; hier kurz: DB-Ril 813.04).

DIN EN 16186-4:2019-09 Bahnanwendungen – Führerraum – Teil 4: Gestaltung und Zugang.

DIN EN 15227:2020-06 Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen.

DIN EN 45545-1:2013-08 Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Regeln.

DIN EN 45545-2:2020-10 Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten.

DIN 18040-1:2010-10 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude.

DIN 18040-3:2014-12 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum.

DIN 32984:2020-12 Bodenindikatoren im öffentlichen Raum.

Eisenbahn-Bundesamt: Änderung bereits genehmigter Fahrzeuge/Fahrzeugtypen. unter: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Fahrzeugzulassung/Aenderung_bereits_genehmigter_Fahrzeuge/aenderung_bereits_genehmigter_fahrzeuge_node.html (13.12.2020).

Eisenbahn-Bundesamt: Änderungen im Zulassungsverfahren für Umbau-Fahrzeuge (Fachmitteilung 19/2019 vom 17.06.2019). unter: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Fachmitteilungen/DE/2019/19_2019_Aenderungen_im_Zulassungsverfahren_fuer_Umbau-Fahrzeuge.html (13.12.2020).

Eisenbahn-Bundesamt: Das Europäische Register genehmigter Fahrzeugtypen. unter: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Fahrzeugzulassung/ERATV/eratv_node.html (13.12.2020).

Eisenbahn-Bundesamt: Fahrzeug-Serienzulassung in Deutschland – Vorbereitung auf das Vierte Eisenbahnpaket (Fachmitteilung 11/2019 vom 05.04.2019). unter: (13.12.2020).

Eisenbahn-Bundesamt: Technische Spezifikationen für die Interoperabilität. unter: https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/TSI/tsi_node.html (14.12.2020).

European Union Agency for Railways (ERA): European Register of Authorised Types of Vehicles, unter: <https://eratv.era.europa.eu/ERATV/> (14.12.2020).

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV (1995): VDV-Schrift 150 – Typenempfehlung Stadtbahn-Fahrzeuge. Kapitel 7: Fahrgastraum.

Teil C

Arbeitspaket 2:

Ausbreitungsmodellierung und
Risikobewertung von Mikroorganismen
und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen
Verkehrsmitteln

Inhaltsverzeichnis – Teil C

Kurzbeschreibung Teil C	117
1 Einführung Teil C.....	118
2 Modellierungsmethode.....	119
2.1 Zonales Modell.....	119
2.2 Abbildung der infektiösen Person	122
2.3 Abbildung von Einflussfaktoren.....	125
2.4 Bestimmung der Zug-, Bus- und Bahnhofstypen.....	127
3 Simulationsstudie	131
3.1 Fernzug (ICE).....	131
3.2 Regionalzug.....	143
3.3 S-Bahn.....	149
3.4 U-Bahn (älteres Modell).....	154
3.5 U-Bahn (neueres Modell).....	160
3.6 Fernbus.....	164
3.7 Stadtbus.....	168
3.8 Straßenbahn.....	172
3.9 Bahnhof oberirdisch.....	178
3.10 Bahnhof unterirdisch	179
4 Abstandseinhaltung und Crowd-Management.....	182
5 Risikobewertung.....	185
5.1 Gefahrenidentifizierung	185
5.2 Gefahrencharakterisierung.....	186
5.3 Expositionsschätzung – Aufnahme von SARS-CoV-2 durch Aerosole.....	188
5.4 Expositionsschätzung – Stabilität von SARS-CoV-2 auf Oberflächen	190
5.5 Risikocharakterisierung.....	191
6 Diskussion.....	193
6.1 Einfluss der Input-Parameter und von Mutationen.....	193
6.2 Vergleich mit Bewertung des RKI.....	193
6.3 Einfluss der Compliance.....	194
6.4 Wissenslücken.....	194

7	Handlungsempfehlungen	196
7.1	Maske tragen.....	196
7.2	Kommunikation einschränken.....	196
7.3	Technische Maßnahmen.....	196
7.4	Betriebliche Maßnahmen.....	196
7.5	Organisatorische Maßnahmen	197
7.6	Crowd Management.....	197
7.7	Schnelltests	197
7.8	Psychologische Unterstützung von Handlungsempfehlungen.....	198
8	Zusammenfassung und Ausblick Teil C.....	202
	Abbildungsverzeichnis Teil C	203
	Tabellenverzeichnis Teil C.....	207
	Quellenverzeichnis Teil C.....	208

Kurzbeschreibung Teil C

Die hier vorgestellte Simulationsstudie betrachtet die Ausbreitung von SARS-CoV-2 in den wichtigsten Fahrzeugtypen des öffentlichen Personenverkehrs: Fernverkehrszug und Fernbus, Regionalzug, S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn und Stadtbuss. Ferner werden Bahnhöfe und Haltestellen ober- und unterirdisch betrachtet.

Mit Hilfe von Simulationsmodellen wird untersucht, wie sich SARS-CoV-2 in Innenräumen von Gebäuden und Verkehrsmitteln des öffentlichen Personenverkehrs ausbreitet. Hierdurch wird es möglich, das Infektionsrisiko von Zug- und Busreisenden vergleichend zu bewerten. Als Simulationsmethode wird hierbei die zonale Modellierung herangezogen. Diese unterteilt den untersuchten (Innen-)Raum in 100-1.000 Zonen, die miteinander im Luftaustausch stehen. Durch diesen Ansatz ist es möglich, sowohl die Exposition von Fahrgästen (und eingeschränkt auch die von Mitarbeitenden der Verkehrsbetriebe) unmittelbar in der Nähe einer infizierten Person zu bewerten als auch weiter von dieser entfernt.

Im Schwerpunkt dieser Untersuchung steht, wie und in welcher Konzentration sich potentiell infektiöse Viren in der Raumluft ausbreiten und dort verteilen. Hierbei wird jeweils ein mit SARS-CoV-2-infizierter Fahrgast im Zug, Bus oder Bahnhof angenommen und die durch diesen Fahrgast verursachten Viremissionen als Quellterm dargestellt. Auf diese Weise kann gezeigt werden, wo in dem Verkehrsmittel die jeweils größte und kleinste Exposition mit SARS-CoV-2 während eines für das untersuchte Verkehrsmittel jeweils typischen Aufenthalts entsteht. Dazu wird eine Methodik erarbeitet, um die infizierte Person und die übrigen, nicht-infizierten Fahrgäste in der Simulation abzubilden. Ziel der Simulation ist es hierbei, eine relative Risikoabschätzung zur Ansteckungsgefahr in den verschiedenen Szenarien abzuleiten und die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minimierung dieses relativen Risikos vergleichend zu bewerten. Im Nahbereich der infizierten Person sind in allen untersuchten Fällen höhere Belastungen mit Erregern festzustellen als weiter entfernt im selben Raum bzw. Wagen. Die Höhe der Exposition variiert jedoch und hängt – neben der Fahrt- oder Aufenthaltsdauer – auch von Parametern wie dem Verhalten des Emittenten und der anderen Fahrgäste sowie technischen Maßnahmen und dem Fahrprofil mit der entsprechenden Häufigkeit der Türöffnung ab.

Es konnte gezeigt werden, dass durch betriebliche Maßnahmen wie die gesetzliche Vorschrift des konsequenten Tragens von Masken eine deutliche Reduktion der Exposition erreicht werden kann. Medizinische Masken, näher beschrieben im Abschnitt 2.3.1 und im Teil B (Arbeitspakete 1) reduzieren die Emission durch den infizierten Fahrgast und somit die Höhe der Virenbelastung um ca. 50 % und die Aufnahme von Viren durch andere Fahrgäste um ca. 30 %. FFP2-Masken reduzieren Emission und Aufnahme sogar um jeweils 90 % und mehr. Weiter bedeutend ist der Effekt, der durch unterschiedliches menschliches Verhalten bestimmt wird. So ist die Emissionsmenge mehr als 80 % geringer, wenn alle Fahrgäste während der Fahrt auf lautes Sprechen wie z. B. beim Telefonieren verzichten und dadurch die Höhe einer möglichen Viren-Emission aktiv vermindern.

Die Ergebnisse zeigen, dass technische Maßnahmen, wie z. B. eine Umluftfilterung bzw. reine Frischluftzufuhr, vor allem Fahrgästen nützt, die sich einige Reihen weiter entfernt von der infizierten Person aufhalten. Nahe am Emitter hängt die Wirksamkeit derartiger Maßnahmen vor allem vom Verhältnis der sich einstellenden Zuluftmenge im Vergleich zur Frischluftmenge ohne die Maßnahme ab. So zeigt beispielsweise eine Umluftfilterung beim ICE (Frischluftanteil 20 %) eine Reduktion der Virenkonzentration in der Nähe des Emitters um 44 %, während ein reiner Frischluftbetrieb im Regionalzug sogar zu einer lokalen Erhöhung der Virenkonzentration um den Emitter führt, infolge des geringeren Gesamt-Zuluftvolumenstroms.

1 Einführung Teil C

Vor dem Hintergrund der SARS-CoV-2-Pandemie wird derzeit diskutiert, welche Teile des öffentlichen und privaten Lebens maßgebliche Treiber des Infektionsgeschehens sind. Es hat sich gezeigt, dass alle Bereiche, in denen sich viele Menschen für eine längere Zeit in Innenräumen aufhalten und wo Abstand halten nicht immer möglich ist, Orte sind, an denen das Infektionsrisiko höher ist als beispielsweise im Freien. Aus diesem Grund steht auch die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel im Fokus.

Ziel der hier durchgeführten Studie ist es, mittels der Modellierung und durch Simulationen die relative Höhe des Risikos zu beschreiben, sich bei einem mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgast, der sich zufällig ebenfalls in demselben öffentlichen Personenverkehrsmittel aufhält, anzustecken. Mit der Simulation werden die Voraussetzungen geschaffen, Maßnahmen zur Risikoreduktion zu bewerten und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

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. Beide Begriffe werden im Folgenden synonym verwendet. 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 hier vorgestellte Simulationsstudie betrachtet beispielhaft eine repräsentative Auswahl der wichtigsten Fahrzeugtypen des deutschen öffentlichen Fern- und Nahverkehrs: Fernverkehrszüge und Fernbusse, Regionalzüge, S-Bahnen, Stadt- bzw. U-Bahnen, Straßenbahnen und Stadtbusse. Ferner werden Bahnhöfe und Haltestellen exemplarisch ober- und unterirdisch betrachtet.

Dabei bedient sich die Modellierung zum einen der Ergebnisse aus der Literaturstudie aus Teil B (Arbeitspaket 1 – AP 1), zum anderen der Messergebnisse aus im Herbst 2020 und Winter 2021 durchgeführten Feldmessungen im öffentlichen Verkehr aus Teil D (Arbeitspaket 3 – AP 3).

Aus den Ergebnissen des AP 1 wurden insbesondere typische Fahrzeugkategorien, Informationen zu Möglichkeiten und Grenzen der Anlagentechnik, Informationen zur Aerosolausbreitung, Angaben zu Fahrgastzahlen vor und nach Beginn der Pandemie sowie dokumentierte Übertragungen von SARS-CoV-2 im öffentlichen Verkehr genutzt. Aus AP 3 wurden für die Modellvalidierung CO₂-Messungen herangezogen, aus denen sich die Frischluftmengen rückrechnen bzw. Herstellerangaben verifizieren lassen.

2 Modellierungsmethode

Die in dieser Untersuchung verwendete Modellierungsmethodik wurde vom Fraunhofer IBP entwickelt und ist im Folgenden detailliert beschrieben. Es wurde ein zonales Modell zur Beschreibung der Raumluftströmung verwendet. In dem Modell wird ein mit Sars-CoV-2 infizierter Fahrgast als Quelle eingefügt. Von diesem ausgehend wird das Ausbreitungsverhalten in untersuchten unterschiedlichen Zug-, Bus- und Bahnhofstypen bestimmt. Die Grundzüge des Modellierungsansatzes werden im Folgenden dargestellt.

2.1 Zonales Modell

Die am Fraunhofer IBP entwickelte „Indoor Environment Simulation Suite“ ist ein Werkzeugkasten verschiedener Teilmodelle für die schnelle Simulation des Raumklimas. Herzstück dieser Toolbox ist das „Velocity Propagating Zonal Modell“ (VEPZO) [1], eine in vielen Fällen bezüglich der Abwägung zwischen Aufwand und Detailgrad des Ergebnisses überlegene Alternative zu aufwendig berechneten Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulationen. Dabei bedient es sich ähnlicher mathematischer Theorien, unterteilt den Raum aber in lediglich 100 bis 1.000 Volumenzonen [1]. Insbesondere für Betrachtungen wie Temperatur- und Konzentrationsfelder im Innenraum kann mit der zonalen Modellierung eine ähnliche Aussagekraft wie mit den detaillierten CFD-Simulationen erreicht werden.

Im VEPZO-Volumenmodell ist die Erhaltung skalarer Größen wie Masse, Wärme und Spurengas- und Partikel/Aerosol-Konzentration implementiert. Benachbarte Zonen sind über Strömungsmodelle verbunden, in welchen die Menge der ausgetauschten Luft berechnet wird. Durch dreidimensionale Anordnung der Volumen- und Strömungsmodelle wird ein Raum zonal dargestellt (Abbildung 1), um Rückschlüsse auf die Temperatur-, Stoff- und Luftstromverteilung zu ziehen.

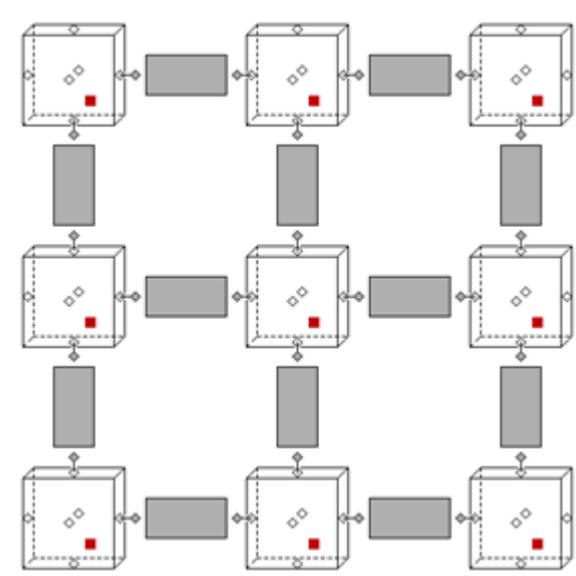


Abbildung 1: Schematische 2D-Darstellung eines zonalen Modells: Unterteilung des Raums in Zonen (Würfel), die über Strömungsmodelle (grau) miteinander verbunden sind. (Bildquelle: Fraunhofer IBP, 2021).

2.1.1 Strömungs- und Volumenmodell

Eine detaillierte Darstellung des verwendeten zonalen Ansatzes mit den Strömungs- und Volumenmodellen findet sich in [1]. Im Volumenmodell sind die Erhaltungsgleichungen für Masse, Wärme und Spurengase aufgestellt. Für die Massenerhaltung werden die über die Zonengrenzen strömenden Luftmengen addiert. Im stationären Zustand ergibt sich für die Summe aller zu- und abfließenden Luftmengen Null. Für die Wärmeerhaltung werden in Gleichung (1) die inneren Lasten sowie die über die Zonengrenzen strömenden Enthalpien summiert. Dadurch ergibt sich der transiente Verlauf der Enthalpie und über die Zustandsgleichungen von Luft die Temperatur.

$$V_i \cdot \rho_i \cdot \dot{h}_i = \sum_{j=1}^6 \dot{m}_j \cdot h_{i/j} + \sum \dot{Q}_{Quellen} \quad (1)$$

Mit: V_i, ρ_i, \dot{h}_i : Volumen, Dichte und Enthalpieänderung der Zone i , \dot{m}_j : Massenstrom von der benachbarten Zone j (positiv: einströmend, negativ: ausströmend), $h_{i/j}$ Enthalpie der Zone i oder j , je nach Strömungsrichtung, $\dot{Q}_{Quellen}$: Wärmestrom von Quellen, z. B. Wärmeabgabe von Personen, konvektiver Austausch mit Umschließungsflächen, etc.

Die Erhaltungsgleichungen für Spurengase, Partikel und Aerosole in der Luft sind analog zur Enthalpieerhaltung implementiert.

Das Strömungsmodell berechnet die zwischen zwei benachbarten Zonen ausgetauschte Luftmenge basierend auf der Druckdifferenz, der Impulsdifferenz, dem Höhenunterschied sowie einem viskosen Verlustterm.

Das Strömungsmodell verbindet zwei benachbarte Zonen. Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit werden in Gleichung (2) die Kräfte aufsummiert, die auf den Strömungsweg wirken und die resultierende Beschleunigung der Strömung ermittelt. Um die Verluste der Strömung zu modellieren, wird ein viskoser Term eingeführt. Die dem Strömungspfad zugrundeliegende Gleichung wird für die x-Koordinatenrichtung gezeigt, ist aber entsprechend auch für die anderen kartesischen Koordinatenrichtungen gültig:

$$\dot{u} = -\frac{\Delta p_{i,j} + \Delta(u^2)_{i,j} + g \cdot \Delta z_{i,j}}{\Delta x} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\Delta}{\Delta z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Mit: \dot{u} : Beschleunigung der Luft in x-Richtung (im stationären Zustand 0), $\Delta p_{i,j}$, $\Delta(u^2)_{i,j}$, $\Delta z_{i,j}$: Druckdifferenz, Differenz der Geschwindigkeitsquadrate und Höhendifferenz zwischen den Zonen i, j , g : 9,81 m/s², ρ : Dichte der strömenden Luft, μ : Kalibrierparameter für die effektive Viskosität (0,001).

2.1.2 Modellerstellung

Als Hilfsmittel für die Modellerstellung wird das Thermal Model Generation Tool genutzt. Ausgehend von einer Geometriedatei des zu simulierenden Innenraums wird die Zonierung in x-, y-, und z-Richtung festgelegt sowie die Lage von Strömungsquellen und -senken sowie Wärmelasten festgelegt. Das Tool erstellt daraufhin automatisiert den Modelica-Quellcode des zonalen Modells. Für die Simulation müssen anschließend noch die Quellstärken sowie die Wärmedurchgangswiderstände der Umschließungsflächen festgelegt werden.

2.1.3 Modellauswertung

Im Rahmen dieses Projektes wird v. a. die Last an potentiell infektiösem Material in der Luft innerhalb der Fahrzeuge und der Luft an Bahnabschnitten ausgewertet. Als Maß wird das sogenannte Quanta genutzt, eine fiktive Beschreibung für die emittierte Virus-Menge durch eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person. Die Maßeinheit Quanta wird in Abschnitt 2.2 mit Quellenangabe näher erläutert. Die errechnete Quanta-Konzentration wird für jede einzelne Zone als Ergebnis exportiert und als Zahlenwert dargestellt. Zudem wird die in der Simulation vorhergesagte Konzentration wie in Abbildung 2 gezeigt als Farbverlauf hinterlegt, von grün (ab 0 Quanta/m³) über gelb (bei 20 Quanta/m³) bis rot (ab 50 Quanta/m³).

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zonen (y)	1	15	15	16	17	19	22	20	18	15	14	13	13	13	13	13
	2	16	16	17	19	23	32	63	20	16	14	15	14	13	13	13
	3	16	16	17	19	21	26	25	20	15	15	14	14	14	14	14
	4	16	15	16	18	19	21	19	18	14	14	14	13	13	13	14
	5	15	14	14	15	17	19	16	15	14	15	14	13	13	13	14

Abbildung 2: Beispiel zur Auswertung / Darstellung der Simulation: Gezeigt ist die Konzentration in Quanta/m³ in einem Schnitt durch das Abteil auf Atemhöhe.

Die Exposition wird an ausgewählten Plätzen durch Integration der Konzentration über der Aufenthaltszeit, gewichtet mit dem Atemvolumen und der Schutzwirkung durch Masken wie in Gleichung (3) dargestellt, ermittelt. Ausgewertet werden hierbei jeweils die Nachbarzone des Emittenten mit der höchsten Konzentration (max. Dosis) sowie eine vom Emittenten weit entfernte Zone (min. Dosis). Als Maß für die Dosis wird das Milli-Quanta genutzt, wobei 1.000 Milli-Quanta einem Quanta entsprechen (vgl. Abschnitt 2.2).

$$Dosis = \dot{V}_{Atmung} \cdot f_{Maske} \cdot \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} c_i(t) dt \quad (3)$$

Mit: \dot{V}_{Atmung} : Atemmenge, hier 540 l/h (leichte, sitzende Tätigkeit, [2]), f_{Maske} : Eigenschutzwirkung je nach Maskentyp (Abschnitt 2.3.1), $c_i(t)$: Zeitlich aufgelöster Verlauf der Konzentration in der ausgewerteten Zone i , t_{Start} , t_{Ende} : Beginn und Ende der Exposition.

2.2 Abbildung der infektiösen Person

Für die Bewertung des Ansteckungsrisikos mit SARS-CoV-2 wurden drei prinzipielle Ansätze zur Modellierung der infektiösen Person in der Literatur gefunden [2–8]. Diese betrachten die Quellstärke der Person durch die abgegebene:

- Quantamenge
- Partikelmenge
- Aerosolmenge

Diese Mengen variieren je nach Tätigkeit: Atmen, Sprechen, laut Sprechen. Da dies den typischen Aktivitäten der Fahrgäste im ÖV entspricht und während der Projektlaufzeit eine öffentliche Diskussion zu einem Erfordernis bzw. Gebot, im ÖV möglichst zu schweigen, aufkam [9], wurden auch diese Parameter in den Simulationen vergleichend gegenübergestellt.

Die Quanta-Quelle ist ein fiktives, rückgerechnetes Maß, das auf [3, 4] zurückgeht. Per Definition hat eine vulnerable Person nach der Aufnahme von 1 Quanta bei einem Aufenthalt in einem Raum mit SARS-CoV-2 Belastung ein Risiko von 63 %, sich anzustecken. Für die Risikobewertung geben die Autoren ein Formelwerk an, das die Berechnung eines theoretischen Infektionsrisikos im öffentlichen Personenverkehr erlaubt. Hiervon zu unterscheiden ist jedoch das tatsächlich resultierende medizinische Infektionsrisiko eines Individuums, welches auf diese Weise nicht berechnet oder angegeben werden kann.

Das medizinische Infektionsrisiko einer Person ist von vielen verschiedenen individuellen Faktoren mit starken Wechselwirkungen wie dem Immunstatus, Alter, Geschlecht, Vorerkrankungen, Schwangerschaft, eingenommene Medikamente etc. abhängig. Da sich diese Faktoren stark von Individuum zu Individuum unterscheiden, kann die Ausbreitungssimulation von SARS-CoV-2-Emissionen resultierende Risiken nur relativ zueinander abbilden. Die Einschätzung bzw. Bestimmung des medizinischen Infektionsrisikos eines Individuums kann allein durch den behandelnden Arzt mit Kenntnis einer Vielzahl von individuellen Faktoren genau dieser Person abgeschätzt werden und dies auch nur in einem gewissen Ausmaß aufgrund „versteckter“ Faktoren, wie etwa Genetik.

Im Folgenden wird daher von einem theoretischen Infektionsrisiko ausgegangen, das für alle im Verkehrsmittel anwesenden Personen ohne Kenntnis der persönlichen Risikofaktoren angegeben wird. Hierfür werden die in verschiedenen Szenarien errechneten Quanta-Dosen vergleichend einander gegenüber gestellt mit der Annahme, dass eine höhere Dosis stets zu einem höheren Risiko führt. Die Emissionsstärke wird für verschiedene Aktivitätslevel in Quanta/h angegeben, wobei die Studie zeigt, dass sogenannte Superemitter (oder „Superspreader“) auch um den Faktor 100 höhere Emissionen ausscheiden können. In einem Excel-Rechentool hat [5] die in Tabelle 1 aufgeführten mittleren Emissionsraten fixiert.

Die Probandenstudie zur Ermittlung der emittierten Partikelmenge nach [6] für verschiedene Sprechlautstärken wurde bereits Anfang 2019 publiziert, d. h. vor dem Beginn der Covid-19-Pandemie. In dieser Publikation sowie auch der von [7] wird darauf hingewiesen, dass einzelne Superemitter auch deutlich höhere Mengen an Partikeln abgeben können als der Durchschnitt. Man spricht von Überdispersion in der Statistik.

In einem Whitepaper adaptieren [2] den Quanta-Ansatz und beschreiben die Emission über die abgegebene Aerosolmenge. Eine theoretische Risikobewertung erfolgt ähnlich wie bei [3, 4] und wird mit der

Betrachtung der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines Infizierten ergänzt. Das dabei angewendete Verfahren entspricht etwa dem Lose-Ziehen¹. Hauptannahme ist die generelle Wahrscheinlichkeit, mit SARS-CoV-2 infiziert zu sein. Eine eingehende Diskussion der Auswirkung eines Superemitters erfolgt in dieser Publikation nicht.

In Tabelle 1 sind die Emissionswerte je nach Betrachtungsweise vergleichend gegenübergestellt und bewertet. Um den Einfluss der drei Betrachtungsweisen abzuschätzen, wurden die ermittelten Emissionsraten für Atmen, Sprechen und laut Sprechen jeweils zueinander ins Verhältnis gesetzt (Abbildung 3). Dabei entspricht laut Sprechen 100 %. Je nach Betrachtung entspricht hierbei Atmen 2 % - 4 % der Emissionsstärke von laut Sprechen, Sprechen entspricht 16 % - 23 %. Somit wird unabhängig vom gewählten Quellterm eine etwa gleichbleibende Abstufung zwischen den Aktivitätsgraden erwartet. Da die Quanta-Betrachtung speziell für SARS-CoV-2 entwickelt wurde und auch einen Bezug zu Superemittern liefert, wurde dieser Quellterm für die Simulation gewählt. Somit werden im Folgenden die Aktivitätslevel durch die in Tabelle 1, Spalte 2 aufgeführten Werte genutzt. Diese werden als unidirektionale Quelle im Modell implementiert.

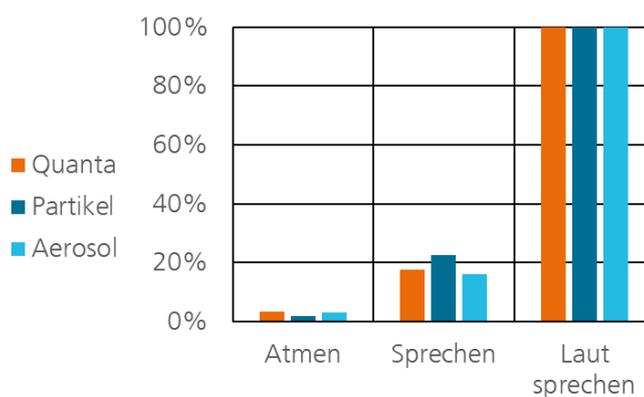


Abbildung 3: Relativer Vergleich der Ansätze, den Emittenten als Quanta-, Partikel- oder Aerosolquelle zu beschreiben.

Entsprechend einer vergleichenden Zusammenstellung in [10] wird für die CO₂-Emission eines Passagiers 18 l/h angesetzt. Dieser Wert wird bei der Validierung der Simulationen für die interne Last genutzt.

¹ Vergleichendes Beispiel zum Verfahren nach [2]: Wie wahrscheinlich ist mindestens ein Gewinn unter 25 zufällig gezogenen Losen.

TABELLE 1: VERGLEICH DER QUELLENBESCHREIBUNG DES EMITTENTEN

	Quanta		Partikel		Aerosol	
Quelle	[5]	[3, 4]	[6]	[7]	[2]	[8]
Atmen	2,3 Quanta/h		0,1 Partikel/s	Normal: 14-71 Partikel/l	0,0018 ml/m ³	Online Rechner, basiert auf [2], Nutzung eines stochastischen Ansatzes für Risikobewertung.
Sprechen	11,4 Quanta/h	Doppellogarithmische Plots und Angaben zu Perzentilen	1,2 Partikel/s		0,0096 ml/m ³	
Laut Sprechen	65,1 Quanta/h		5,3 Partikel/s Max.: 17 Partikel/s		0,06 ml/m ³	
Superemitter		Faktor 10 ²	660-3.230 Partikel/l (Faktor 10 ²)	660-3.230 Partikel/l (Faktor 10 ²)		
Bewertung	Erlaubt Superemitter-Bewertung Theoretische Risikobewertung, speziell für SARS-CoV-2 eingeführt		Referenz-Literatur ist nicht SARS-CoV-2-spezifisch. Divergierende Angaben zu Superemittern.		Keine Angabe zu Superemittern. Theoretische Risikobewertung abgeleitet, speziell für SARS-CoV-2 eingeführt.	

2.3 Abbildung von Einflussfaktoren

2.3.1 Masken

Das Tragen von Masken wird als wirksame Maßnahme zur Reduktion der Verbreitung von SARS-CoV-2 angesehen. Viele Maskentypen und Gesichtsbedeckungen, die zu Beginn der Pandemie im Umlauf waren, wie z. B. Visiere, sind mittlerweile nicht mehr erlaubt. Auch in einem aktuellen Review [11] wird das Tragen von Masken in öffentlichen Räumen empfohlen. Daher wurden folgende drei Maskentypen in Simulationen mit einbezogen:

- Ohne Maske
- Medizinischer Mund-Nasen-Schutz (MNS) und Alltagsmasken
- FFP2-Maske

In die Simulation der Maskentypen fließen jeweils die Schutzwirkung bei der Abgabe von Aerosolen und Partikeln, also eine prozentuale Reduktion des Quellterms, sowie die Schutzwirkung bei der Aufnahme, also die Reduktion der aufgenommenen Dosis. Die in die Simulation eingeflossenen Werte sind in Tabelle 2 angegeben.

Der Begriff FFP steht für das englische Face Filtering Piece, auf Deutsch: Atemschutzmaske. FFP-Masken werden in Deutschland genormt nach [12] in drei Filterklassen FFP1, 2 und 3 angeboten. Masken vom Typ FFP2 und FFP3 bieten dem Träger mit 92 % respektive 99 % den höchstmöglichen Schutz gegen Partikel in der Luft, wie auch Schutz gegen die gefährlichen Aerosole in der Umgebungsluft. Sie reduzieren zudem wirksam auch die Menge einer möglichen Viren-Emission. Für die FFP2-Maske sind in [13] Durchschnittswerte angegeben, bei korrekter Handhabung kann eine Schutzwirkung bis 99 % erreicht werden. Ähnlich zeigen [14], dass N95-Masken eine Reduktion der abgegebenen Aerosolmenge um 92 % bis 98 % erreichen. Für den medizinischen Mund-Nasen-Schutz wurden nur Angaben zur Reduktion der Abgabe zwischen 45 % [14] und 65 % [5] gefunden, allerdings keine Angabe zur Reduktion der Aufnahme. Es wird davon ausgegangen, dass die Filterwirkung von Alltagsmasken, auch Community-Masken genannt, die am Beginn der Pandemie weit verbreitet eingesetzt werden mussten, da Masken mit besserer Filterwirkung noch nicht in genügender Stückzahl für die gesamte Bevölkerung verfügbar waren, dem der medizinischen Maske vergleichbar sind. All diese Maskentypen werden im Folgenden unter MNS zusammengefasst und mit in [13] aufgeführten Werten bemessen.

Um die unterschiedlichen Maskentypen vergleichend gegenüber zu stellen, wird davon ausgegangen, dass alle Personen im Verkehrsmittel oder am Bahnsteig jeweils den gleichen Maskentyp verwenden.

TABELLE 2: REDUKTIONSWIRKUNG DURCH MASKEN [13]

Maskentyp	Reduktion der Abgabe	Reduktion der Aufnahme
keine	0 %	0 %
MNS bzw. Alltagsmaske	50 %	30 %
FFP2-Maske	90 %	90 %

2.3.2 Lüftungstechnik

Die Lüftungstechnik wird in ihrer Wirkweise im Modell dargestellt. Die Zuluft ist dabei eine Mischung aus Frischluft, die frei von SARS-CoV-2-Viruspartikeln ist, und Umluft, deren Konzentration sich entsprechend der angesaugten Luft im zonalen Simulationsmodell ergibt. Etwaige Filter- und Reinigungseinrichtungen in der Umluft wirken sich im Modell durch eine prozentuale Reduktion der Erregerkonzentration in der Umluft aus. Wird beispielsweise eine Filterwirkung von 80 % angenommen, wird die Umluft im Modell mit einer Resterregerkonzentration von 20 % der in der abgesaugten Luft vorhandenen zugeführt.

2.3.3 Luftaustausch durch offene Türen

Hauptantreiber für den Luftaustausch durch geöffnete Türen ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Wageninneren und der Außenluft. Diese führt bei Türöffnung dazu, dass kühle Luft im unteren Bereich der Tür in den Wagen einströmt, während wärmere Luft den Wagen im oberen Bereich verlässt. Die Formeln für den temperaturgetriebenen Luftaustausch an einer rechteckigen Öffnung werden in [15] hergeleitet.

$$\dot{V}_{Tür} = \frac{1}{3} \cdot C_D \cdot B \cdot \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H^3}{T_m}} \quad (4)$$

Mit: $\dot{V}_{Tür}$: Volumenstrom durch geöffnete Tür, B: Lichte Breite, H: Lichte Höhe, ΔT : Temperaturdifferenz, T_m : Mittlere Temperatur, $g = 9,81\text{m/s}^2$, C_D = Druckverlustbeiwert.

C_D ist der Druckverlustbeiwert bzw. Einschnürfaktor und beschreibt letztendlich den Strömungswiderstand der Türöffnung. Als typische, konservative Annahme wird hier $C_D = 0,4$ gesetzt. Für die Innentemperatur werden 23 °C angenommen, für die Außentemperatur der deutschlandweite Mittelwert von 9,1 °C, basierend auf dem Winterreferenzjahr bzw. 16,6 °C für das Sommerreferenzjahr [16]. Die Außentemperatur im U-Bahn-Tunnel wurde aufgrund einer Messung in AP 3 (27.01.2021, U-Bahnhof Sendlinger Tor) mit 15 °C abgeschätzt.

Eine Modellierung offenbarer Fenster wurde nicht durchgeführt, da nicht alle Fahrzeuge über diese verfügen, deren Form sich mitunter stark unterscheidet und die tatsächliche Öffnung in der Betriebspraxis schwer sicherzustellen ist.

2.3.4 Trennwände

Trennwände als Strömungshindernis werden im Modell implementiert, indem im geometrisch nahegelegenen Strömungspfad der Parameter der lichten Fläche reduziert wird. Bei einer luftdichten Abtrennung werden der entsprechende Strömungspfad und somit der Luftaustausch zwischen den betroffenen, benachbarten Zonen händisch aus dem Modell entfernt.

2.3.5 Belegungsichte

Die Belegungsichte geht als Parameter für die Wärmefreisetzung im Innenraum ein. Bei Klima- und Lüftungsanlagen, die im Festvolumenstrombetrieb betrieben werden, hat die Belegungsichte keinen Einfluss auf die Zuluftmengen. Bei bedarfsgeführten Anlagen (z. B. ICE) passt sich die Frischluftmenge an die Belegungsichte an.

Intuitiv ist davon auszugehen, dass das Risiko, dass eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person anwesend ist, bei höherer Belegung größer ist. Allerdings ließe sich dieses Risiko nur quantifizieren, wenn die tatsäch-

liche Wahrscheinlichkeit bekannt wäre, dass eine Person unentdeckt SARS-CoV-2 positiv ist. Dieser Zahlenwert ist jedoch unbekannt. Eine Verwendung des Inzidenzwertes ist ebenfalls unzulässig. Die Inzidenz beschreibt die Anzahl von Neuinfektionen in einem bestimmten Zeitraum. Es wird davon ausgegangen, dass alle Personen, die positiv auf das Virus getestet wurden, sich in Quarantäne befinden und bewusst darauf verzichten, am öffentlichen Personenverkehr teilzunehmen. Ob diese Annahme wirklich zutrifft, ist ebenfalls unbekannt.

Mangels Quantifizierbarkeit kann die Belegungsdichte im Sinne einer Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgasts als Risikofaktor in dieser Studie nicht bewertet werden.

2.3.6 Erregerübertragung durch Oberflächen (Schmierinfektion)

Die Auswertung der Literatur in AP 1 (vergl. Teil B) hat ergeben, dass die Rolle der Erregerübertragung durch Oberflächen für SARS-CoV-2 im Vergleich zur Übertragung über Tröpfchen und Aerosole von eher untergeordneter Bedeutung ist. Bis dato konnten aus keiner der in AP 3 (Teil D) genommen Proben Daten gewonnen werden, die einen Aufbau und eine Validierung eines Prädiktormodells hierzu erlauben. Das bedeutet, dass mit dem aus dieser Studie resultierenden Modell die Übertragung von SARS-CoV-2 über Schmierinfektion im ÖV derzeit nicht modellierbar ist. Weitere Details dazu finden sich in Abschnitt 5.4.

2.4 Bestimmung der Zug-, Bus- und Bahnhofstypen

2.4.1 Vollbahnen (Fern- und Regionalverkehr)

Tabelle 3 zeigt das Ergebnis einer Erhebung, die durchgeführt wurde, um für dieses Projekt repräsentative Zugtypen auszuwählen [17–19]. Aufgrund dessen wurde als Referenzzug für den Fernverkehr der ICE-Großraumwagen und für den Nahverkehr ein Triebzug gewählt. Für den Triebzug Talent 3 liegen beim Projektpartner Alstom umfangreiche Daten aus detaillierten Strömungssimulationen vor, so dass die Wahl auf diesen Vertreter der Triebzüge fiel. Das zahlenmäßig am häufigsten vorkommende Talentmodell ist der Talent 2, der allerdings über ein vergleichbares Belüftungssystem verfügt. Sofern für die in dieser Studie nicht betrachteten Zugfabrikate ähnliche Lüftungssysteme installiert sind, können die simulierten Ergebnisse auch auf diese Fabrikate übertragen werden. Hierfür müssen jeweils die Frisch- und Umluftmenge, die Form der Luft einbringung sowie der Fahrzyklus mit den hier genutzten Eingangsdaten verglichen werden.

TABELLE 3: KATEGORISIERUNG DER ZUGTYPEN IM FERN- UND REGIONALVERKEHR

	Anzahl Züge	Anzahl Wagen	Anteil Abteile	Anteil Doppelstockwagen
Fernverkehr: ICE	386	3.558	25 %	0 %
Fernverkehr: IC	-	1.200	30 %	17 %
Regionalverkehr: Triebzüge	4.067	11.261	0 %	2 %
Regionalverkehr: Reisezugwagen	-	2.738	3 %	60 %

2.4.2 U-Bahnen, Stadt- und Straßenbahnen

Die derzeit häufigsten U-Bahn- bzw. U-Stadtbahntypen bestehen nach einer Recherche und statistischen Auswertung [20] aus Wagen mit 15 m bis 30 m Raumlänge (Abbildung 4). Zu dieser Kategorie gehören z. B. die Münchener U-Bahn Triebfahrzeuge der Baureihe A. Neuere U-Bahnmodelle, wie beispielsweise die Baureihe C der Münchener U-Bahn, bestehen nicht mehr aus einzelnen abgetrennten Waggons, sondern sind durchgängig und haben somit eine Raumlänge von 100 m und mehr. Da eine Zunahme dieser Zugtypen erwartet wird, wurde dieser Typ mit in die Studie aufgenommen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bahnen ist gegeben, wenn sich die Frischluftmengen, die Form der Lufteinbringung und der Fahrzyklus den hier betrachteten Beispielen ähneln.

Als Straßenbahn wurde das Berliner Flexity-Modell mit einer ungefähren Raumlänge von 30 m simuliert. Dieser Fahrzeugtyp ist basierend auf seiner Fahrzeuglänge (Abbildung 5) nach einer Recherche und statistischen Auswertung [20–24] der in Deutschland am häufigsten vorkommende Straßen- bzw. Stadtbahntyp.

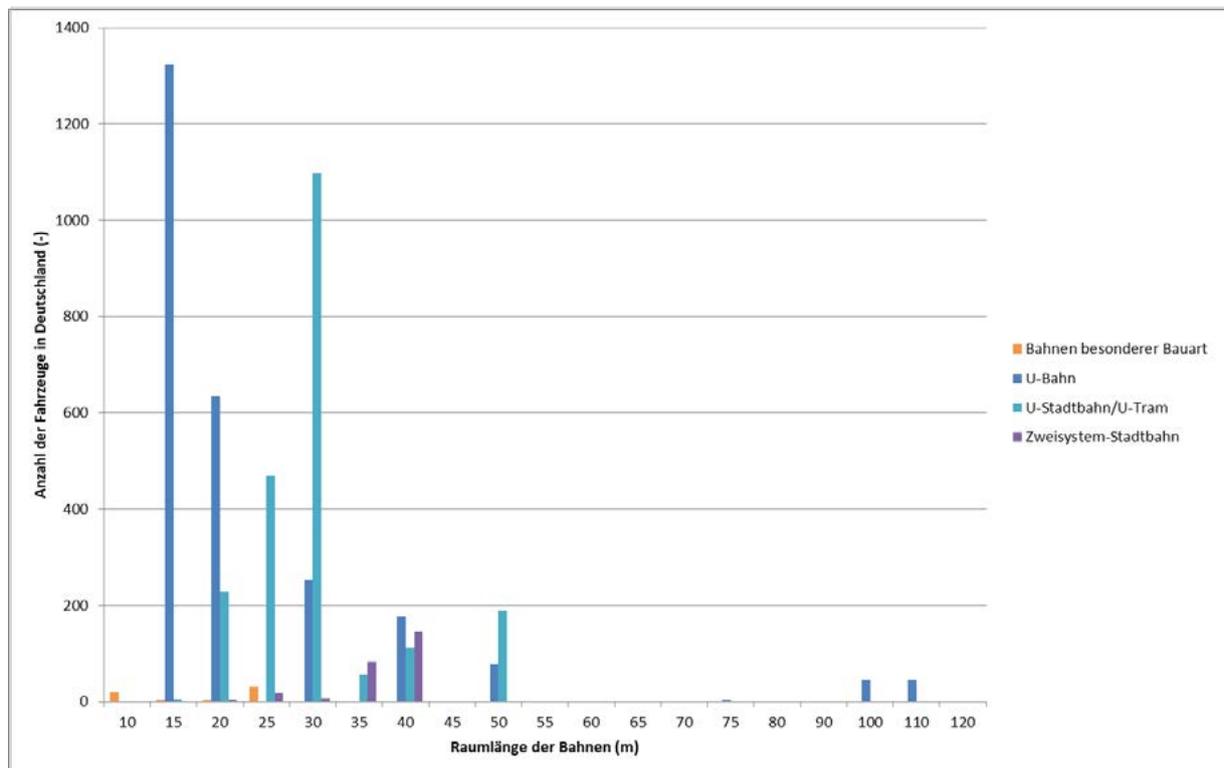


Abbildung 4: Häufigkeit des Vorkommens verschiedener U-Bahn- und U-Stadtbahntypen, ohne Straßenbahnen [20].

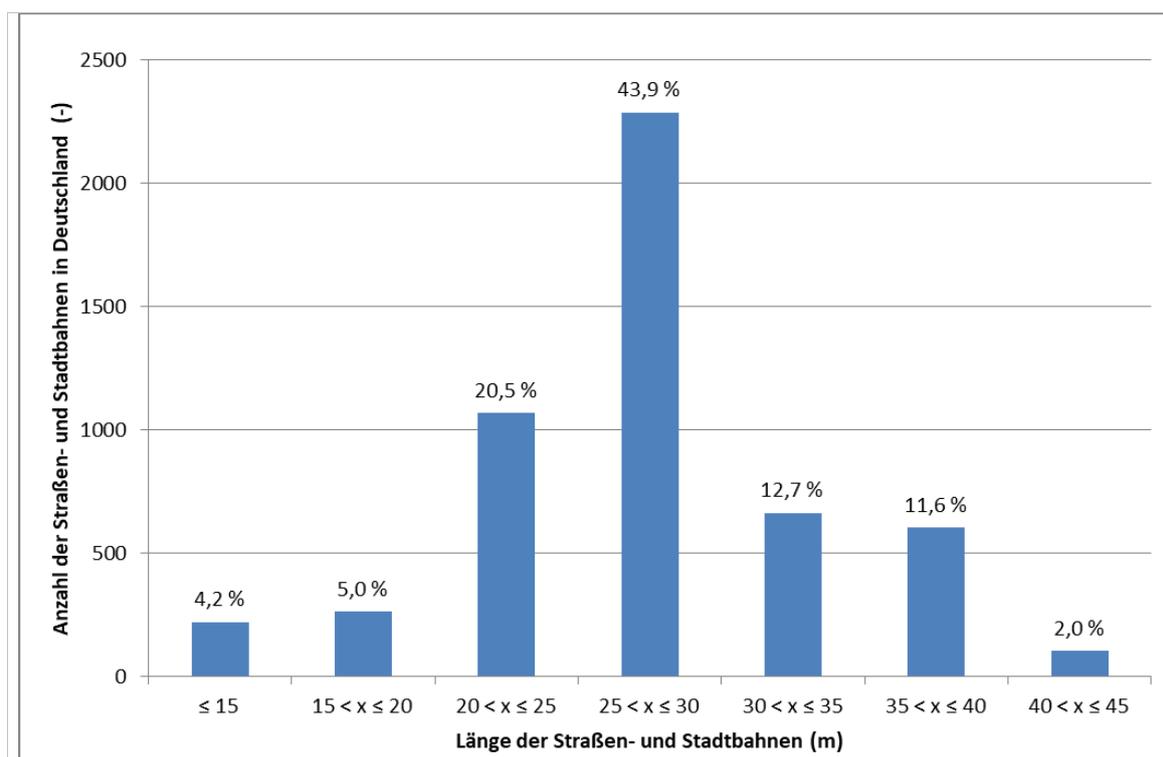


Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der Fahrzeuglängen bei Straßen- und Stadtbahnen, ohne U-Bahnen [20–24].

2.4.3 S-Bahnen

Im Vergleich zu den typischen U-Bahnen aus den großen Ballungsräumen wie z. B. in München, Berlin oder Hamburg werden die dort verkehrenden S-Bahnen nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) und nicht nach der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) betrieben. Demzufolge gehören die Fahrzeuge zur Kategorie der Vollbahnen. Gleichwohl sind die Fahrzeuglängen durchaus miteinander vergleichbar, so dass die typischen S-Bahn-Fahrzeuge hinsichtlich des Innenraums durch die Simulationen mit den Fahrzeugen der Baureihe A und C der Münchner U-Bahn mitberücksichtigt werden. Ebenfalls werden in kleineren Städten und Regionen wie z. B. in und um Rostock oder Leipzig häufig Triebwagen, welche auch als Regionalverkehr verkehren, als S-Bahnen genutzt. Diese S-Bahn-Fahrzeugtypen werden durch die Simulation mit dem Fahrzeugmodell Talent 2 berücksichtigt.

Hauptunterschied zum Regionalverkehr ist bei diesen Fabrikaten, dass baulich eine weitere Tür je Seite für das beschleunigte Ein- und Aussteigen existiert sowie, dass betrieblich bedingt die S-Bahn häufiger hält mit entsprechend häufigeren Türöffnungen.

2.4.4 Stadt- und Reise-/Fernbus

Für den Stadtbus wurde ein 12-m-Bus simuliert, da dieser in Deutschland das am häufigsten vorkommende Modell ist [24]. Für den Fernbus fiel die Wahl auf einen FDH2 Reisebus entsprechend der Möglichkeit, mitten in der Pandemie, mit weitgehender Stilllegung der Fernbusflotten, einen solchen Bus im Rahmen von Feldmessungen in AP 3 mit dem Messteam und Fahrgästen zu begleiten.

2.4.5 Stationen und Bahnhöfe

Um die Bahnhofssituation abzubilden, wurde entsprechend der größten Häufigkeit von Bahnstationen aus dem Zuständigkeitsbereich der BOStrab (Abbildung 6, nach [25]) ein U-Bahnsteig in Tieflage mit Mittelbahnsteig gewählt. Hier verlaufen die Gleise links und rechts vom Bahnsteig.

Da Messungen in AP 3 frühzeitig zeigten, dass an außenliegenden Bahnsteigen keine erhöhten CO₂-Werte gegenüber der Außenluft festzustellen sind, wurde für den außenliegenden Bahnsteig als limitierender Fall eine Bahnhofshalle mit Wendekopf gewählt. Bei der Simulation wurde sich an den Hauptbahnhof München angelehnt, wobei die Ergebnisse auch auf andere Kopfbahnhöfe wie z. B. Frankfurt Hbf. oder Leipzig Hbf. übertragbar sind. Aufgrund der Möglichkeit zum Durchzug sind oberirdische Durchgangsbahnhöfe (z. B. Köln Hbf.) bzw. kleinere Bahnhöfe oder Bushaltestellen als weniger kritisch anzusehen und wurden daher nicht weiter betrachtet.

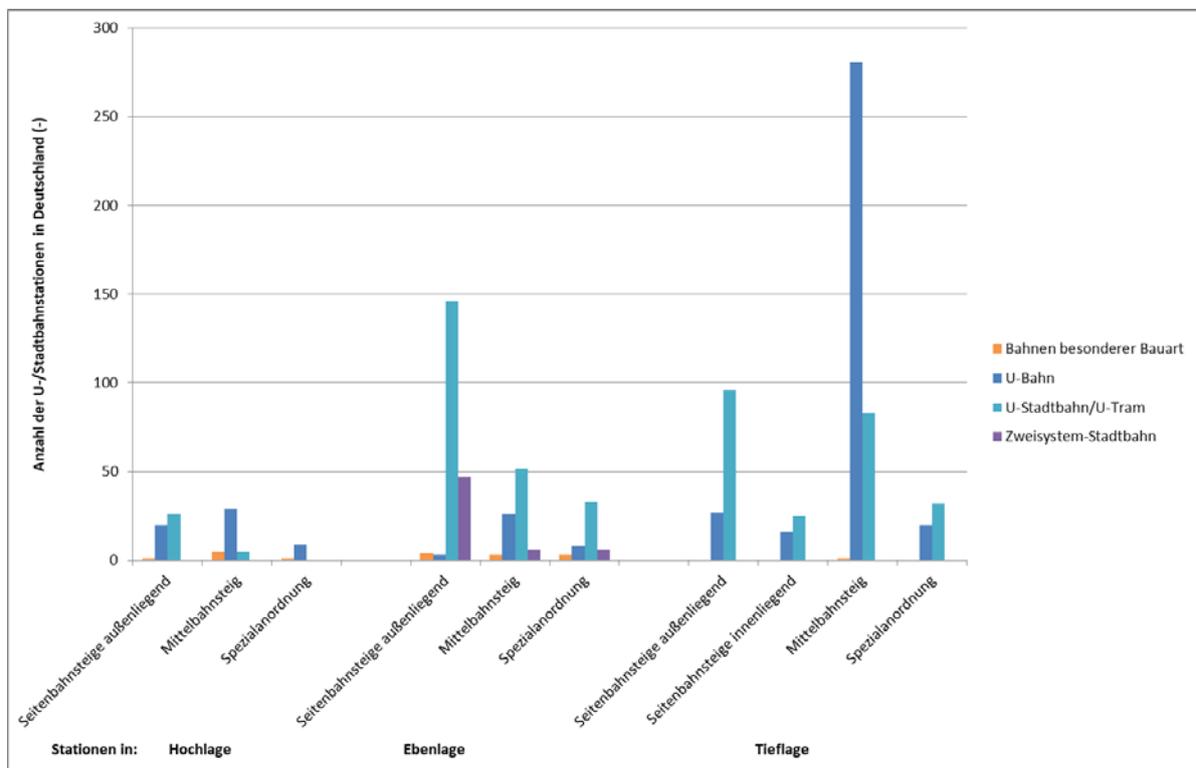


Abbildung 6: Verteilung von Stationstypen in Deutschland im Zuständigkeitsbereich der BOStrab [25].

3 Simulationsstudie

Die Simulationsstudie wurde an insgesamt acht verschiedenen Verkehrsmitteln des ÖV und zwei Bahnhofstypen durchgeführt mit der für das jeweilige Verkehrsmittel typischen ermittelten Fahrdauer. Die typische maximale Aufenthaltsdauer am Bahnsteig (8 - 35 Minuten) wurde der Literatur entnommen [26]. In der Simulation wird die Emission eines mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgasts an einem beispielhaft etwa mittig ausgewählten Platz betrachtet. Für jede Simulation werden die Eingangsdaten beschrieben. Diese Daten werden dann anhand vorhandener Herstellerdaten oder durch CO₂-Messungen aus AP 3 validiert und die Hauptergebnisse der Simulation ausgewertet. Die Auswertung erfolgt jeweils in Bezug auf die Aktivität (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) des SARS-CoV-2-infizierten Passagiers und nach Maskentyp. Daraufhin wird der Einfluss der Umluftfilterung betrachtet sowie der Frischluftmenge. Es werden zusätzlich der Heiz- und der Kühlfall im jeweiligen Verkehrsmittel untersucht, falls diese sich bei der Luftführung unterscheiden. Von Interesse war auch die Fragestellung, welchen Einfluss eine Abteilkonstruktion auf die Exposition haben würde im Vergleich zu Großraumwagen. Eine weitere Fragestellung war die Höhe und Dauer der Restexposition, wenn sich ein infektiöser Emittent für eine gewisse Zeit in einem Verkehrsmittel aufhält und es anschließend wieder verlässt.

3.1 Fernzug (ICE)

3.1.1 Eingangsdaten

Betrachtet wird ein typischer ICE-Großraumwagen. Der ICE zeichnet sich durch eine bedarfsgeführte Lüftung aus, d. h. die Frischluftmenge wird an die Belegung angepasst. Im Modell wird ein Großraumwaggon dargestellt, in dem sich eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person befindet (Abbildung 7). Der Waggon wurde in 13 x 5 x 5 (x: Länge, y: Breite, z: Höhe) Zonen unterteilt.

Im Heizbetrieb (Abbildung 7, oben) strömt die Luft überwiegend in den hellgrünen Zonen unterhalb der Seitenfenster, zu einem kleinen (hier vernachlässigten) Teil auch im Deckenbereich, ein und wird oberhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen über Schattenfugen abgeführt. Im Kühlbetrieb (Abbildung 7, unten) strömt die Zuluft ausschließlich in den hellgrünen Zonen im Deckenbereich ein und wird wie im Heizbetrieb abgeführt. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Strömungsbilder im Waggon.

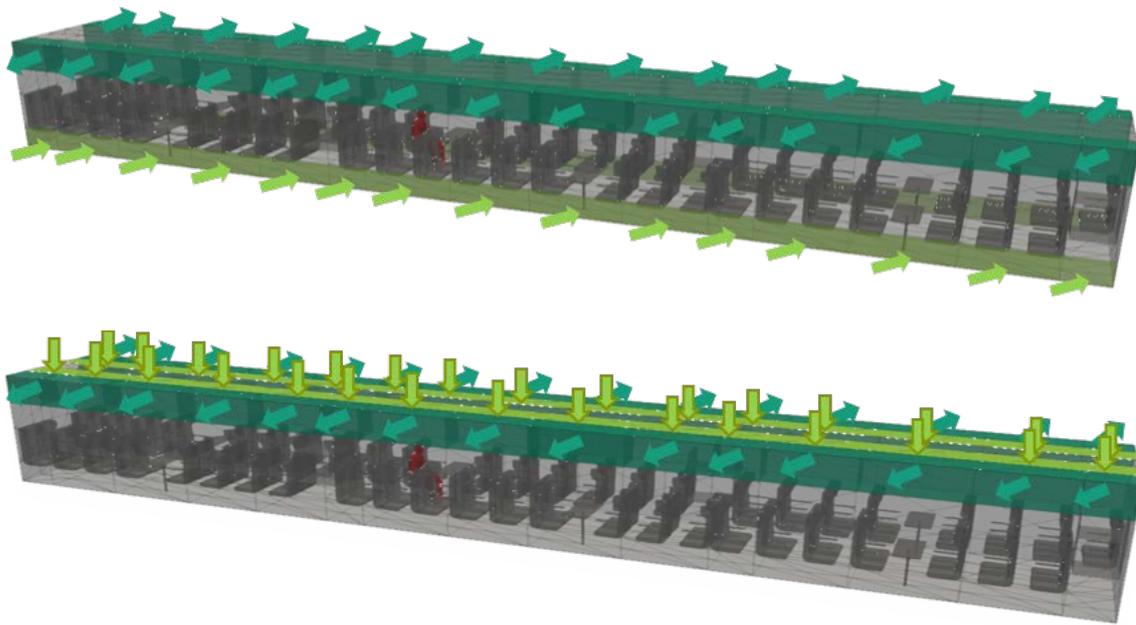


Abbildung 7: Darstellung im zonalen Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- (oben) und Kühlbetrieb (unten), angelehnt an den ICE 4. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrüne Pfeile: Abluft, rot markierte Person: Emmitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Die betrachteten Lüftungsszenarien sind in Tabelle 4 dargestellt. Hierbei wird insbesondere der Effekt der Frischluftmenge, der Betriebsart und der Aufrüstung des Umluftsystems mit einem gegen SARS-CoV-2 geeigneten Filter und einer durch den erhöhten Druckverlust resultierenden Reduktion der Umluftmenge betrachtet. Zusätzlich wird betrachtet, wie sich ein Abteil auf die Ausbreitung auswirken würde sowie das Abklingverhalten, wenn der Emmitter den Waggon verlässt.

TABELLE 4: SIMULATIONSFÄLLE UND EINGANGSDATEN FÜR EINEN TYPISCHEN ICE-GROßRAUMWAGEN

Randbedingung Lüftung	HVAC* Heizen 100 % Belegung	HVAC Heizen 50 % Belegung	Min. Frischluft nach Feldmessung AP 3	Filterung 50 % Belegung	Nur Frischluft (Free Cooling)	HVAC Kühlen 50 % Belegung
Frischluftmenge	1.500 m ³ /h*	750 m ³ /h	500 m ³ /h	675 m ³ /h	2.800 m ³ /h	750 m ³ /h*
Umluftmenge	2.100 m ³ /h*	2.850 m ³ /h	3.100 m ³ /h	2.565 m ³ /h	0 m ³ /h	3.850 m ³ /h*
Filtereffizienz	-	-	-	80 % gegen SARS-CoV-2	-	-
Verhältnis Frisch-/Umluft	bedarfsgeführt auf CO ₂ -Zielwert von 1.580 ppm	bedarfsgeführt auf CO ₂ -Zielwert von 1.580 ppm	Minimale Einstellung Frischluft	entsprechend HVAC Heizen 50 % Belegung	-	bedarfsgeführt auf CO ₂ -Zielwert von 1.580 ppm
Betriebsart	heizen	heizen	heizen	heizen	kühlen (ohne Kälteleistung)	kühlen
Türöffnung	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Fahrzeit	2,5 h	2,5 h	2,5 h	2,5 h	2,5 h	2,5 h
Besonderheiten	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)	Umluftbetrieb im Tunnel (15 min)
Grundlage	Typische Werte im Fernverkehr laut Alstom	Typische Werte im Fernverkehr laut Alstom	Volumenströme aus CO ₂ -Messung bei niedriger Belegung abgeschätzt (AP 3)	Annahme der Luftmengenreduktion um 10 % durch höheren Druckverlust über den Filter (bei techn. möglichen Filtern, AP 1)	Typische Werte im Fernverkehr laut Alstom	Typische Werte im Fernverkehr laut Alstom

*HVAC = Heating, Ventilation, Air Conditioning. Dies bezeichnet die Heizung, Lüftung und Klimatisierung des Fahrzeuges.

3.1.2 Validierung

Das ICE-Modell wurde anhand des Verlaufs der CO₂-Konzentration validiert. Diese Messung wurde im Rahmen von AP 3 auf der Strecke München-Erfurt in einem ICE 4 durchgeführt. Die Mess- und Auswerteposition ist dabei in Abbildung 8 als roter Punkt dargestellt. Kurz vor Erfurt passieren die Züge einen Tunnel, wobei die Frischluftzufuhr unterbrochen wird, um den Druckschlag in der Kabine zu vermeiden. Abbildung 9 zeigt den Vergleich der gemessenen (schwarz, gestrichelt) und simulierten (schwarz, durchgezogen) CO₂-Konzentration. Insgesamt zeigt sich eine gute Deckung der Simulation mit der Messung, bei einer maximalen Abweichung von ca. 150 ppm bei Minute 60.

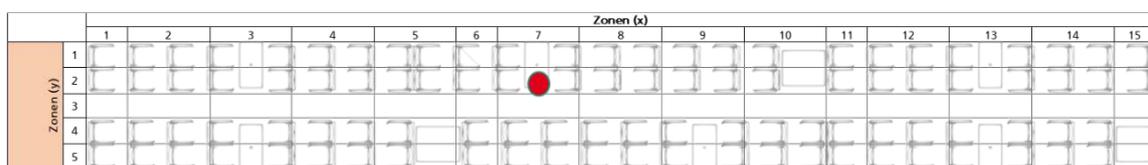


Abbildung 8: Mess- und Auswertepositionen der CO₂-Konzentration bei einer Messfahrt.

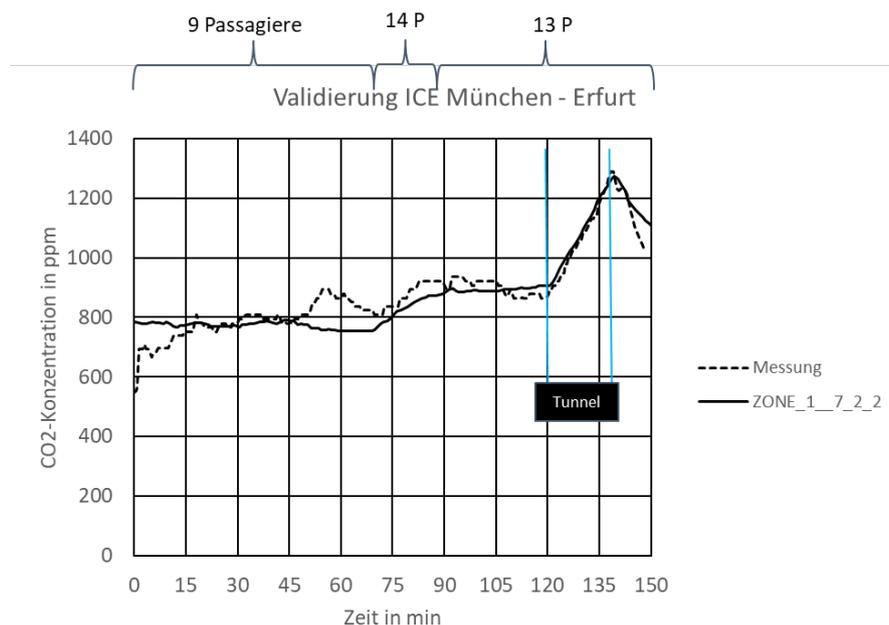


Abbildung 9: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration.

3.1.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Abbildung 10 zeigt den Konzentrationsverlauf im horizontalen Schnitt auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) des ICE kurz vor der Tunneldurchfahrt für den Fall eines sprechenden, mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgastes für den Fall „HVAC Heizen – 50 % Belegung“. Es wird deutlich, dass um den Emittenten (Zone mit rotem Oval markiert) herum eine höhere Konzentration bis zu 32 Milli-Quanta zu verzeichnen ist, während

weiter entfernt im Waggon die Konzentration mit 15 bis 19 Milli-Quanta niedriger ist. Der Grund für die Belastung im weiter entfernten Feld ist die Umluftführung der Lüftung im Waggon, durch die infektiöses Material über die Lüftung rückgeführt wird.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zonen (y)	1	15	15	16	17	19	22	20	18	15	13	14	13
	2	16	16	17	19	23	32	63	20	16	14	15	14
	3	16	16	17	19	21	26	25	20	17	15	15	14
	4	16	15	16	18	19	21	19	18	16	14	14	14

Abbildung 10: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ für den Fall "HVAC Heizen – 50 % Belegung, Sprechen, ohne Maske" im ICE.

Während der Tunneldurchfahrt wird die Frischluftklappe geschlossen und es wird nur mit Umluft gelüftet. Die Simulationen zeigen hier ein stetiges Ansteigen der Konzentration in Waggon, die etwa 10 Minuten nach Verlassen des Tunnels wieder abgeklungen ist.

Die Summation der Konzentration nach Gleichung (3) über die Fahrdauer von 2,5 h führt zu der ermittelten Exposition in Tabelle 5. Für jeden der simulierten Fälle werden die minimale Dosis weiter entfernt und die maximale Dosis unmittelbar in der Nähe des mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgastes ausgewertet. Unterschieden wird dabei jeweils danach, ob die infizierte Person atmet, spricht oder laut spricht sowie ob die Passagiere keine Maske, einen MNS oder eine FFP2-Maske tragen.

Die niedrigste Belastung zeigt sich durchweg beim Tragen einer FFP2-Maske beim Atmen. Abbildung 11 zeigt von der ersten bis zur dritten Spalte eine Zunahme der Dosis von reinem Atmen des Emittenten über Sprechen bis laut Sprechen ohne Maske. Von der dritten bis zur fünften Spalte zeigt sich beim lauten Sprechen die Abnahme der Dosis, wenn alle Passagiere einen MNS bzw. eine FFP2-Maske tragen. Der Grund für die starke Abnahme der Werte bei der Nutzung der FFP2-Maske ist, dass sowohl bei der Emission als auch bei der Einatmung eine Filterung der Erreger stattfindet.

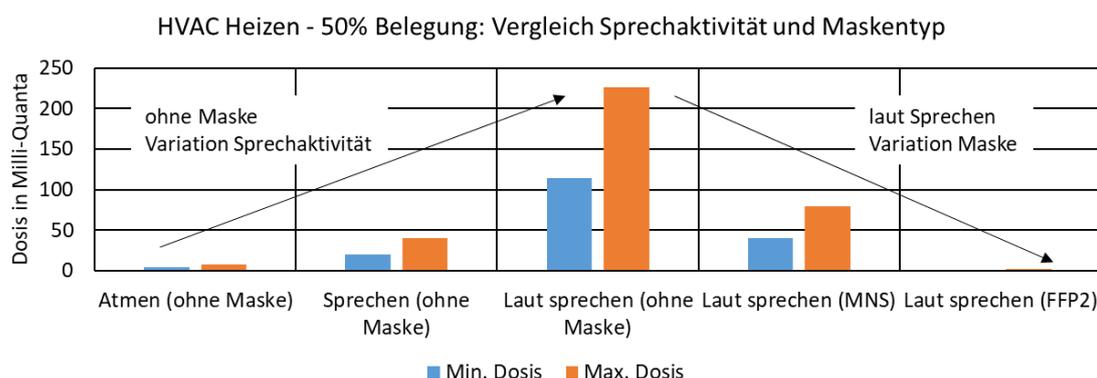


Abbildung 11: Vergleich der Dosis in Milli-Quanta nach 2,5 Stunden Aufenthalt mit einem mit SARS-CoV-2 Infizierten bei unterschiedlichen Aktivitäten (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) des Emitters und bei unterschiedlichen Maskentypen (keine, MNS, FFP2). Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emmitter.

Im Heizfall wird der ICE bedarfsgeführt mit Frischluft versorgt. In der Übergangszeit, wenn die Außentemperatur der Luft ohne zusätzliche Kälteleistung zum Kühlen des ICE geeignet ist, kann dieser auch nur mit Frischluft, d. h. ohne Umluft, belüftet werden (Fall nur Frischluft, Free Cooling). Bei höheren Außentemperaturen, wenn eine zusätzliche Kühlung erforderlich ist, wird die Luftmenge wieder bedarfs-

geführt geregelt. Durch die Regelung der bedarfsgeführten Lüftung wird bei einem niedrig ausgelasteten Waggon entsprechend weniger Frischluft zugeführt (min. Frischluft). Diese zwei Szenarien werden in Abbildung 12 am Beispiel „Sprechen mit MNS“ vergleichend gegenübergestellt.

Die Zuluftmengen variieren zwischen 2.800 m³/h und 4.600 m³/h. Im Nahbereich des mit SARS-CoV-2 infizierten Passagiers zeigt sich kaum eine Veränderung der Exposition durch die unterschiedlichen Frischluft- und Zuluftmengen. Im Vergleich der drei Belegungen HVAC Heizen 100 %, 50 % und der in der Messfahrt ermittelten minimalen Frischluftmenge zeigt sich, dass bei gleicher Zuluftmenge (3.600 m³/h) eine ähnliche maximale Dosis im Nahbereich des Emitters erreicht wird. Dies ist auch dadurch bedingt, dass sich die Raumluchtströmung aufgrund der unterschiedlichen Belegungsdichte und somit der internen Wärmelast ändert. Weiter entfernt vom Emitter steigt jedoch die minimale Dosis mit sinkendem Frischluftanteil an. So führt eine bedarfsgeführte Reduktion der Frischluftmenge von 1.500 m³/h auf 500 m³/h zu einer 3,4-fach höheren Exposition im weiter entfernten Bereich.

Falls ein Infizierter sich im Waggon aufhält, scheint es somit vordergründig günstiger, wenn der Waggon voll und somit gut gelüftet ist. Allerdings muss einschränkend erwähnt werden, dass bei niedrigerer Belegung die Wahrscheinlichkeit dieses Szenarios intuitiv als geringer einzustufen ist als bei hoher Belegung. Gleichzeitig ist auch bei niedrigerer Belegung intuitiv davon auszugehen, dass weniger Fahrgäste angesteckt werden können als bei hoher Belegung. Daher ist die Aussage, die bedarfsgeführte Lüftung erhöhe das Infektionsrisiko, insofern nur mit der Einschränkung gültig, dass die resultierende Erregerlast, die durch einen Infizierten verursacht wird, höher ist. Dennoch sollte im Pandemiefall geprüft werden, ob eine bedarfsgeführte Absenkung der Frischluftmenge regelungstechnisch unterbunden werden kann, um durch die vorhandene Lüftung eine maximale Schutzwirkung zu erzielen.

Gegenüber dem bedarfsgeführten Betrieb führt die Einstellung der Lüftung mit reiner Frischluft zu einer um 90 % reduzierten Exposition weiter entfernt vom Emittenten. Für den Fall „HVAC Kühlen“ ergeben sich Expositionen im Nah- und weiter entfernten Bereich, die dem Heizfall vergleichbar sind.

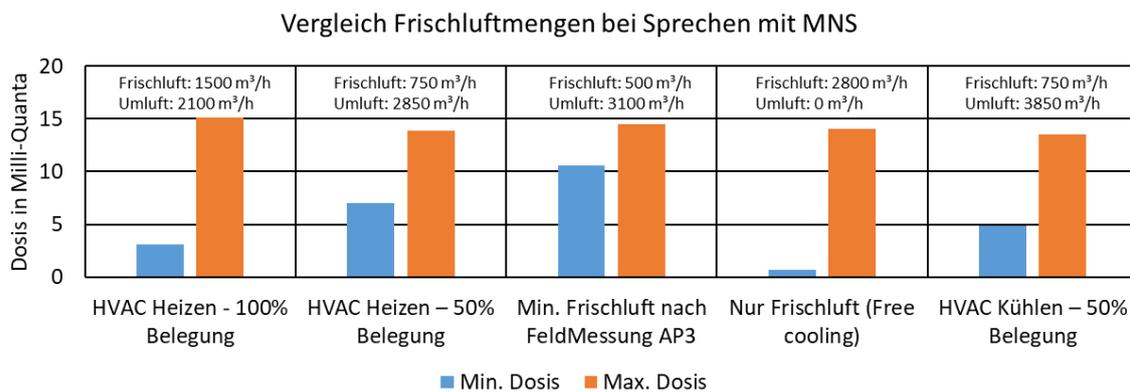


Abbildung 12: Einfluss der Frisch- und Umluftmengensteuerung auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nah am Emitter.

Für die Betrachtung der Umluftfilterung wurde mit einer nach derzeitigem Stand der Technik erreichbaren Wirksamkeit von 80 % auf SARS-CoV-2-Viren und einer daraus resultierenden Abnahme der Luftmengen von 10 % infolge des höheren Druckverlustes über den Filter gerechnet. In Abbildung 13 werden für Sprechen mit MNS der Fall „HVAC Heizen – 50 %“ mit und ohne Umluftfilterung verglichen. Im Nahbereich des mit SARS-CoV-2 infizierten Patienten zeigt sich eine Reduktion um 44 %. Weiter entfernt verringert sich die Exposition sogar um 91 %. Somit kann für den hier untersuchten Fall mit vergleichsweise hoher Umluftrate (ca. 79 % der Gesamtluftmenge) und dem Tragen von MNS eine Umluftfilterung empfohlen werden.

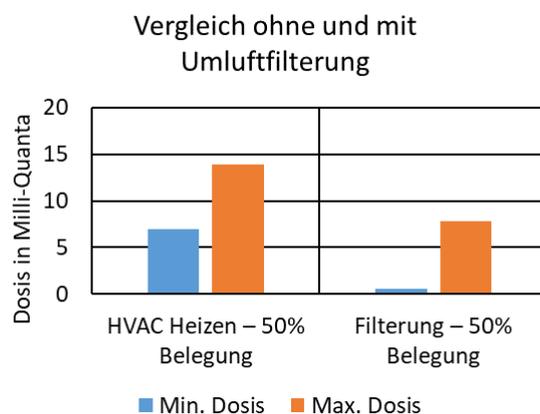


Abbildung 13: Einfluss der Umluftfilterung im ICE. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emmitter.

TABELLE 5: EXPOSITION IN DER NÄHE SOWIE WEITER ENTFERNT VOM EMITTER SITZEND BEI EINEM 2,5H-AUFENTHALT IN EINEM TYPISCHEN ICE

Dosis in Milli-Quanta	HVAC Heizen – 100 % Belegung		HVAC Heizen – 50 % Belegung		Min. Frischluft nach Feldmessung AP 3		Filterung – 50 % Belegung		Nur Frischluft (Free Cooling)		HVAC Kühlen – 50 % Belegung	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	1,8	8,7	4,0	8,0	6,1	8,3	0,4	4,5	0,4	8,1	2,8	7,8
Sprechen (ohne Maske)	8,9	43,3	20,0	39,6	30,2	41,3	1,8	22,4	2,0	40,2	14,0	38,6
Laut sprechen (ohne Maske)	50,8	247,4	114,3	226,4	172,5	235,9	10,1	128,0	11,5	229,6	79,8	220,3
Atmen (MNS)	0,6	3,1	1,4	2,8	2,1	2,9	0,1	1,6	0,1	2,8	1,0	2,7
Sprechen (MNS)	3,1	15,2	7,0	13,9	10,6	14,5	0,6	7,8	0,7	14,1	4,9	13,5
Laut sprechen (MNS)	17,8	86,6	40,0	79,2	60,4	82,6	3,5	44,8	4,0	80,3	27,9	77,1
Atmen (FFP2)	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Sprechen (FFP2)	0,1	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,0	0,2	0,0	0,4	0,1	0,4
Laut sprechen (FFP2)	0,5	2,5	1,1	2,3	1,7	2,4	0,1	1,3	0,1	2,3	0,8	2,2

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emmitter.

3.1.4 Weitere Simulationen

3.1.4.1 Abteibildung

Für den voll besetzten Zug wird zusätzlich untersucht, wie es sich auswirken würde, wenn die mit SARS-CoV-2 infizierte Person in einem Abteil sitzt. Hierzu wurden im Modell fiktive Wände um die Sitzgruppe des Emitters eingefügt. Eine Überströmung als Druckausgleich ist möglich, wie dies sich auch durch Fugen oder Spalte zum Beispiel im Bereich der Türen einstellen würde. Es wird angenommen, dass ein Teil der Abluft aus dem Abteil durch die zentrale Umluft dem restlichen Waggon zugeführt wird.

Abbildung 14 zeigt die Konzentrationsverteilung, wenn der Emitter laut sprechend ohne Maske in einem Abteil sitzt. Verglichen mit dem Großraumwaggon zeigt sich die Konzentrationsspitze auf das Abteil beschränkt. Im Bereich außerhalb des Abteils ist die Umluft ursächlich für die Verbreitung und hier ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie für den Großraumwagen. Abbildung 15 vergleicht die Exposition. Hier wird deutlich, dass weitere Fahrgäste im Abteil einer fast zweifach höheren Dosis ausgesetzt sind als im Großraumwagen. Andererseits sind zahlenmäßig weniger Personen betroffen. Die optimale Schutzwirkung für Personen außerhalb des Abteils würde theoretisch durch eine dezentrale Umluftführung erreicht, allerdings würde dies bedeuten, dass jedes einzelne Abteil einen eigenen Umluft-Lüfter benötigen würde.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zonen (y)	1	25	25	26	28	29	37	176	30	27	25	24	24
	2	26	26	27	30	29	41	446	34	29	27	25	25
	3	26	27	28	30	32	37	41	34	30	27	26	25
	4	26	26	27	29	31	33	31	33	29	26	25	25

Abbildung 14: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ für den Fall "Laut Sprechen, ohne Maske" im ICE mit Abteibildung um den Emitter.

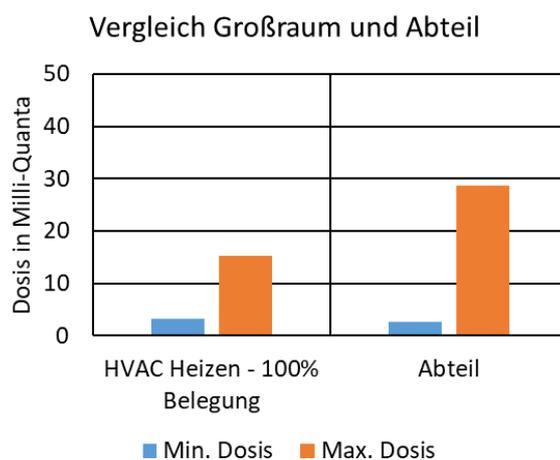


Abbildung 15: Vergleich der Quanta-Dosis im Großraumwaggon (links) gegenüber einem Abteil (rechts). Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

3.1.4.2 Abklingverhalten

Für den Fall „HVAC Heizen mit 50 % Belegung“ wird zusätzlich untersucht, wie schnell die Last nach dem Verlassen des Emitters im Waggon abklingen würde und welcher Dosis ein dabei neu zugestiegener Fahrgast exponiert werden würde. Als Extremfall wird angenommen, dass sich die Person direkt im Anschluss auf den gleichen Platz setzt. Betrachtet wird der Fall ohne Maske, wobei der Emitter bis zuletzt laut gesprochen hat.

Es zeigt sich, dass die Konzentration innerhalb von 8-9 Minuten unter 1 % des Wertes beim Verlassen des Emitters abgeklingen ist. Ein Fahrgast auf demselben Platz würde im Extremfall mit 5,2 Milli-Quanta exponiert werden (ohne Maske, vorheriges lautes Sprechen), was ca. 10 % der Dosis entspricht, der ein während der Fahrt weiter entfernt sitzender Fahrgast exponiert ist. Falls MNS genutzt wurde und die infizierte Person vorher nur gesprochen hat (nicht laut), so wird die darauffolgende Person mit 0,3 Milli-Quanta exponiert.

[27] geben das Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion durch das Sitzen direkt im zeitlichen Anschluss an den Infizierten mit 0,075 % an.

3.1.5 Schlussfolgerungen

Die ICE-Simulation wurde mit mehreren Szenarien durchgeführt. In der Simulation wurden erstens die Wirkung der organisatorischen/betrieblichen Anweisung Mund-Nasen-Schutz (MNS bzw. FFP2) im Zug zu tragen, zweitens Verhaltensvorgaben bzgl. des Aktivitätslevels (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) sowie drittens technische Maßnahmen wie die Erhöhung des Frischluftanteils und eine Filterung von Erregern in der Umluft betrachtet. Zusammenfassend ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die beste Schutzwirkung zeigt das konsequente Nutzen einer gut sitzenden FFP2-Maske. Diese bietet sowohl guten Fremd- als auch hohen Eigenschutz.
- Eine weitere Möglichkeit, eine möglichst geringe Menge an infektiösem Material freizusetzen ist, auf das Sprechen und insbesondere auf lautes Sprechen im Inneren der Verkehrsmittel möglichst zu verzichten oder auf das Nötigste zu reduzieren.
- Sofern eine allgemeine Pflicht zum Tragen einer FFP2-Maske im ÖV nicht umgesetzt wird, sondern es bei der Vorschrift bleibt, lediglich medizinische Masken bzw. MNS zu verwenden, führen technische Maßnahmen wie die Erhöhung des Frischluftanteiles oder eine Filterung von Viren in der Umluft zu einer deutlichen Reduktion der Exposition. Dies gilt jedoch nur dann, wenn man sich in einem Bereich aufhält, der weiter entfernt ist von einem mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgast. Da in der Realität der Infizierte den Mitreisenden unbekannt bleibt, ist ein möglichst hoher Eigenschutz jedem Passagier anzuraten.
- Die bedarfsgeführte Frischluftzufuhr von 500 m³/h führt bei niedriger Belegung zu einer 3,4-fach höheren Exposition der Personen weiter entfernt vom SARS-CoV-2 infizierten Fahrgast als bei der für die Auslegung der Klimatisierung maßgeblichen Frischluftmenge von 1.500 m³/h.
- Eine Abteilkabine grenzt den Verbreitungsbereich ein, erhöht aber die potentielle Dosis für Personen im Abteil um etwa den Faktor zwei und damit das Ansteckungsrisiko. Durch eine zentrale Umluft können auch in diesem Fall Viren im restlichen Waggon verteilt werden.

Eine direkte Ableitung von der Höhe der Exposition auf ein mögliches medizinisches Risiko aus der jeweils ermittelten Quanta-Dosis ist nicht möglich (siehe Abschnitt 2.2). Allerdings gibt die Studie von [27] Hinweise auf das Ansteckungsrisiko in chinesischen Hochgeschwindigkeitszügen im Zeitraum Dezember

2019 bis März 2020. Die Studie unterscheidet ebenfalls die Exposition im Nahbereich des Emitters und im weiter entfernten Bereich. Unter der mit Herstellerangaben validierten Annahme, dass die chinesischen Hochgeschwindigkeitszüge nicht grundlegend verschieden von deutschen ICE-Zügen belüftet werden, kann das Risiko einer Ansteckung im ICE zumindest eingeordnet werden. Aufgrund der kulturellen Gepflogenheiten ist in chinesischen Zügen allenfalls von leisem Sprechen auszugehen, keinesfalls von lautem Sprechen. Ob die chinesischen Reisenden damals MNS getragen haben und wenn ja, in welchem Umfang, kann nicht nachvollzogen werden. Das Tragen von MNS ist jedoch im fernen Osten auch vor der Pandemie nicht unüblich gewesen. Daher kann der Vergleich nur als Orientierung dienen. Einschränkung ist zudem, dass die Studie sich auf die ursprüngliche SARS-CoV-2-Variante bezieht. Die offensichtlich ansteckendere Mutation B.1.1.7 dominiert allerdings mittlerweile das Infektionsgeschehen mit zuletzt 72,2 % der nachgewiesenen Fälle in Deutschland (Stand 17. März 2021) [28].

Mit diesen Annahmen lässt sich für das ursprüngliche SARS-CoV-2-Virus die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung derart eingrenzen, dass das Infektionsrisiko bei der Aufnahme von 0,6 bis 40 Milli-Quanta im Bereich von 0,14 % bis 3,5 % liegt. Hierzu wurde vergleichend die Dosis-Spanne (Abbildung 16) zwischen „Atmen mit MNS“ und „Sprechen ohne MNS“ für den HVAC Heizen Fall mit 100 % Belegung farblich im Diagramm unterlegt. Im Diagramm dargestellt sind jeweils die Werte der minimalen und maximalen Dosis für Atmen ohne Maske, Sprechen mit MNS und laut Sprechen mit FFP2.

Der Vergleich macht deutlich, dass nur durch die konsequente Nutzung einer FFP2-Maske Werte im Nah- und entfernten Bereich des Emitters im unteren Bereich der aus der chinesischen Beobachtungsstudie berichteten Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung mit dem ursprünglichen SARS-CoV-2 Virus erreichbar sind. Lautes Sprechen erhöht signifikant die Exposition um etwa den Faktor 28 und damit auch indirekt das Ansteckungsrisiko. Als Maßnahme der Risikoreduktion lässt sich die Empfehlung, lautes Sprechen im gesamten ÖV zu vermeiden, begründen, insbesondere, da erwiesen ist, dass dadurch auch der Sitz der Maske verschlechtert wird. Zudem sollten die Masken zum Essen oder Trinken nur möglichst kurz abgenommen werden. Technische Maßnahmen wie die Erhöhung der Frischlufttrate oder die Umluftfilterung grenzen den Verbreitungsbereich ein und senken somit das Ansteckungsrisiko weiter entfernt vom Emitter.

Einordnung des Ansteckungsrisikos mit SARS-CoV-2 in Schnellzügen anhand Studie von Hu et al., 2020

- Keine Berücksichtigung von Mutanten
- Keine Berücksichtigung individuellen Risikos durch medizinische Disposition

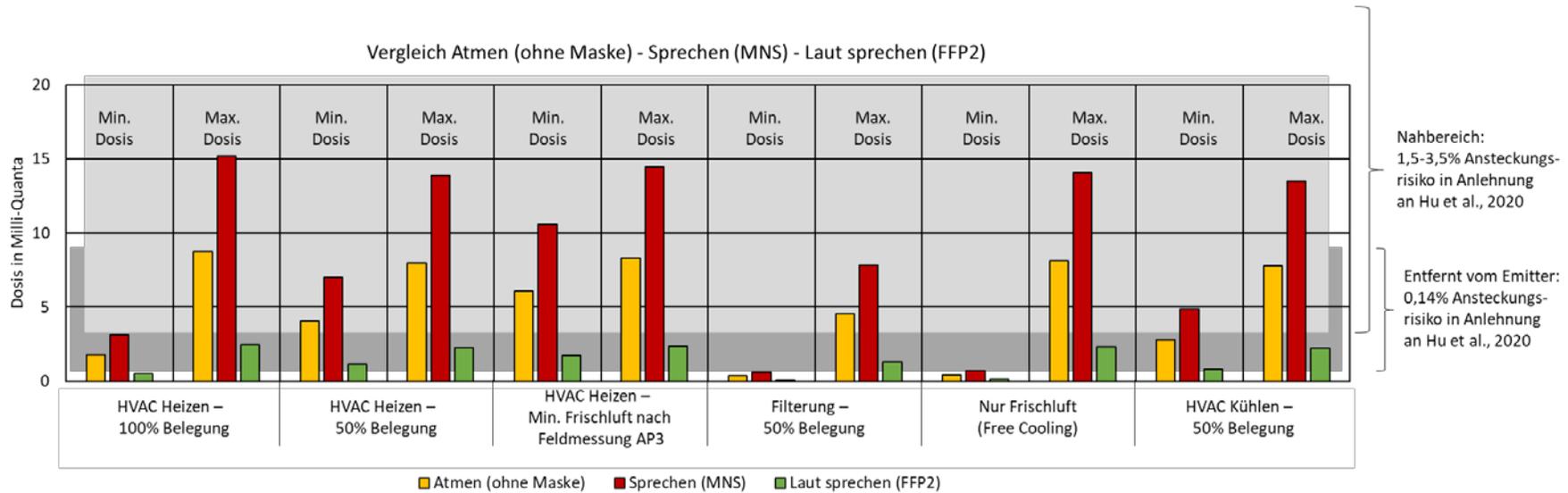


Abbildung 16: Vergleich der in der Simulation ermittelten Dosis in Milli-Quanta im Bereich weiter entfernt von der mit SARS-CoV-2 infizierten Person (min. Dosis) und im Nahbereich (max. Dosis) im Vergleich zum ermittelten Ansteckungsrisiko angelehnt an [27].

3.2 Regionalzug

3.2.1 Eingangsdaten

Als häufiger Vertreter eines Regionalzuges wurde die Serie Talent 3 gewählt, da hier umfangreiche Planungs- und Validierungsdaten beim Hersteller und Projektpartner Alstom vorliegen. Dieser wurde in $15 \times 5 \times 5$ (x: Länge, y: Breite, z: Höhe) Zonen unterteilt. Im Heizfall strömt Luft in den hellgrünen Zonen ein (Abbildung 17, Mitte). Abluft wird oberhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Zusätzlich wird Abluft über die orange markierten Zonen als Umluft in das Klimagerät zurückgeführt. Im Kühlfall (Abbildung 17, unten) wird Zuluft über die Decke eingebracht. Die Abluftführung erfolgt wie im Heizfall.

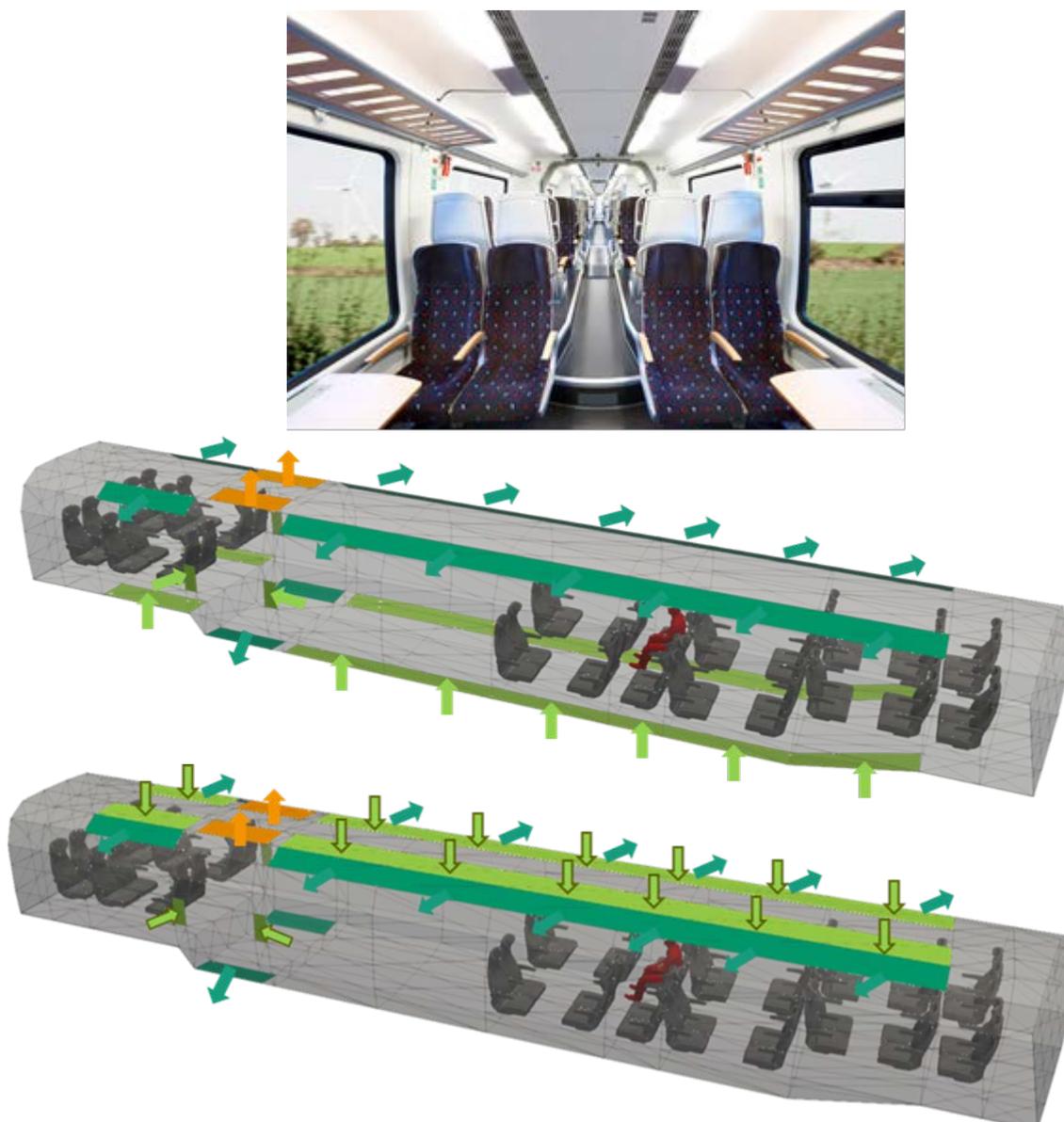


Abbildung 17: Exemplarische Innenansicht des Talent-Zuges (oben, Bildquelle: Alstom, 2021), zonales Modell eines exemplarischen Regionalzugs im Heizfall (Mitte) bzw. Kühlfall (unten). Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrüne Pfeile: Fortluft, orange Pfeile: Umluft-Absaugung, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Die betrachteten Lüftungsszenarien sind in Tabelle 6 dargestellt. Hierbei werden insbesondere die Effekte der Frischluftmenge, der Betriebsart und der Aufrüstung des Umluftsystems mit einem gegen SARS-CoV-2 geeigneten Filter betrachtet.

TABELLE 6: SIMULATIONSFÄLLE UND EINGANGSDATEN FÜR DEN TALENT 3 IM REGIONALVERKEHR

Randbedingung Lüftung	HVAC Auslegung Heizen	Filterung	HVAC Auslegung Kühlen	Nur Frischluft Kühlen (Free Cooling)
Frischluftmenge	816 m ³ /h	734 m ³ /h	816 m ³ /h	1.900 m ³ /h
Umluftmenge	1.384 m ³ /h	1.246 m ³ /h	2.084 m ³ /h	0 m ³ /h
Filtereffizienz	-	80 % gegen SARS-CoV-2	-	-
Verhältnis Frisch-/Umluft	konstant	konstant	konstant	konstant
Betriebsart	heizen	heizen	kühlen	kühlen (ohne Kälteleistung)
Türöffnung	52 s, 1 Tür	52 s, 1 Tür	52 s, 1 Tür	52 s, 1 Tür
Fahrzeit	295 s	295 s	295 s	295 s
Fahrdauer	98 min	98 min	98 min	98 min
Grundlage	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Annahme der Luftmengenreduktion um 10 % durch höheren Druckverlust über den Filter (bei techn. möglichen Filtern, AP 1) Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten

3.2.2 Validierung

Die Validierung des zonalen Modells des Zuges erfolgte anhand von umfangreichen Strömungssimulationen des Herstellers Alstom. Im zonalen Modell wurde hierzu die Inneneinrichtung auf den von Alstom analysierten Fall angepasst.

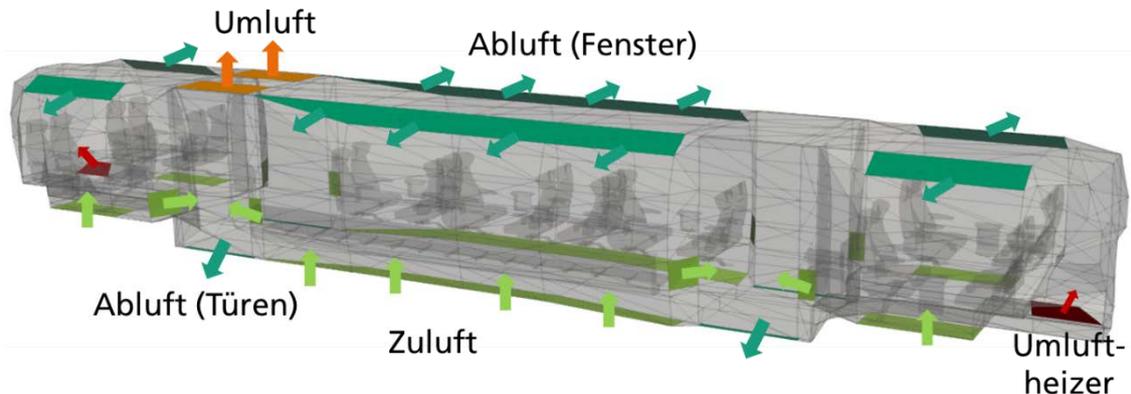


Abbildung 18: Angepasstes zonales Modell. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrüne Pfeile: Fort- bzw. Abluft, orange Pfeile: Umluft-Absaugung, rot: Umluftheizung. (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

In der Validierung waren folgende Randbedingungen fixiert:

- Außentemperatur: -20 °C
- Keine Sonnenlast
- Keine Fahrgäste
- Innentemperatur (Soll): 19 °C
- Zulufttemperatur: 32 °C

Die vorhandenen Auswertepositionen sind in Abbildung 19 dargestellt. Es wurde jeweils in den Höhen 10 cm, 110 cm und 170 cm die Temperatur betrachtet.

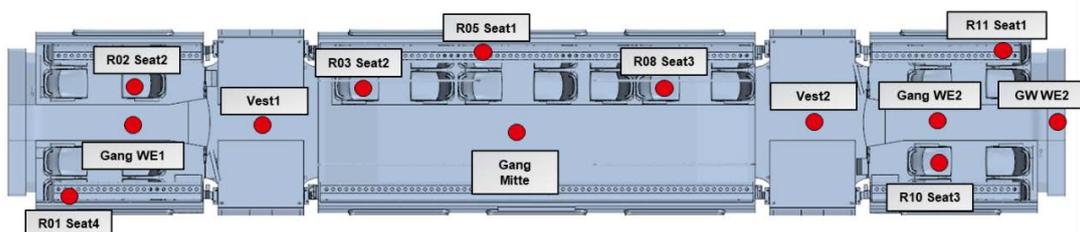


Abbildung 19: Temperaturmesspositionen für den Validierungsfall (Bildquelle: Alstom, 2021).

In Abbildung 20 sind die Temperaturabweichungen des zonalen Modells zu den Ergebnissen von Alstom (Referenzwert) dargestellt. Die blauen Punkte symbolisieren die Stellen in Bodennähe, die orangenen auf Kopfhöhe sitzend und die grünen auf Kopfhöhe stehend. Lediglich im Bodenbereich zeigt das zonale Modell Abweichungen von mehr als 1 °C, diese werden bzgl. eines Infektionsrisikos aber nicht als relevant angesehen.

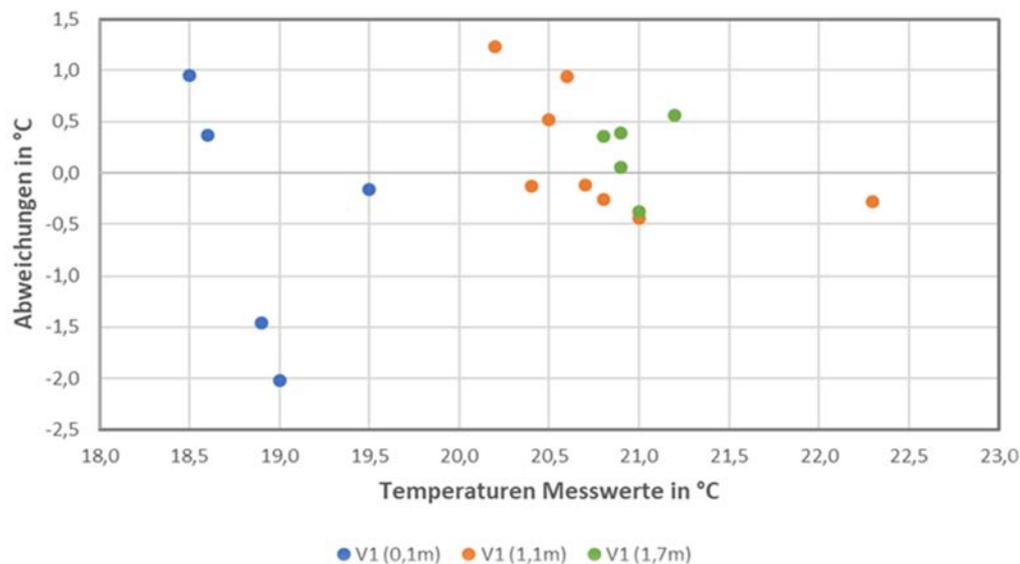


Abbildung 20: Vergleich der Abweichung der mit der zonalen Simulation ermittelten Temperaturen mit denen detaillierter Strömungssimulationen von Alstom.

Damit konnte gezeigt werden, dass der hier angewendete zonale Simulationsansatz grundsätzlich geeignet ist, die Temperaturverteilung und somit das Raumklima im Zug abzubilden.

3.2.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS/FFP2-Maske für den Heizfall, mit einer Umluftfilterung sowie für den Kühlfall und bei reinem Frischluftbetrieb. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) ist in Abbildung 21 für den Fall „HVAC Auslegung mit Sprechen ohne Maske“ dargestellt. Im Nahbereich des mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgastes werden Konzentrationen bis zu 19 Milli-Quanta/m³ erreicht, weiter vom Emittor entfernt liegt die Konzentration noch bei 6 Milli-Quanta/m³.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zonen (y)	1	6	6	6	8	11	10	11	8	7	7	8	7		
	2	6	6	7	8	10	12	19	133	9	8	8	7		
	3	7	7	7	7	8	9	10	14	12	9	9	9		
	4	6	7	6	7	8	8	8	11	9	7	7	8		
	5	6	6	6	6	8	8	7	7	8	7	7	7		

Abbildung 21: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ für den Fall "HVAC Auslegung Heizen, Sprechen, ohne Maske" im Regionalzug (Kopfhöhe sitzend).

Tabelle 7 stellt die Dosis für die 1:38 Stunden andauernde Fahrt zusammen mit dem Infizierten dar. Die konsequente Nutzung der FFP2-Maske und der Verzicht auf lautes Sprechen erreicht insgesamt die niedrigste Exposition von unter 0,2 Milli-Quanta. In Abbildung 22 werden die Betriebsarten und die Frisch- und Umluftmengen vergleichend gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Filterung der Umluft zu einer Reduktion der Exposition um 69 % im Nahbereich und 84 % weiter entfernt führt.

Die Betriebsart Kühlen führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die Betriebsart Heizen. Durch den reinen Frischluftbetrieb sinkt die Zuluftmenge. Die Folge ist eine erhöhte lokale Exposition in der Nähe des Emitters (7,7 Milli-Quanta), während die Dosis im Bereich weiter entfernt auf 0,5 Milli-Quanta sinkt.

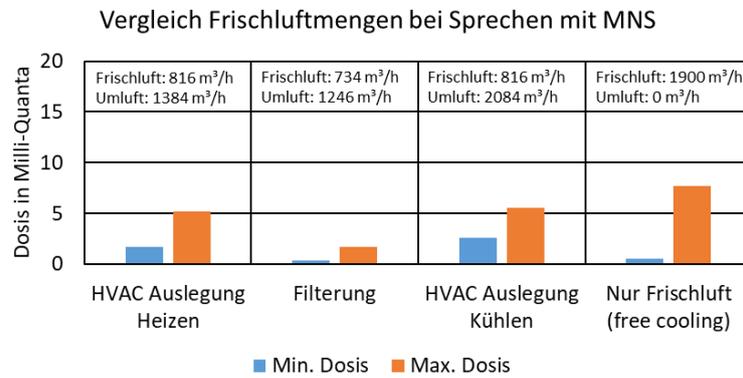


Abbildung 22: Einfluss der Frisch- und Umluftmengensteuerung auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

TABELLE 7: EXPOSITION IN MILLI-QUANTA BEI EINER 1:38 STUNDEN DAUERNDEN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFIZIERTEN

Dosis in Milli-Quanta	HVAC Auslegung Heizen		Filterung		HVAC Auslegung Kühlen		Nur Frischluft Kühlen	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)*	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)*
Atmen (ohne Maske)	1,0	3,0	0,2	1,0	1,5	9,7 / 3,2	0,3	8,1 / 4,4
Sprechen (ohne Maske)	4,8	14,9	1,0	4,7	7,4	48,1 / 15,8	1,5	40,0 / 21,9
Laut Sprechen (ohne Maske)	27,5	85,2	5,7	27,1	42,0	274,5 / 90,4	8,4	228,3 / 125,3
Atmen (MNS)	0,3	1,1	0,1	0,3	0,5	3,4 / 1,1	0,1	2,8 / 1,5
Sprechen (MNS)	1,7	5,2	0,3	1,7	2,6	16,8 / 5,5	0,5	14,0 / 7,7
Laut Sprechen (MNS)	9,6	29,8	2,0	9,5	14,7	96,1 / 31,6	2,9	79,9 / 43,8
Atmen (FFP2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1 / 0,0	0,0	0,1 / 0,0
Sprechen (FFP2)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5 / 0,2	0,0	0,4 / 0,2
Laut Sprechen (FFP2)	0,3	0,9	0,1	0,3	0,4	2,7 / 0,9	0,1	2,3 / 1,3

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nah am Emitter.

*Insbesondere für den Kühlfall wird eine starke Erhöhung der Exposition am Nebenplatz des Infizierten vorhergesagt. Betrachtet man den Platz eine Reihe weiter, sinkt diese Dosis und ist somit ähnlich dem Heizfall (vgl. Abbildung 23)

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zonen (y)	1	10	10	10	10	10	10	12	15	20	48	10	9	8	8
	2	10	10	10	11	10	11	12	14	20	69	9	9	8	8
	3	10	10	10	11	11	12	12	17	19	9	8	8	8	8
	4	10	10	10	10	10	11	11	12	13	10	9	8	8	8
	5	10	10	10	10	9	11	11	11	11	9	9	8	8	8

Abbildung 23: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ für den Fall "HVAC Auslegung Kühlen beim Sprechen ohne Maske" mit Darstellung der zwei Plätze mit höchster Konzentration neben dem Emmitter.

3.2.4 Schlussfolgerungen

Die höchste Schutzwirkung wird durch die Nutzung einer FFP2-Maske durch alle Fahrgäste hergestellt. Zudem sollte auf lautes Sprechen verzichtet werden. Die Umluftfilterung senkt die Emissionslast in der Nähe sowie entfernt vom Emmitter. Der reine Frischluftbetrieb führt zu einer höheren Konzentrationsspitze im Bereich des Emitters, reduziert aber die Exposition der Fahrgäste weiter entfernt.

3.3 S-Bahn

3.3.1 Eingangsdaten

Als häufiger Vertreter eines Zuges im S-Bahn-Verkehr wurde die Serie Talent 2 gewählt, da hier umfangreiche Planungs- und Validierungsdaten beim Projektpartner Alstom vorliegen. Dieser wurde in 17 x 5 x 5 (x: Länge, y: Breite, z: Höhe) Zonen unterteilt.

Im Heizfall strömt Luft in den hellgrünen Zonen ein (Abbildung 24, oben). Abluft wird oberhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Zusätzlich wird Abluft über die orange markierten Zonen als Umluft in das Klimagerät zurückgeführt. Im Kühlfall (Abbildung 24, unten) wird Zuluft über die Decke eingebracht. Die Abluftführung erfolgt wie im Heizfall.

Im Gegensatz zum Regionalzug (Abschnitt 3.2), wurde bei dieser Ausführung die Bestuhlung angepasst und es ist eine weitere Tür je Wagenseite vorhanden.

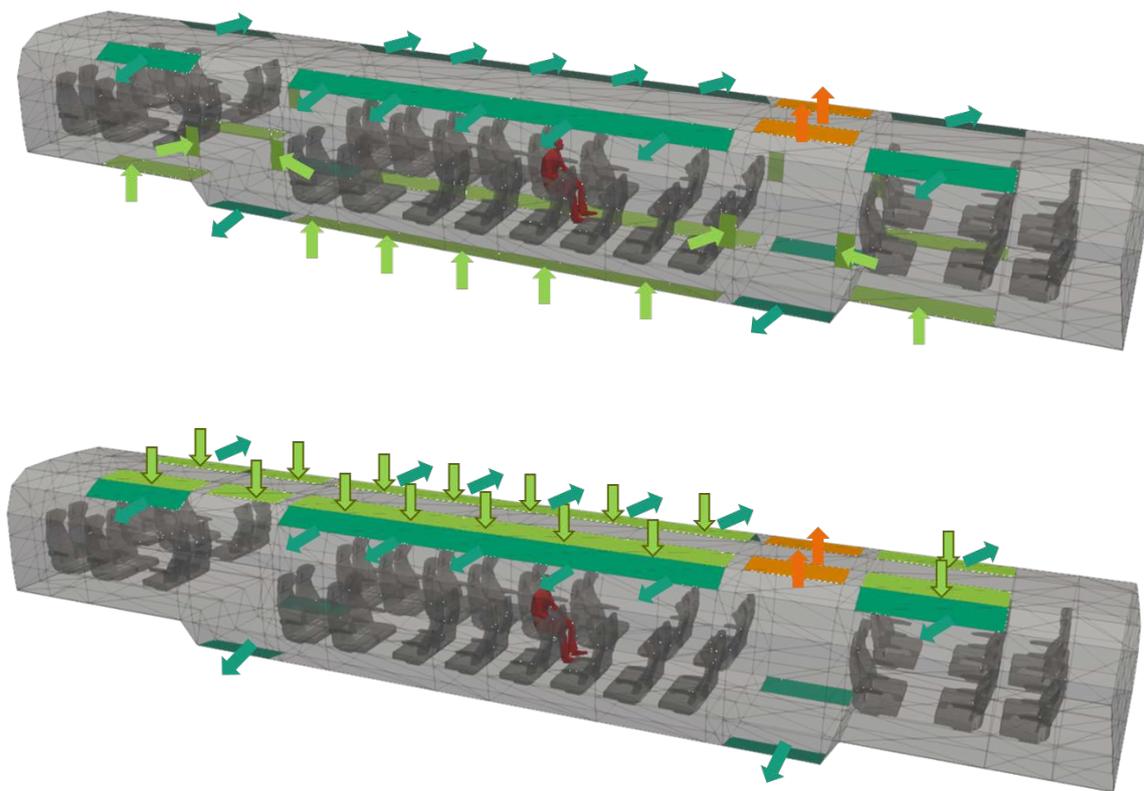


Abbildung 24: Zonales Modell eines exemplarischen Regionalzugs im Heizfall (oben) bzw. Kühlfall (unten). Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrüne Pfeile: Fortluft, orange Pfeile: Umluft-Absaugung, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP).

Die betrachteten Lüftungsszenarien sind in Tabelle 8 dargestellt.

TABELLE 8: SIMULATIONSFÄLLE UND EINGANGSDATEN FÜR DIE S-BAHN

Rand- bedingung Lüftung	HVAC Auslegung Heizen	Filterung	HVAC Auslegung Kühlen	Nur Frischluft Kühlen (Free Cooling)
Frischluft- menge	816 m ³ /h	734 m ³ /h	816 m ³ /h	1.900 m ³ /h
Umluftmenge	1.384 m ³ /h	1.246 m ³ /h	2.084 m ³ /h	0 m ³ /h
Filtereffizienz	-	80 % gegen SARS- CoV-2	-	-
Verhältnis Frisch-/Um- luft	konstant	konstant	konstant	konstant
Betriebsart	heizen	heizen	kühlen	kühlen
Türöffnung	36 s, 2 Türen	36 s, 2 Türen	36 s, 2 Türen	36 s, 2 Türen
Fahrzeit	72 s	72 s	72 s	72 s
Fahrtdauer	77 min	77 min	77 min	77 min
Grundlage	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Annahme der Luftmengen- reduktion durch höheren Druck- verlust über den Filter (bei techn. möglichen Filtern, AP 1) Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten	Angaben Alstom Recherche IFB zu Fahr- und Haltezeiten

3.3.2 Validierung

Die Modellvalidierung ist in Abschnitt 3.2 dargestellt und auch für diesen Fall gültig.

3.3.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS/FFP2-Maske für die Fälle HVAC Auslegung Heizen, die Umluftfilterung sowie bei HVAC Auslegung Kühlen und reinem Frischluftbetrieb. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) für den Fall HVAC Auslegung Heizen mit einem sprechenden Emittor ohne Maske ist in Abbildung 25 dargestellt. Durch die regelmäßige Türöffnung ergibt sich im Vergleich zum Regionalzugeinsatz eine höhere Frischluftzufuhr und somit eine niedrigere Konzentration im Innenraum.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Zonen (y)	1	5	5	5	6	6	6	7	7	5	4	3	4	4	3	3	3	
	2	6	5	5	6	7	7	10	11	5	4	4	4	4	3	3	3	
	3	6	6	6	8	10	16	32	5	4	4	4	3	3	3	3	3	
	4	6	5	6	6	9	7	9	5	4	4	4	3	3	3	3	3	
	5	6	5	5	5	8	6	6	4	4	3	3	3	3	3	3	3	

Abbildung 25: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ für den Fall "Sprechen, ohne Maske" in der S-Bahn (HVAC Auslegung Heizen, Kopfhöhe sitzend).

Tabelle 9 stellt die Dosis bei einer 77-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten dar. In Abbildung 26 sind für den Fall „Sprechen mit MNS“ die Expositionen vergleichend gegenübergestellt. Die Filterung erreicht hierbei eine Reduktion der Exposition im Nahbereich um 30 % und weiter entfernt um 80 %. Bei Kühlen mit reiner Frischluft wird eine ähnlich hohe Reduktion im weiter vom Emittor entfernten Bereich erlangt.

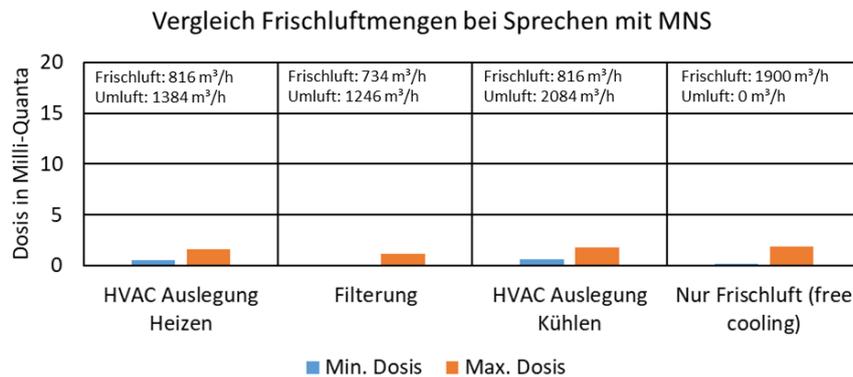


Abbildung 26: Einfluss der Frisch- und Umluftmengen-Steuerung auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittor.

TABELLE 9: EXPOSITION BEI EINER 77-MINÜTIGEN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINER INFIZIERTEN PERSON

Dosis in Milli-Quanta	HVAC Auslegung Heizen		Filterung		HVAC Auslegung Kühlen		Nur Frischluft Kühlen	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)*	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)*
Atmen (ohne Maske)	0,3	1,0	0,1	0,7	0,4	3,6 / 1,0	0,1	3,4 / 1,1
Sprechen (ohne Maske)	1,5	4,7	0,3	3,5	1,9	17,9 / 5,1	0,6	17,0 / 5,4
Laut Sprechen (ohne Maske)	8,4	27,1	1,9	19,8	10,8	102,0 / 28,9	3,4	96,8 / 30,7
Atmen (MNS)	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1	1,3 / 0,4	0,0	1,2 / 0,4
Sprechen (MNS)	0,5	1,7	0,1	1,2	0,7	6,3 / 1,8	0,2	5,9 / 1,9
Laut Sprechen (MNS)	3,0	9,5	0,7	6,9	3,8	35,7 / 10,1	1,2	33,9 / 10,7
Atmen (FFP2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0 / 0,0	0,0	0,0 / 0,0
Sprechen (FFP2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2 / 0,1	0,0	0,2 / 0,1
Laut Sprechen (FFP2)	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1	1,0 / 0,3	0,0	1,0 / 0,3

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

*Insbesondere für den Kühlfall wird eine starke Erhöhung der Exposition am Nebenplatz des Infizierten vorhergesagt. Betrachtet man den Platz eine Reihe weiter, sinkt die Dosis und ist somit ähnlich dem Heizfall.

3.3.4 Schlussfolgerungen

Die höchste Schutzwirkung wird durch eine FFP2-Maske hergestellt. Zudem sollte auf lautes Sprechen verzichtet werden. Die Umluftfilterung senkt insbesondere die Emissionslast weiter entfernt vom Emitter, im Nahbereich sinkt die Belastung nur um 30 %. Trotz ähnlicher technischer Betriebsparameter wie beim Einsatz als Regionalzug, zeigen sich beim S-Bahneinsatz aufgrund der häufigen Türöffnung niedrigere Expositionen. Dadurch bedingt ist auch der zusätzliche Nutzen von Maßnahmen wie Umluftfilterung und reiner Frischluftzufuhr weniger stark ausgeprägt als beim Einsatz als Regionalzug.

3.4 U-Bahn (älteres Modell)

3.4.1 Eingangsdaten

Ein Grundriss der betrachteten U-Bahn älteren Typs sowie die Umsetzung als zonales Modell ist in Abbildung 27 dargestellt. Das zonale Modell unterteilt den Wagen in $8 \times 5 \times 5$ Zonen (x: Länge, y: Breite, z: Höhe).

Die betrachtete U-Bahn ist die älteste Baureihe A, die in München nach wie vor im Einsatz ist. Sie zeichnet sich durch eine Lüftung mit Festvolumenstrom aus. Im Heizfall strömt Luft in den hellgrünen Zonen ein. Abluft wird oberhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Im Kühlfall wird diese Lüftungsrichtung umgekehrt. Eine aktive Kühlung der Luft erfolgt nicht.

Ein typisches Fahrprofil wurde vom Projektpartner IFB bereitgestellt. Hierbei wurden die Soll-Fahrpläne aller Linien ohne Berücksichtigung tageszeitabhängiger Einschränkungen der Münchener U-Bahnen [29] ausgewertet. Anhand der Fahrpläne wurde die gesamte Fahrdauer und die Fahrtzeit zwischen den Halten ausgewertet. Am Bahnhof wurde die in [30] angegebene Türöffnungszeit von 20 s für Fahrzeuge der Kategorie B (innerstädtischer Verkehr) angenommen. Die simulierten Fälle sind in Tabelle 10 dargestellt. Diese umfassen die Design-Lüftungsfälle sowie den aus der CO₂-Messung im Betrieb rückgerechneten Frischluftvolumenstrom.

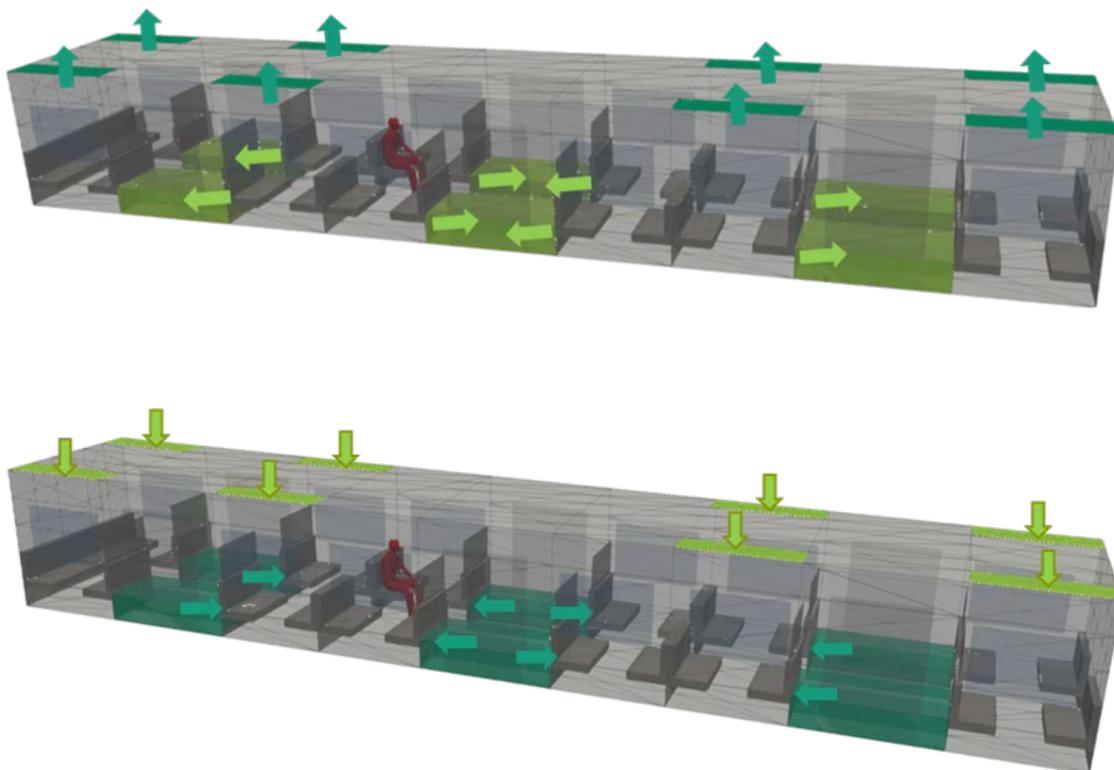


Abbildung 27: Innenansicht (Bild oben) und Umsetzung im zonalen Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- (Bild Mitte) und Kühlbetrieb (Bild unten) am Beispiel der U-Bahn älterer Bauart Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkel-grüne Pfeile: Fortluft, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

TABELLE 10: EINGANGSDATEN FÜR DIE SIMULATION DER U-BAHN ÄLTERER BAUART

Randbedingung Lüftung	Heizfall	Heizfall Messung	Kühlfall (Lüften)
Frischlufthmenge	3.060 m ³ /h	1.200 m ³ /h	3.060 m ³ /h
Umlufthmenge	0 m ³ /h	0 m ³ /h	0 m ³ /h
Verhältnis Frisch-/Umluft	konstant	konstant	konstant
Betriebsart	heizen	heizen	kühlen
Türöffnung	20 s, 3 Türen	20 s, 3 Türen	20 s, 3 Türen
Fahrzeit	72 s	72 s	72 s
Fahrtdauer	29,5 min	29,5 min	29,5 min
Grundlage	Review IFB, Daten- bereitstellung MVG*	Review IFB, Daten- bereitstellung MVG	Review IFB, Daten- bereitstellung MVG

*Münchner Verkehrs Gesellschaft

3.4.2 Validierung

Für die Überprüfung des Simulationsmodells wurden die gemessenen CO₂-Werte einer Messfahrt aus der Feldmessungen von AP 3 auf der Strecke München Großhadern bis Kieferngarten herangezogen.

Die Belegung wurde anhand der protokollierten Mitschrift des Messteams der Messfahrt abgeschätzt. Die Belegung nahm auf der Fahrt ins Zentrum hin zu und dann wieder ab. Abbildung 28 stellt die ausgewertete Zone (4,2,2) dar. Der Volumenstrom wurde anhand der CO₂-Messung zu 1.200 m³/h ermittelt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messung und Simulation (Abbildung 29).

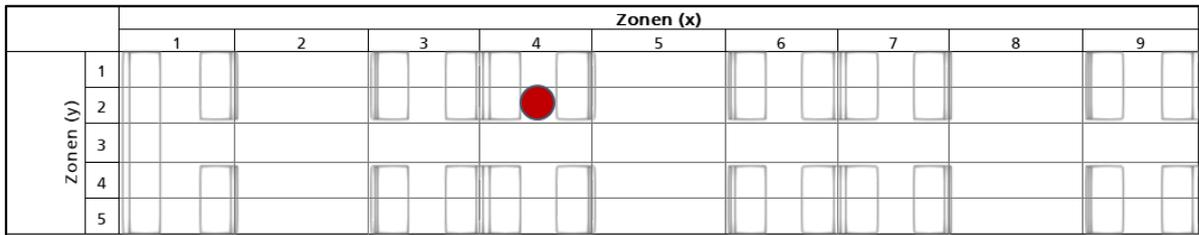


Abbildung 28: Auswertezone für CO₂-Validierung in der U-Bahn älteren Baujahres.

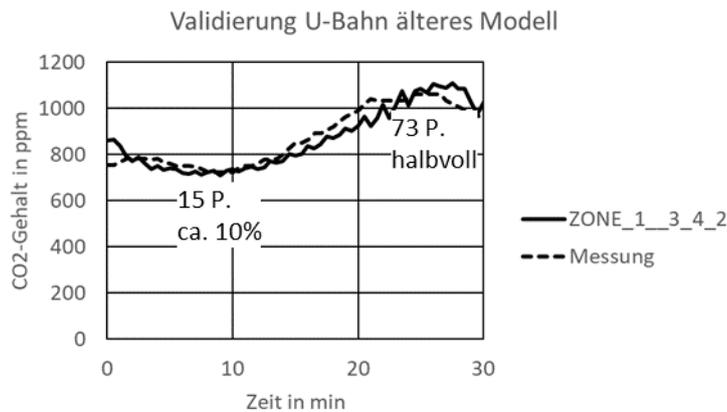


Abbildung 29: Vergleich gemessene und simulierte CO₂-Konzentration für die U-Bahn älteren Baujahres.

3.4.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS / FFP2-Maske für den Heizfall, den aus der Messung ermittelten Frischluftvolumenstrom und den Kühlfall. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung ist in Abbildung 30 für den Heizfall mit Sprechen ohne Maske dargestellt. Der rechte Bereich des Wagens ist durch die vergleichsweise hohe Frischluftmenge gut vor der Emission des mit SARS-CoV-2 infizierten Fahrgastes geschützt.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zonen (y)	1	3	6	9	25	0	0	0	0	0
	2	3	5	8	46	0	0	0	0	0
	3	4	3	6	4	1	0	0	0	0
	4	3	3	4	4	0	0	0	0	0
	5	3	3	4	3	0	0	0	0	0

Abbildung 30: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Atemhöhe um den Emittenten in der U-Bahn älterer Bauart für den Fall "Sprechen ohne Maske" im Heizbetrieb.

Tabelle 11 stellt die Exposition bei einer 29,5-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten dar. In Abbildung 30 sind die Expositionen für Sprechen mit MNS exemplarisch gezeigt. Bei der aus der Messung im Betrieb ermittelten Luftmenge ist die Dosis im Nahbereich des Emitters 25 % höher im Vergleich zum Auslegungsfall. Der vergleichsweise niedrige Effekt der Lüftungs-Frischluftmenge ist auf

die zusätzliche, häufige Frischluftversorgung des Zuges durch die geöffneten Türen im Bahnhof zurückzuführen. Im Kühlbetrieb ist die Dosis im Nahbereich des Emittenten geringer, da hier die Luft über der mit SARS-CoV-2 infizierten Person eingebracht wird, während die Luft im Heizbetrieb an Monumenten im Waggon vorbeifließen muss, bevor sie den Passagier erreicht.

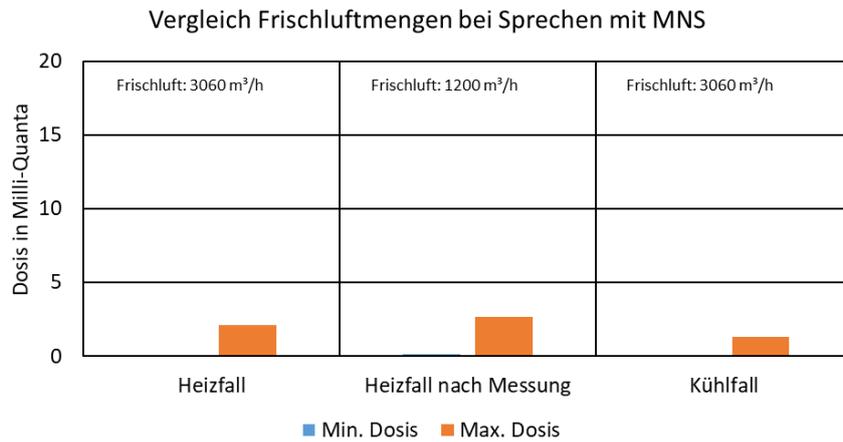


Abbildung 31: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittent.

TABELLE 11: EXPOSITION BEI EINER 29,5-MINÜTIGEN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFI-
ZIERTEN IN EINER ÄLTEREN U-BAHN

Dosis in Milli-Quanta	Heizfall		Heizfall, Messung		Kühlfall (Lüften)	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,00	1,22	0,07	1,52	0,01	0,76
Sprechen (ohne Maske)	0,02	6,03	0,35	7,55	0,05	3,76
Laut Sprechen (ohne Maske)	0,14	34,45	2,01	43,12	0,29	21,49
Atmen (MNS)	0,00	0,43	0,02	0,53	0,00	0,27
Sprechen (MNS)	0,01	2,11	0,12	2,64	0,02	1,32
Laut Sprechen (MNS)	0,05	12,06	0,70	15,09	0,10	7,52
Atmen (FFP2)	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01
Sprechen (FFP2)	0,00	0,06	0,00	0,08	0,00	0,04
Laut Sprechen (FFP2)	0,00	0,34	0,02	0,43	0,00	0,21

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

3.4.4 Schlussfolgerungen

Betrachtet wurde eine 29,5-minütige Fahrt gemeinsam mit einem Infizierten in einer U-Bahn älterer Bauart mit Lüftungsanlage. Die Türöffnung wurde beim Luftaustausch berücksichtigt. Es zeigt sich eine Diskrepanz zwischen in Betriebsdaten angegebenen und den aus der CO₂-Messung ermittelten Frischluftvolumenströmen. Durch die häufige Türöffnung an den Bahnhöfen wird die Auswirkung der geringeren Frischluftzufuhr durch die mechanische Lüftung teilweise ausgeglichen. Daher kann die Öffnung aller Türen an den Bahnhöfen als wirksames Mittel zur Frischluftzufuhr bestätigt werden.

Durch das konsequente Tragen der FFP2-Maske sowie durch den Verzicht auf lautes Sprechen kann die Exposition auf unter 0,08 Milli-Quanta gesenkt werden.

3.5 U-Bahn (neueres Modell)

3.5.1 Eingangsdaten

Als Vertreter einer U-Bahn neueren Typs wurde die Baureihe C2 der MVG herangezogen. Im Gegensatz zur A-Reihe besteht dieser nicht aus einzelnen Waggons, sondern aus einer durchgängigen Reihung mit einer Gesamtlänge von ca. 115 m [29]. Aus diesem Zug wurde ein charakteristischer Abschnitt gewählt und im zonalen Modell umgesetzt. Das zonale Modell unterteilt den Wagen in $9 \times 5 \times 5$ Zonen (x: Länge, y: Breite, z: Höhe, Abbildung 32).

Die betrachtete U-Bahn zeichnet sich durch eine Lüftung mit Festvolumenstrom aus, die im Bedarfsfall erhöht werden kann. Im Heizfall strömt Luft in den hellgrünen Zonen ein. Abluft wird oberhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Im Kühlfall wird diese Lüftungsrichtung umgekehrt. Eine Kühlung der Luft erfolgt nicht.

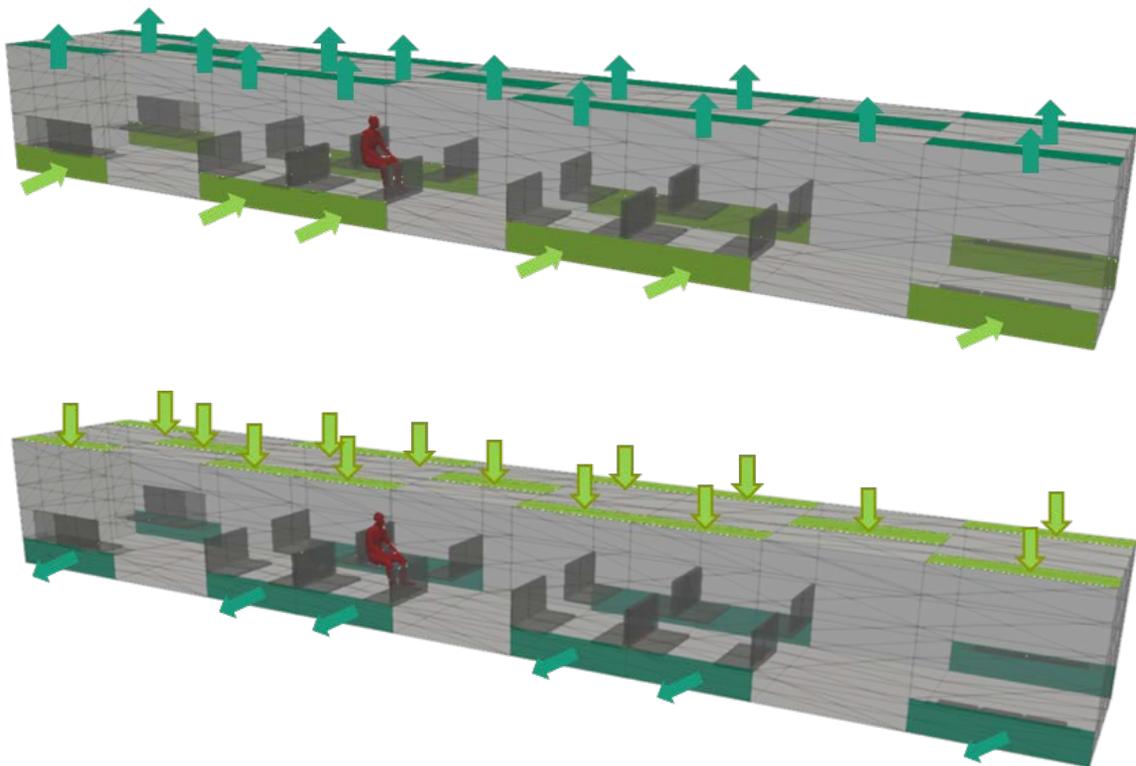


Abbildung 32: Zonales Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- (oben) und Kühlbetrieb (unten) am Beispiel der U-Bahn neuerer Bauart. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrüne Pfeile: Fortluft, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Für das Fahrprofil wird die Annahme aus Abschnitt 3.4.1 übernommen. Die weiteren Eingangsdaten sind in Tabelle 12 dargestellt. Die starke Erhöhung der Frischluftmenge an heißen Tagen (Kühlfall) ist konform zu [30].

TABELLE 12: EINGANGSDATEN FÜR DIE SIMULATION DER U-BAHN NEUERER BAUART

Randbedingung Lüftung	Heizfall	Kühlfall (Lüften)
Frischlufthmenge	2.100 m ³ /h – 3.500 m ³ /h	2.530 m ³ /h – 5.060 m ³ /h
Umluftmenge	0 m ³ /h	0 m ³ /h
Verhältnis Frisch-/Umluft	konstant	konstant
Betriebsart	heizen	kühlen
Türöffnung	20 s, 3 Türen	20 s, 3 Türen
Fahrzeit	72 s	72 s
Fahrdauer	29,5 min	29,5 min
Grundlage	Review IFB, Datenbereitstellung MVG	Review IFB, Datenbereitstellung MVG

3.5.2 Validierung

Für die Überprüfung des Simulationsmodells wurde eine Messfahrt aus AP 3 auf der Strecke München – Kieferngarten bis Klinikum Großhadern herangezogen. Die Belegung wurde anhand der Mitschrift der Messfahrt abgeschätzt und nahm zum Stadtzentrum hin zu und danach wieder ab. Zum Vergleich wird Zone (4,2,2) herangezogen (Abbildung 33). Als Luftmenge wurde mit 2.100 m³/h die Untergrenze des Heizfalls angesetzt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation (Abbildung 34).

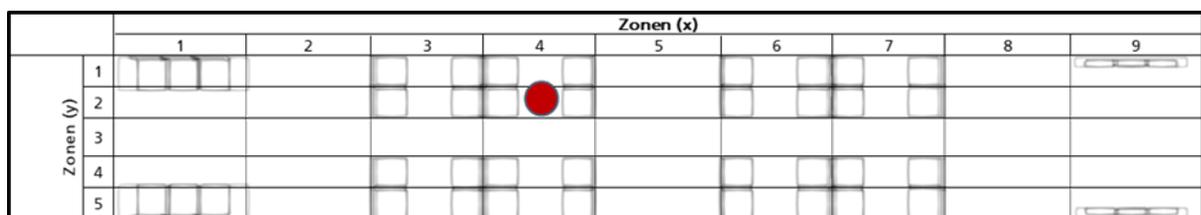


Abbildung 33: Auswertezone für CO₂-Validierung in der U-Bahn neuerer Bauart

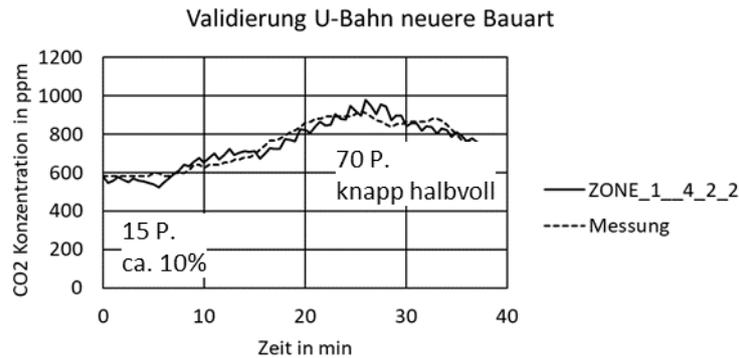


Abbildung 34: Vergleich gemessene und simulierte CO2-Konzentration für die U-Bahn neuerer Bauart.

3.5.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen ohne Maske, mit MNS bzw. FFP2-Maske für die beschriebenen Fälle. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung ist in Abbildung 35 für den Heizfall mit sprechendem Emittent ohne Maske dargestellt.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zonen (y)	1	1	2	4	8	6	1	1	0	0
	2	1	3	6	41	8	2	1	0	0
	3	1	3	11	27	6	3	2	1	0
	4	1	3	6	13	5	2	1	0	0
	5	1	2	2	3	3	1	1	0	0

Abbildung 35: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Atemhöhe um den Emittenten in U-Bahn neuerer Bauart für den Fall "Sprechen ohne Maske" im Heizbetrieb.

Tabelle 13 stellt die Dosis bei einer 29,5-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten dar. In Abbildung 36 sind die Expositionen bei den verschiedenen Luftmengen für den Fall Sprechen mit MNS dargestellt. Durch die Lüftung ist die Dosis im Bereich entfernt vom Emittent niedrig.

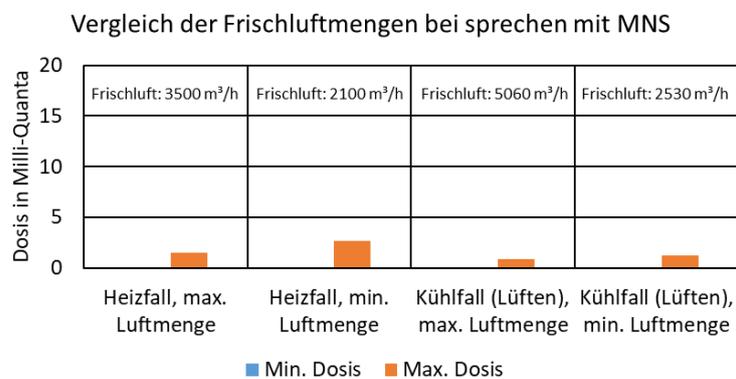


Abbildung 36: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittent.

TABELLE 13: EXPOSITION BEI EINER 29,5-MINÜTIGEN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFIZIERTEN

Dosis in Milli-Quanta	Heizfall, max. Luftmenge		Heizfall, min. Luftmenge		Kühlfall (Lüften), max. Luftmenge		Kühlfall (Lüften), min. Luftmenge	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,01	0,89	0,03	1,52	0,01	0,51	0,02	0,70
Sprechen (ohne Maske)	0,07	4,39	0,13	7,52	0,03	2,51	0,10	3,49
Laut Sprechen (ohne Maske)	0,40	25,09	0,74	42,95	0,14	14,31	0,56	19,90
Atmen (MNS)	0,00	0,31	0,01	0,53	0,00	0,18	0,01	0,25
Sprechen (MNS)	0,02	1,54	0,05	2,63	0,01	0,88	0,03	1,22
Laut Sprechen (MNS)	0,14	8,78	0,26	15,03	0,05	5,01	0,20	6,97
Atmen (FFP2)	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
Sprechen (FFP2)	0,00	0,04	0,00	0,08	0,00	0,03	0,00	0,03
Laut Sprechen (FFP2)	0,00	0,25	0,01	0,43	0,00	0,14	0,01	0,20

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittter.

3.5.4 Schlussfolgerungen

Betrachtet wurde eine 29,5-minütige Fahrt gemeinsam mit einem Infizierten in einer U-Bahn neuerer Bauart mit Lüftungsanlage. Es wurden die minimalen und maximalen Luftmengen betrachtet sowie verschiedene Aktivitätslevel wie Atmen, Sprechen, laut Sprechen bei unterschiedlichen Maskentypen. Die Türöffnung wurde beim Luftaustausch berücksichtigt. Die Simulation zeigt, dass das Tragen von MNS bzw. FFP2-Maske sowie der Verzicht auf Sprechen einen höheren Effekt auf die Reduktion der Exposition haben als die Erhöhung der Frischluftmenge.

3.6 Fernbus

3.6.1 Eingangsdaten

Der betrachtete Fernbus am Beispiel FDH2 ist als zonales Modell in Abbildung 37 dargestellt. Das zonale Modell unterteilt den Wagen in 14 x 5 x 5 Zonen (x: Länge, y: Breite, z: Höhe). Luft strömt in den hellgrünen Zonen im Bereich der Decke ein. Abluft wird unterhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Zusätzlich wird Abluft über die orange markierten Zonen als Umluft in das Klimagerät zurückgeführt. Der Emittent sitzt in der Nähe der Umluft-Absaugung. Der Fahrer besitzt eine gesonderte Lüftung, detaillierte Angaben hierzu liegen nicht vor.

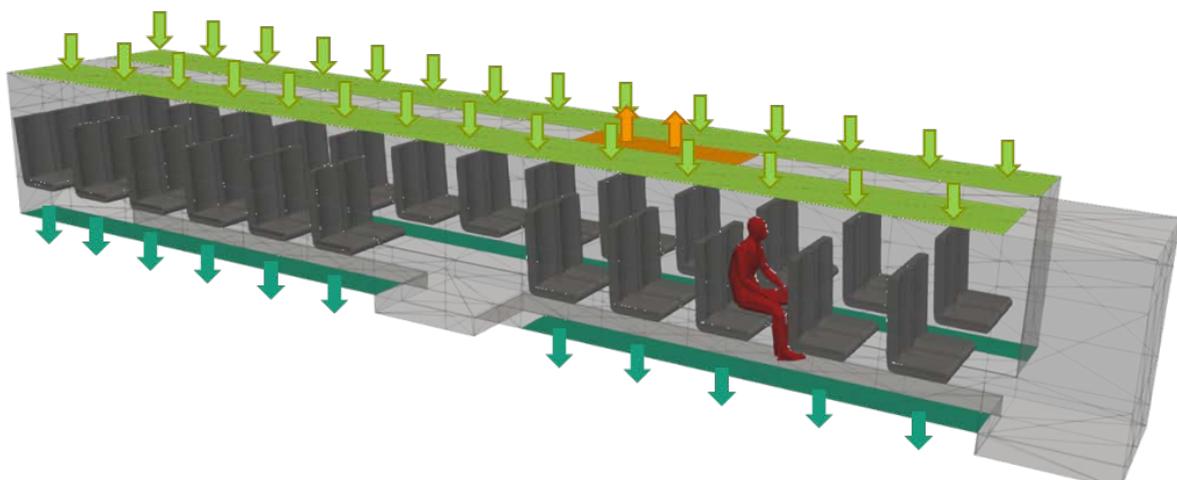


Abbildung 37: Zonales Modell eines exemplarischen Fernbusses. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrün: Fortluft, orange: Umluftabsaugung, rot markierte Person: Emittent (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Der Bus zeichnet sich durch eine Aufdach-Klimaanlage mit Festvolumenstrom aus und hat einen Um-luft-Anteil. Daten zur durchschnittlichen Fahrtdauer von Fernbussen liegen nicht vor, daher werden zur Vergleichbarkeit mit dem Fernverkehrszug ebenfalls 2,5 h angesetzt.

TABELLE 14: EINGANGSDATEN FÜR DIE SIMULATION DES FERNBUSSES

Rand- bedingung Lüftung	Referenzfall	Filterung	Frischlufte nach Feld- messung AP 3
Frischlufte- menge	3.000 m ³ /h	2.700 m ³ /h	700 m ³ /h
Umlufte- menge	1.800 m ³ /h	1.620 m ³ /h	2.500 m ³ /h
Filter- effizienz	-	80 % gegen SARS-CoV-2	-
Verhältnis Frisch-/Um- luft	konstant	konstant	konstant
Türöffnung	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Fahrtdauer	2,5h	2,5h	2,5h
Grundlage	Rückrechnung aus Herstellerangabe zu mittlerem Luftwechselrate (persönliche Kommunikation mit VDL/FlixBus)	Annahme der Luftmengenreduktion um 10 % durch höheren Druckverlust über den Filter (bei techn. möglichen Filtern, AP 1)	Messung aus AP 3, Umluftmenge ergänzt für 3.200 m ³ /h Zuluftmenge

3.6.2 Validierung

Die Validierungsmessung fand im Rahmen von AP 3 (Teil D) statt. Auf der Strecke München – Lindau wurde in einem Fernbus die CO₂-Konzentration gemessen. Der Bus war ca. zur Hälfte besetzt. Zum Vergleich wird Zone (11,4,2) herangezogen (Abbildung 38). Aus diesen Angaben wurde ein Frischluftvolumenstrom von 700 m³/h ermittelt. Mit diesem Volumenstrom stimmen Messung und Simulation im Mittel gut überein, wobei die Simulation einen glatten Verlauf zeigt während die Messung stark schwankt. Ob hier z. B. die Fahrgeschwindigkeit die Lüftung beeinflusst, die Lüftung entgegen der Angabe doch auf den CO₂-Gehalt regelt oder ob z. B. ein Hin- und Wegdrehen der benachbarten Passagiere am CO₂-Messgerät oder Abgase der anderen Fahrzeuge zu diesen Schwankungen führen, kann nur gemutmaßt werden.

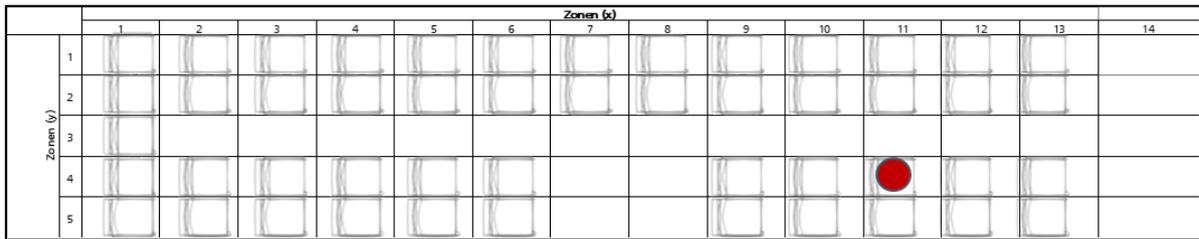


Abbildung 38: Auswertezone für CO₂-Validierung im Fernbus.

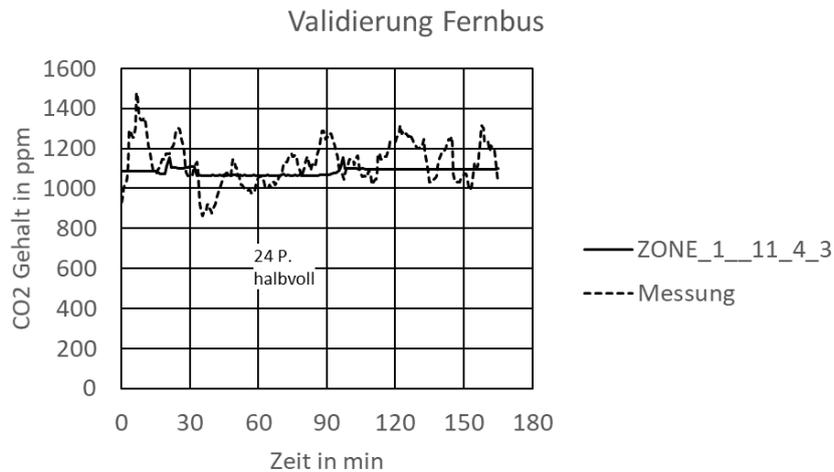


Abbildung 39: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration im Fernbus.

3.6.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS / FFP2-Maske für den Referenzfall, die Annahme einer Umluftfilterung und für die Frischluftmenge, die aus der Messung im Betrieb ermittelt wurde. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) ist in Abbildung 40 für den Referenzfall mit Sprechen ohne Maske dargestellt.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zonen (y)	1	2	2	2	3	3	3	3	3	9	17	5	4	3	
	2	2	2	2	3	3	3	3	4	8	17	9	7	5	
	3	2	2	2	3	3	3	3	3	5	18	36	6	5	6
	4	2	2	2	3	3	3	3	3	6	18	136	6	5	5
	5	2	2	2	2	2	3	3	2	3	6	4	4	4	4

Abbildung 40: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in einem Fernbus mit Umluftanteil beim "Sprechen ohne Maske" für den Referenzfall.

Tabelle 15 stellt die Dosis bei einer 2,5 h dauernden Fahrt zusammen mit einem Infizierten dar. In Abbildung 36 sind vergleichend die Dosis für die Simulationsfälle bei Sprechen mit MNS dargestellt. Die Filterung kann die Exposition im Bereich weiter entfernt vom Emittent um 84 % reduzieren und im Nahbereich um 34 %. Mit der im Betrieb gemessenen Frischluftmenge und der Annahme zur erhöhten Umluftmenge erhöht sich die Exposition weiter entfernt um das Fünffache und im Nahbereich um 25 %.

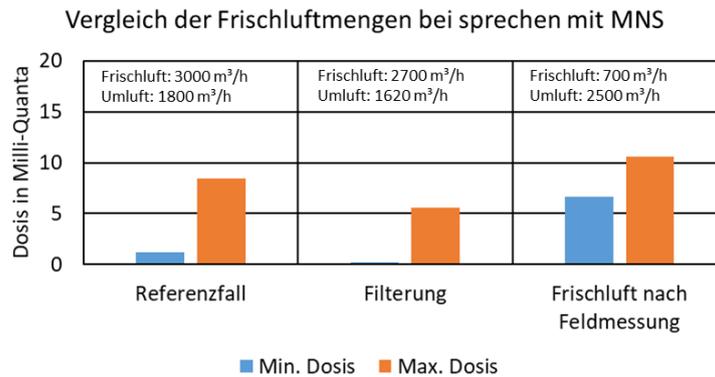


Abbildung 41: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositions menge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitt er.

TABELLE 15: EXPOSITION BEI EINER 2,5 H FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFIZIERTEN

Dosis in Milli-Quanta	Referenzfall		Filterung		Frischluft nach Feldmessung AP 3	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,72	4,98	0,12	3,28	3,91	6,24
Sprechen (ohne Maske)	3,49	24,24	0,56	15,97	19,03	30,39
Laut Sprechen (ohne Maske)	20,40	140,99	3,26	92,84	110,60	176,64
Atmen (MNS)	0,25	1,74	0,04	1,15	1,37	2,18
Sprechen (MNS)	1,22	8,48	0,20	5,59	6,66	10,64
Laut Sprechen (MNS)	7,14	49,35	1,14	32,49	38,71	61,82
Atmen (FFP2)	0,01	0,05	0,00	0,03	0,04	0,06
Sprechen (FFP2)	0,03	0,24	0,01	0,16	0,19	0,30
Laut Sprechen (FFP2)	0,20	1,41	0,03	0,93	1,11	1,77

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitt er.

3.6.4 Schlussfolgerungen

Es zeigt sich, dass die Hersteller- und Betreiberangaben sich von der in der Messung festgestellten Frischluftmenge deutlich unterscheiden. So wurden im Betrieb nur knapp 25 % der angegebenen Frischluftmenge aus der CO₂-Messung ermittelt. Die im Betrieb sich tatsächlich einstellende Luftmenge erscheint hierbei am niedrigsten, was darauf hindeutet, dass sich ein Teillastbetrieb einstellt. Hier wird empfohlen, dass Betreiber und Hersteller die Frischluftzufuhr klären und ggf. Teillastbereiche vermeiden.

Die höchste Schutzwirkung zeigt das konsequente Tragen einer FFP2-Maske durch die Passagiere. Insbesondere wenn nur ein MNS getragen wird, zeigt sich die Umluftfilterung als wirksames Mittel, die Exposition zu reduzieren.

Ein Vergleich mit dokumentierten Ansteckungen während Busfahrten zeigt, dass unter der Annahme, dass das Belüftungssystem ähnlich dem hier betrachteten Bus ist, eine erhebliche Ansteckungsgefahr bestehen kann. So beschreiben [31] bei einer 2,5-stündigen Busfahrt 8 weitere Ansteckungen, die auf einen Infizierten zurückgehen. Die angesteckten Personen befanden sich sowohl in der Nähe als auch weiter entfernt vom Infizierten. [32] haben die Infektion während einer insgesamt 1h 40min dauernden Pilgerfahrt buddhistischer Gläubiger in einem Bus untersucht. Hier wurden im weiteren Verlauf 24 von 68 Fahrgästen positiv auf SARS-CoV-2 getestet.

Beide Studien geben an, dass die Busse mit einem Umluftanteil belüftet waren. Da die Studien Einzelfälle betrachten, ist eine generalisierte Abschätzung eines Risikos wie bei Schnellzügen [27] nicht möglich, da kein Durchschnitt über mehrere Fahrten bzw. eine Angabe zu Fahrten mit Infizierten ohne Ansteckungen mit einfließen. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Indexpersonen Superemitter waren, deren Emission also um den Faktor 10-100 höher ist als in den hier gezeigten Simulationen angenommen. Damit wäre auch die Exposition für die anderen Fahrgäste entsprechend höher gewesen.

Dennoch zeigen die Studien eindrücklich, dass Ansteckungen auch für die hier simulierten Szenarien nicht auszuschließen sind.

3.7 Stadtbus

3.7.1 Eingangsdaten

Der betrachtete Stadtbus (12 m Länge) ist als zonales Modell in Abbildung 42 dargestellt. Das zonale Modell unterteilt den Bus in 13 x 5 x 5 Zonen (x: Länge, y: Breite, z: Höhe). Luft strömt in den hellgrünen Zonen im Bereich der Decke ein. Abluft wird unterhalb der Passagiere in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft. Zusätzlich wird Abluft über die orange markierten Zonen als Umluft in das Klimagerät zurückgeführt. Der Emittent sitzt in der Nähe der Umluft-Absaugung. Der Fahrer besitzt eine gesonderte Lüftung, detaillierte Angaben hierzu liegen nicht vor.

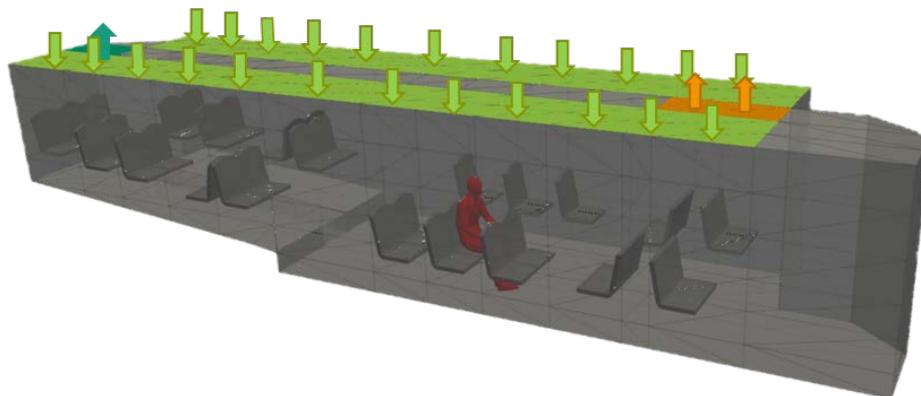


Abbildung 42: Zonales Modell eines exemplarischen 12m-Stadtbusses. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrün: Fortluft, orange: Umluftabsaugung, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Der Bus zeichnet sich durch eine Aufdach-Klimaanlage mit Festvolumenstrom aus und hat einen Umluft-Anteil. Es wurden für diese Art Bus verschiedene Lüftungsdaten bereitgestellt, daher wird hier in „Bus 1“ und „Bus 2“ unterschieden.

TABELLE 16: EINGANGSDATEN FÜR DIE SIMULATION DES STADTBUSSES

Randbedingung Lüftung	Bus 1	Bus 2	Bus 2 Frischlufthmenge nach Feldmessung AP 3
Frischlufthmenge	3.400 m ³ /h	1.900 m ³ /h	520 m ³ /h
Umlufthmenge	2.000 m ³ /h	0 m ³ /h	1.380 m ³ /h
Filtereffizienz	-	-	-
Verhältnis Frisch-/Umluft	konstant	konstant	konstant
Türöffnung	12 s	12 s	12 s
Fahrzeit	70 s	70 s	70 s
Fahrdauer	21,5 min	21,5 min	21,5 min
Grundlage	Datenbereitstellung Betreiber, Review IFB	Hersteller- Angaben, Review IFB	Frischlufthmenge aus Messung rückgerechnet, Umlufthmenge als Differenz zu 1.900 m ³ /h

3.7.2 Validierung

Die Validierungsmessung fand wie bei vorigen Modellierungen im Rahmen von Feldmessungen von AP 3 (Teil D) im beschriebenen Bustyp statt. Auf der Strecke München Am Hart bis Helmholtzzentrum wurde in einem Stadtbus die CO₂-Konzentration gemessen. Der Bus war bei der Messfahrt ca. zur Hälfte besetzt. Zum Vergleich wird Zone (8,4,2) herangezogen (Abbildung 43). Für die Lüftung ergeben sich dabei Frischluftmengen unterhalb der Herstellerangaben. Die aus der Validierung rückgerechnete Frischluftmenge von 768 m³/h wurden in Tabelle 16 entsprechend ergänzt. Abbildung 44 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration, wobei in der Simulation eine konstante Belegung angenommen wurde. Hierdurch ergibt sich für den Bereich 3–8 Minuten eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation.

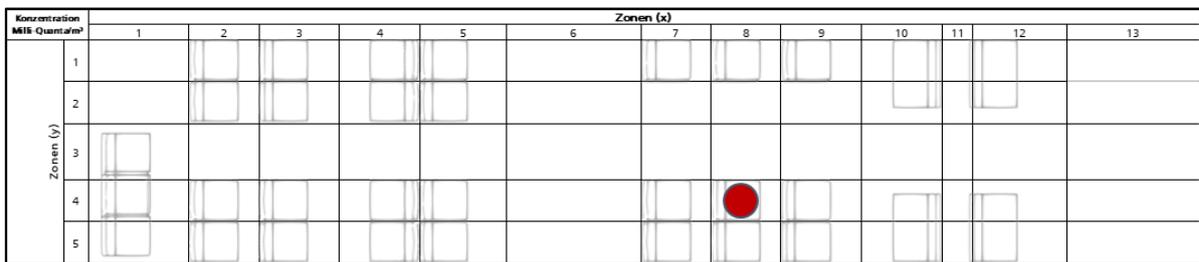


Abbildung 43: Auswertezone für CO₂-Validierung im 12 m Stadtbus.

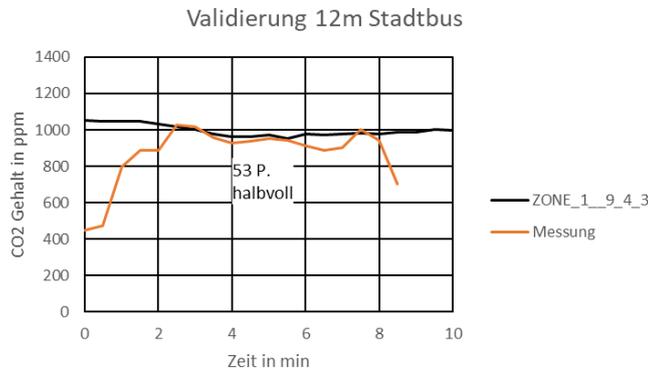


Abbildung 44: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration im Stadtbus.

3.7.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS / FFP2-Maske für die Szenarien. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) ist in für den Fall „Bus 1, Sprechen ohne Maske“ dargestellt.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zonen (y)	1	2	2	3	3	4	4	4	6	4	3	3	2	
	2	3	3	3	4	4	6	8	16	6	4	3	2	
	3	3	3	4	5	5	11	26	52	10	5	3	2	2
	4	3	3	3	4	6	12	19	93	16	7	4	2	0
	5	2	2	3	4	5	6	4	5	4	4	3	2	0

Abbildung 45: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in einem Stadtbus mit Umluft-Anteil beim "Sprechen ohne Maske".

Tabelle 17 zeigt die Dosis bei einer Fahrtdauer von 21,5 min mit einer infizierten Person. In Abbildung 36 sind vergleichend die Ergebnisse für den Fall „Sprechen mit MNS“ aufgeführt. Die aus der Messung ermittelte Frischluftmenge beträgt nur 27 % der technischen Angabe, wodurch sich im Nahbereich eine um den Faktor 2,1 höhere Exposition ergibt.

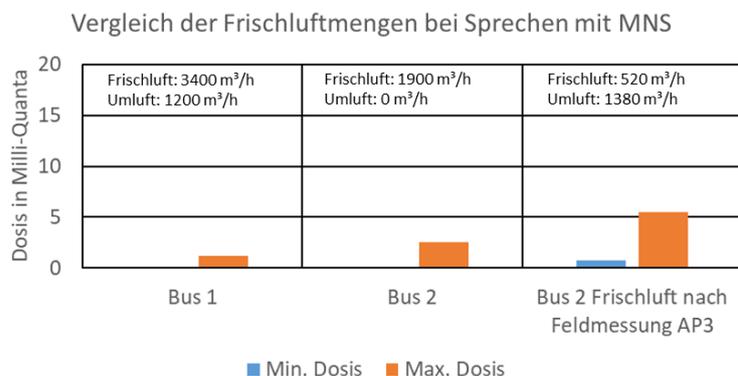


Abbildung 46: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittent.

TABELLE 17: EXPOSITION BEI EINER 21,5 MIN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFIZIERTEN

Dosis in Milli-Quanta	Bus 1		Bus 2		Bus 2 Frischluft nach Feldmessung AP 3	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,07	0,71	0,00	1,48	0,41	3,16
Sprechen (ohne Maske)	0,37	3,50	0,02	7,32	2,03	15,64
Laut Sprechen (ohne Maske)	2,10	19,97	0,10	43,78	11,62	89,34
Atmen (MNS)	0,03	0,25	0,00	0,52	0,14	1,10
Sprechen (MNS)	0,13	1,22	0,01	2,56	0,71	5,48
Laut Sprechen (MNS)	0,73	6,99	0,04	15,32	4,07	31,27
Atmen (FFP2)	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03
Sprechen (FFP2)	0,00	0,03	0,00	0,07	0,02	0,16
Laut Sprechen (FFP2)	0,02	0,20	0,00	0,44	0,12	0,89

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittent.

3.7.4 Schlussfolgerungen

Betrachtet wird eine 21,5-minütige Fahrt mit einem Stadtbuss. Es zeigt sich, dass die Nutzung einer FFP2-Maske sowie der Verzicht auf lautes Sprechen dazu geeignet sind, die resultierende Exposition auf unter 0,03 Milli-Quanta und damit das Infektionsrisiko maßgeblich zu senken.

Es zeigt sich, dass die Hersteller- und Betreiberangaben sich jeweils voneinander sowie von der in der Messung festgestellten Frischluftmenge deutlich unterscheiden. Daher wurden die Modellierungen für alle drei vorhandenen Angaben durchgeführt. Die im Betrieb sich tatsächlich einstellende Luftmenge erscheint hierbei am niedrigsten, was darauf hindeutet, dass sich ein Teillastbetrieb einstellt. Hier wird empfohlen, dass Betreiber und Hersteller die Frischluftzufuhr klären und ggf. Teillastbereiche vermeiden.

3.8 Straßenbahn

3.8.1 Eingangsdaten

Der betrachtete Straßenbahnteil ist an den Flexity in Berlin angelehnt und als zonales Modell in Abbildung 47 dargestellt. Das zonale Modell unterteilt den Wagen in 13 x 4 x 5 Zonen (x: Länge, y: Breite, z: Höhe). Luft strömt in den hellgrünen Zonen unterhalb der Passagiere ein. Abluft wird im Bereich der Decke in den dunkelgrün markierten Zonen abgeführt und wird zu Fortluft und teilweise als Umluft in das Klimagerät zurückgeführt.

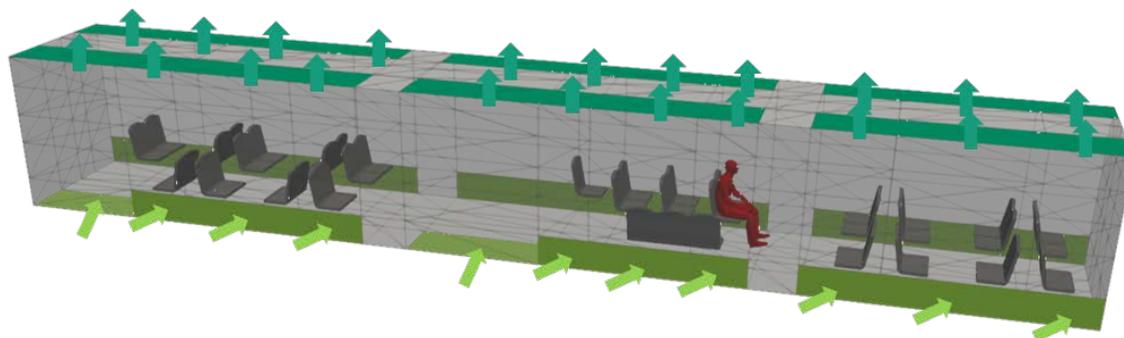


Abbildung 47: Zonales Modell einer exemplarischen Straßenbahn. Hellgrüne Pfeile: Zuluft, dunkelgrün: Fortluft, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

Für die Straßenbahn wurden verschiedene Lüftungsdaten bereitgestellt, daher wird hier in „Straßenbahn 1“ und „Straßenbahn 2“ unterschieden. Die Luftmengen in Tabelle 18 sind jeweils an den betrachteten Gelenkausschnitt angepasst.

TABELLE 18: EINGANGSDATEN FÜR DIE SIMULATION DER STRAßENBAHN

Randbedingung Lüftung	Straßenbahn 1	Straßenbahn 1 mit Umluftfilterung	Straßenbahn 2 entsprechend Messung
Frischlufthmenge	1.346 m ³ /h	1.211 m ³ /h	1.200 m ³ /h
Umluftmenge	994 m ³ /h	894 m ³ /h	1.140 m ³ /h
Filtereffizienz	-	80 % gegen SARS-CoV-2	-
Verhältnis Frisch-/Umluft	konstant	konstant	konstant
Türöffnung	36 s	36 s	36 s
Fahrzeit	127 s	127 s	127 s
Fahrdauer	25 min	25 min	25 min
Grundlage	Datenbereitstellung Alstom, Review IFB	Annahme der Luftmengenreduktion um 10 % durch höheren Druckverlust über den Filter (bei techn. möglichen Filtern, AP 1) Review IFB	Datenbereitstellung Betreiber

3.8.2 Validierung

Die Validierungsmessung fand im Rahmen von AP 3 statt. Auf der Strecke München St. Veit Platz bis Hauptbahnhof Nord wurde in der Straßenbahn 2 die CO₂-Konzentration gemessen. Der Straßenbahn war anfangs leer und im weiteren Verlauf ca. zur Hälfte besetzt. Zum Vergleich wird Zone (9, 2, 3) herangezogen (Abbildung 48). Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter CO₂-Konzentration (Abbildung 49).

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
Zonen (y)	1																
	2																
	3																
	4																

Abbildung 48: Auswertezone für CO₂-Validierung in der Straßenbahn 2.

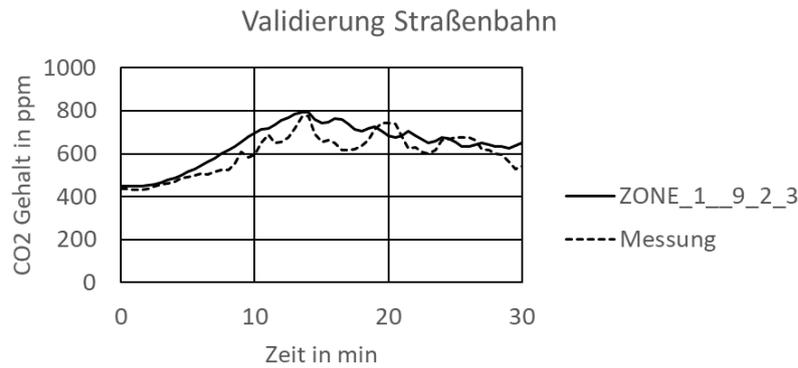


Abbildung 49: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration in der Straßenbahn 2.

3.8.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Simuliert wurden die Fälle Atmen, Sprechen und laut Sprechen mit und ohne MNS / FFP2-Maske für die Szenarien. Eine beispielhafte Konzentrationsverteilung auf Kopfhöhe (ca. 1,1 m) ist in Abbildung 50 für den Fall „Sprechen ohne Maske“ dargestellt.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zonen (y)	1	3	3	4	5	4	5	7	11	5	2	2	2	2
	2	2	3	3	5	5	6	11	17	51	2	2	2	2
	3	2	2	3	4	6	7	6	7	7	2	2	2	2
	4	3	2	3	3	4	8	8	8	6	2	2	2	2

Abbildung 50: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in der Straßenbahn 1 mit Umluft-Anteil beim "Sprechen ohne Maske".

Tabelle 19 stellt die Exposition bei einer Fahrtdauer von rund 25 min zusammen mit einem Infizierten dar. Abbildung 51 vergleicht die Simulationsszenarien für den Fall Sprechen mit MNS. Die Umluftfilterung führt durch die Luftmengenreduktion zu einer leichten Erhöhung um 17 % der Exposition im Nahbereich, reduziert die Exposition weiter entfernt jedoch um 85 %. Die aus der Messung ermittelte Luftmenge führt zu einer Exposition von 2 Milli-Quanta im Nahbereich.

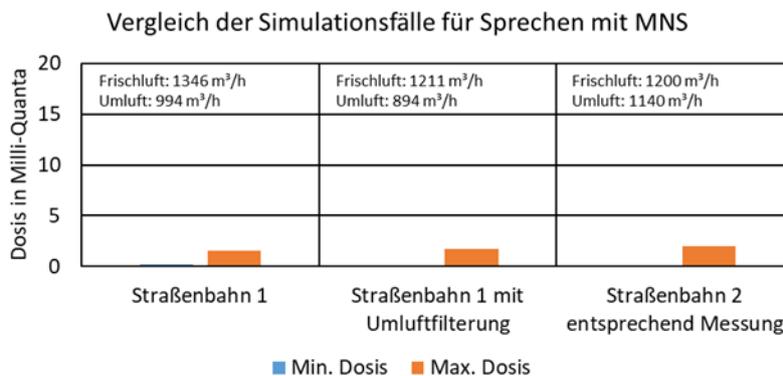


Abbildung 51: Einfluss der Frischluftmenge und Filterung auf die Expositionsmenge. Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittent.

TABELLE 19: EXPOSITION BEI EINER RUND 25-MINÜTIGEN FAHRT ZUSAMMEN MIT EINEM INFIZIERTEN

Dosis in Milli-Quanta	Straßenbahn 1		Straßenbahn 1 mit Umluftfilterung		Straßenbahn 2	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,12	0,87	0,02	1,07	0,16	0,87
Sprechen (ohne Maske)	0,61	4,31	0,08	5,28	0,77	4,31
Laut Sprechen (ohne Maske)	3,49	24,62	0,48	30,15	4,41	24,59
Atmen (MNS)	0,04	0,30	0,01	0,37	0,05	0,30
Sprechen (MNS)	0,21	1,51	0,03	1,85	0,27	1,51
Laut Sprechen (MNS)	1,22	8,62	0,17	10,55	1,54	8,61
Atmen (FFP2)	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Sprechen (FFP2)	0,01	0,04	0,00	0,05	0,01	0,04
Laut Sprechen (FFP2)	0,03	0,25	0,00	0,30	0,04	0,25

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

3.8.4 Schlussfolgerungen

Betrachtet wird eine rund 25-minütige Fahrt mit einer Straßenbahn. Es zeigt sich, dass die Nutzung einer FFP2-Maske sowie der Verzicht auf lautes Sprechen dazu geeignet sind, das Infektionsrisiko maßgeblich zu senken. Eine Umluftfilterung führt zu einer geringeren Belastung weiter entfernt vom Emitter, allerdings aufgrund der damit einhergehenden Reduktion der Luftmengen zu einer leicht höheren Konzentration nahe beim Emitter. Die Größenordnung von Herstellerdaten zur Frischluftzufuhr konnten im Betrieb bestätigt werden.

3.9 Bahnhof oberirdisch

3.9.1 Eingangsdaten

Als oberirdischer Bahnhof wurde beispielhaft ein Bahnsteig in der Haupthalle des Münchener Hauptbahnhofs in der Modellierung abgebildet.

Der Bahnsteig befindet sich zwischen zwei Gleisen und die Passagiere betreten ihn von der in Abbildung 52 rechten Seite. Dieser Fall wird insofern als realistisch aber konservativ angesehen, da ein komplettes Durchströmen des Bahnhofsgebäudes verglichen mit z. B. einem oberirdischen Bahnsteig, einer Bushaltestelle oder S-Bahnstation auf dem Land eher nicht möglich ist. Der Hallenabschnitt wurde in 15 x 4 x 5 Zonen unterteilt, wobei der Emitter in Zone (11,2,2) angenommen wird. Im Vergleich zu den Verkehrsmitteln sind die Zonen in diesem Modell deutlich größer, um die größere Halle abzubilden. Die Zone des Emitters ist in ihrer größten Ausdehnung 5 m lang. Der Abstand von der Zonenmitte zur Nachbarzone ist somit 2,5 m und somit etwas größer als der empfohlene Mindestabstand von 1,5 m.

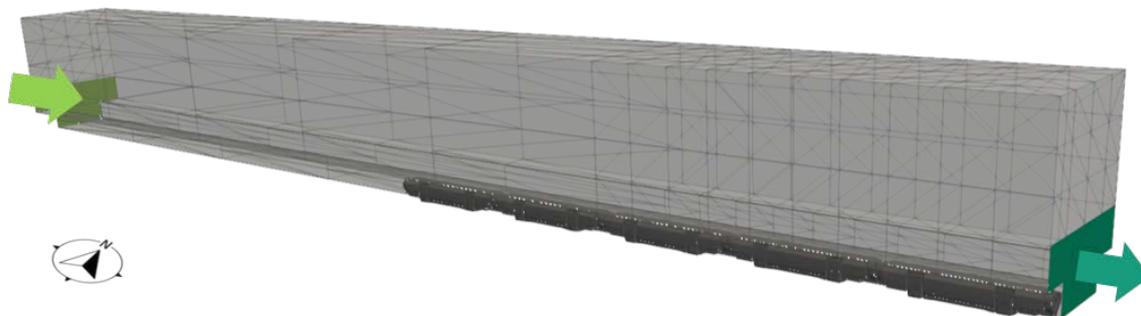


Abbildung 52: Simulationsmodell des oberirdischen Bahnhofs am Beispiel des Münchener Hauptbahnhofs (Darstellung: Fraunhofer IBP).

Als Strömungsrandbedingung wurden zwei Fälle betrachtet, einer bei der mittleren Windgeschwindigkeit aus den Richtungen NW bis SW von 3,3 m/s entsprechend Referenzwetterdaten [16] und ein weiterer, rein thermisch getriebener Fall mit einer angenommenen Temperaturdifferenz von 1 K. Dies ist eine Annahme, jedoch wird erwartet, dass Abwärme von Zügen, Beleuchtung, Passagieren sowie solarer Wärmeeintrag durchaus zu einer leichten Erhöhung der Temperatur im Gebäude führen können. Für die Ermittlung der daraus resultierenden Luftmenge wurde wieder die Formel nach [15] herangezogen.

Die Wartezeit für den Schienenfernverkehr am Bahnhof (Tabelle 20) ist [26] entnommen. Hier ergeben sich durchschnittliche Wartezeiten zwischen 12 und 35 Minuten je nach Reisegrund und Tageszeit.

TABELLE 20: WARTEZEIT AM BAHNHOF IM FERNVERKEHR NACH [26]

Ankunftszeit	Reisezweck	
	Geschäftlich	Urlaub
Tag	12 min	20 min
Nacht	22 min	35 min

3.9.2 Validierung

Es wurden zwar CO₂-Messungen am Münchener Hauptbahnhof durchgeführt, jedoch waren die Messwerte so nah an der Außenluft, dass eine sinnvolle Validierung hier nicht möglich ist.

3.9.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Betrachtet wurden die Fälle mit Wind- oder thermischem Antrieb durch 1 K Temperaturunterschied für die Aktivitätsgrade Atmen, Sprechen und laut Sprechen ohne Maske, mit MNS bzw. FFP2-Maske. Abbildung 53 zeigt das Konzentrationsprofil auf Kopfhöhe (ca. 1,7 m) für den ungünstigen Fall eines thermischen Antriebs, beim Sprechen ohne Maske.

Konzentration Milli-Quanta/m ³		Zonen (x)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zonen (y)	1															
	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4															

Abbildung 53: Konzentrationsverlauf in Milli-Quanta je m³ entlang des Bahnsteigs beim "Sprechen ohne Maske" und rein thermischem Strömungsantrieb.

Tabelle 21 zeigt die potentielle Dosis beim Aufenthalt auf dem Bahnsteig gemeinsam mit einer infizierten Person.

3.9.4 Schlussfolgerungen

Die Expositionen sind selbst im ungünstigen Fall einer rein thermisch getriebenen Strömung vergleichsweise niedrig. Auf lautes Sprechen sollte möglichst verzichtet werden. Der Simulation liegen Annahmen bzgl. Wetter und Raumklima zugrunde, deren Validierung noch aussteht. Hier wäre die Empfehlung, eine Messung in verschiedenen Bahnhofsgebäuden vorzunehmen, mithilfe derer bewertet werden kann, inwieweit diese Annahmen zutreffen.

TABELLE 21: EXPOSITION IM NAHBEREICH BZW. WEITER ENTFERNT VOM EMITTER AM OBERIRDISCHEN BAHNSTEIG: 12 UND 35 MINUTEN WARTE-ZEIT, WINDANSTRÖMUNG, THERMISCHER ANTRIEB

Dosis in Milli-Quanta	Windantrieb 12 min		Windantrieb 35 min		Thermischer Antrieb 12 min		Thermischer Antrieb 35 min	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,09
Sprechen (ohne Maske)	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00	0,15	0,01	0,43
Laut Sprechen (ohne Maske)	0,00	0,11	0,00	0,32	0,02	0,84	0,05	2,45
Atmen (MNS)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03
Sprechen (MNS)	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00	0,15
Laut Sprechen (MNS)	0,00	0,04	0,00	0,11	0,01	0,29	0,02	0,86
Atmen (FFP2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sprechen (FFP2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Laut Sprechen (FFP2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02

Erläuterungen: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

3.10 Bahnhof unterirdisch

3.10.1 Eingangsdaten

Für die Bewertung eines unterirdischen U-Bahnhofs wurde der am häufigsten vorkommende Typ mit Mittelbahnsteig gewählt. In Rücksprache mit dem DZSF wurde als Randbedingung eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit durch die beiden Tunnelröhren von 2 m/s angenommen. Dieser Wert ist das zeitliche Mittel von etwaigen, durch den Kamineffekt entstehenden Strömungen und den Kolbenlüftungseffekt, den einfahrende Bahnen haben. Der unterirdische Bahnhof mit Mittelbahnsteig wird anhand des Knotenpunkts Odeonsplatz in München mit dem U3/U6-Bereich abgebildet. Im zonalen Modell wurde der Bahnhof in $11 \times 6 \times 3$ Zonen unterteilt (Abbildung 54). Der Emitter ist in Zone (6,3,2) verortet. Im Vergleich zu den Verkehrsmitteln sind die Zonen in diesem Modell deutlich größer, um die größere Halle abzubilden. Die Zone des Emitters ist in ihrer größten Ausdehnung 5 m lang. Der Abstand von der Zonenmitte zur Nachbarzone wäre somit 2,5 m.

Nach [26] ist die maximale Wartezeit im ÖPNV abhängig von der Taktung, in der Regel aber nicht länger als 8 min. Daher wird diese Aufenthaltsdauer angenommen.

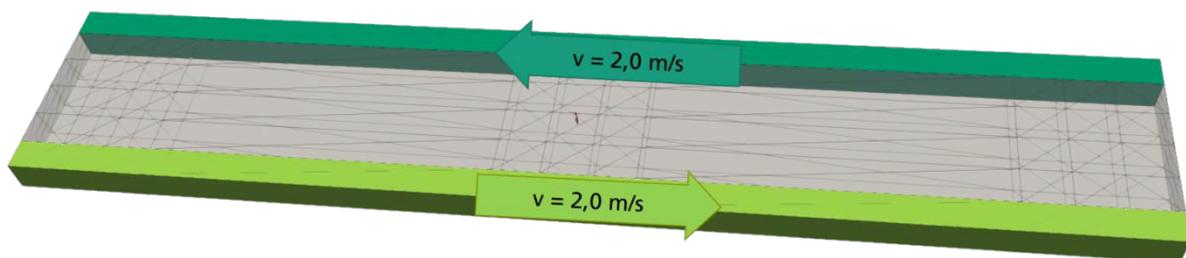


Abbildung 54: Zonales Modell der unterirdischen U-Bahnstation mit Mittelbahnsteig, rot markierte Person: Emitter (Darstellung: Fraunhofer IBP, 2021).

3.10.2 Validierung

Für die Validierung des Modells wurde eine Messung am Münchener Odeonsplatz, Bahnsteig U3/U6 herangezogen. Die CO_2 -Konzentration wird in Zone (6,3,2) ausgewertet (Abbildung 55). Es wird entsprechend eines stetigen Zustroms von Fahrgästen im Berufsverkehr eine Belegung von 343 Personen im Bahnhof angenommen (Wechsel von U-Bahn Typ A und C, gewichtet mit Pandemiefaktor; vgl. Tabelle 23). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten CO_2 -Konzentration (Abbildung 56).

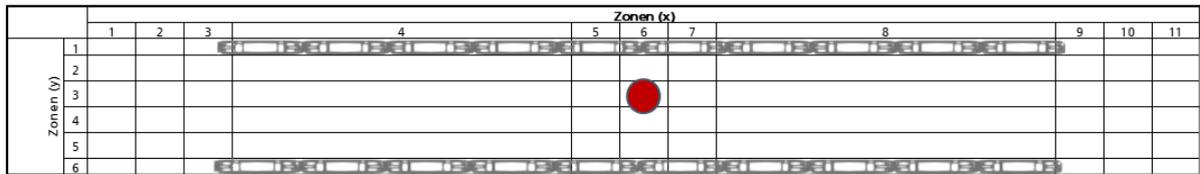


Abbildung 55: Auswerte-Zone (6,3,2) für die Validierung der CO₂-Konzentration.

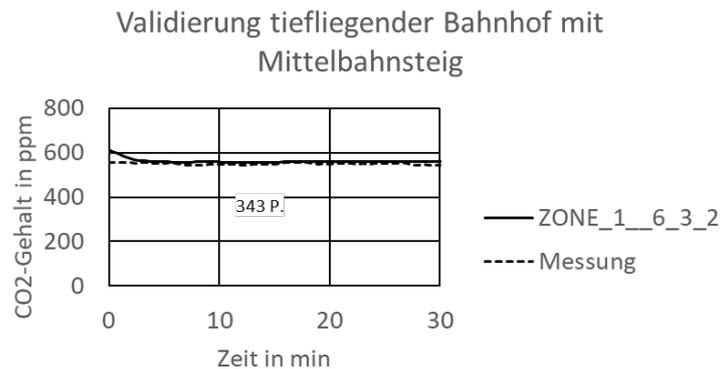


Abbildung 56: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration im tiefliegenden U-Bahnhof mit Mittelbahnsteig.

3.10.3 Hauptergebnisse der Strömungssimulation

Betrachtet wurden die Aktivitätsgrade Atmen, Sprechen und laut Sprechen ohne Maske, mit MNS bzw. FFP2-Maske. Abbildung 57 zeigt das Konzentrationsprofil auf Kopfhöhe (ca. 1,7 m) bei lautem Sprechen ohne Maske.

Konzentration Milli-Quanta/m ³	Zonen (x)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6											

Abbildung 57: Konzentrationsverlauf in Milli-Quanta je m³ entlang des Bahnsteigs beim "Sprechen ohne Maske".

Tabelle 22 zeigt die Exposition bei einem 8-minütigen Aufenthalt auf dem Bahnsteig gemeinsam mit einem infizierten Passagier.

TABELLE 22: EXPOSITION IM NAHBEREICH BZW. WEITER ENTFERNT VOM EMITTER AM UNTER-IRDISCHEN BAHNHOF FÜR 8 MINUTEN WARTEZEIT

Dosis in Milli-Quanta	Wartezeit 8 min	
	min. Dosis (entfernt)	max. Dosis (nah)
Atmen (ohne Maske)	0,00	0,04
Sprechen (ohne Maske)	0,00	0,19
Laut Sprechen (ohne Maske)	0,01	1,10
Atmen (MNS)	0,00	0,01
Sprechen (MNS)	0,00	0,07
Laut Sprechen (MNS)	0,00	0,38
Atmen (FFP2)	0,00	0,00
Sprechen (FFP2)	0,00	0,00
Laut Sprechen (FFP2)	0,00	0,01

3.10.4 Schlussfolgerungen

Es zeigt sich insbesondere die Erhöhung der Exposition durch lautes Sprechen (Faktor 28 gegenüber Atmen). Dieses kann effektiv mit dem Tragen einer FFP2-Maske reduziert werden. Generell ist die Exposition niedrig im Vergleich zur Exposition in den Verkehrsmitteln.

4 Abstandseinhaltung und Crowd Management

Die Wahrscheinlichkeit mit virushaltigen Tröpfchen und Aerosolen in Kontakt zu kommen ist insbesondere im Umkreis von ein bis zwei Metern um eine mit dem Coronavirus SARS-CoV-2 infizierte Person erhöht. Aus diesem Grund wird ein Mindestabstand von 1,5 Meter zu einer weiteren Person empfohlen, um sich vor einer Ansteckung über Tröpfchen mit SARS-CoV-2 zu schützen (siehe Abschnitt 5.2).

Als Abschätzung, ob der Abstand von 1,5 m eingehalten werden kann, wird die dafür mögliche maximale Belegungsichte ermittelt. Ein Kreis von 1,5 m Durchmesser benötigt eine Grundfläche von 1,76 m². Dies entspricht einer maximalen Belegungsichte von 0,56 Passagieren je Quadratmeter unter Vernachlässigung von Flächen, die nicht von Fahrgästen genutzt werden können.

Aus statistischen Angaben zur Veränderung der Fahrgastzahlen im 2. Quartal 2020 gegenüber 2019 [33] wurde der Pandemiefaktor ermittelt, der die Reduktion des Fahrgastaufkommens abschätzt. Für Nahverkehrsmittel ist diese Abschätzung gröber, da Zeitkarten nicht mitberücksichtigt wurden und keine weiteren öffentlich verfügbaren Quellen zu Fahrgastzahlen im Pandemiezeitraum gefunden wurden. Mithilfe damit abgeschätzter Passagierzahlen während und vor der Pandemie sowie der Fläche und max. Fahrgastzahl wird für typische Verkehrsmittel des Fern-, Regional- und Nahverkehrs, die in den beiden Messgebieten München und Braunschweig/Hannover eingesetzt werden, sowie Alstom-Fahrzeuge, die für die Simulation ausgewählt wurden, ermittelt, inwieweit die Belegungsichte von 0,56 Personen/m² überschritten wird (Tabelle 23). Es zeigt sich, dass selbst im typischen Pandemiebetrieb lediglich im Fernverkehrszug (ICE 4) die Einhaltung des Mindestabstandes möglich ist. Bei relativ hoher Auslastung („Außergewöhnliche Zuladung“ gemäß EN 15663 mit Berücksichtigung Pandemiefaktor, bzw. „Normale Zuladung im Betrieb“ und „Außergewöhnliche Zuladung“ ohne Berücksichtigung Pandemiefaktor) wird allerdings auch hier die Belegungsichte von 0,56 Personen/m² überschritten. Somit ist generell davon auszugehen, dass der Mindestabstand von 1,5 m höchstens in ausgewählten Einzelfällen eingehalten werden kann, etwa in gering besetzten Verkehrsmitteln in der Nacht oder auf Nebenstrecken.

Es zeigt sich in allen Simulationen, dass im Nahbereich des Infizierten lokal höhere Konzentrationen vorhergesagt werden als weiter entfernt. Daher sollte die Fahrgastlenkung (Crowd Management) darauf abzielen, möglichst große Abstände zwischen den Passagieren zu sichern.

Fahrgastlenkung kann zwei Ziele verfolgen. Idealerweise würde sie Personen von identifizierten SARS-CoV-2 infizierten Fahrgästen fernhalten. Da diese nicht bekannt sind bzw. bekannte Emittierende sich nicht im ÖV aufhalten (sollten), ist nur die zweite Methode sinnvoll: Mit Methoden der Fahrgastlenkung sicherzustellen bzw. zu unterstützen, dass Mindestabstände zwischen Fahrgästen eingehalten werden. Die Auslastungszahlen zeigen jedoch, dass dies nicht generell möglich ist, da der verfügbare Platz nicht zur Einhaltung der Abstände ausreicht. In Fällen, in denen der Platz im Fahrzeug ausreicht, um Mindestabstände einzuhalten, ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Fahrgäste auf das Fahrzeug anzustreben.

Zur Unterstützung beim Einhalten von Abstandsregeln in Außenbereichen erscheint auf den ersten Blick eine organisatorische Lenkung von Passagierströmen, etwa durch Trennung von Ein- und Ausgängen, eine geeignete Maßnahme. Auf den zweiten Blick stehen jedoch aufgrund der baulichen Viel-

fältigkeit von Stationen und Bahnhöfen und der Menge an Passagieren mit hoher Mobilität insbesondere im Personennahverkehr sowie der vergleichsweise niedrigen Exposition dieser Situationen solche Maßnahmen in keinem Kosten-Nutzenverhältnis. Insbesondere im Nahverkehr stehen auch psychologische Mechanismen derartigen Lenkungen entgegen: So konnten [34] zeigen, dass die Einhaltung von Regeln des Social Distancing eng verwoben ist mit der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, d. h. der Fähigkeit der Menschen, sich den Nutzen des Abstandhaltens präsent zu halten. Betrachtet man die hochgradige Nutzung des Arbeitsgedächtnisses insbesondere im alltäglichen Leben (gedankliche Beschäftigung mit Dingen, die erledigt werden müssen, etc.), würde der Versuch einer zusätzlichen Änderung von Routinen (etwa indem bestimmte Zugänge zu Stationen nicht mehr genutzt werden können oder Wegführungen geändert werden) zu einer Überforderung einzelner Passagiere und damit ggf. zu 'chaotischem' Verhalten mit potenziell erhöhten Problemen für das Abstandhalten (z. B. gegen die geführte Richtung laufen) führen. Es kann vermutet werden, dass andere denkbare Formen der Passagierlenkung, wie etwa Apps, die Zugauslastungen in Echtzeit an Passagiere vermitteln, im Nahverkehr ähnliche Schwierigkeiten respektive fehlende Nutzung hervorrufen würden, und dies umso mehr, je mehr sich die Situation normalisiert und Personen wieder ihren üblichen Verhaltensroutinen unterliegen. Maßnahmen, die durch eine einmalige Entscheidung umgesetzt werden können und sich als risikosenkend herausgestellt haben, wie das Tragen einer Maske in den Außenbereichen mit hohem Personenaufkommen, erscheinen hier erfolgsversprechender. Derzeit werden technische Methoden erprobt, die einsteigende Fahrgäste bereits auf dem Bahnsteig gleichmäßig entsprechend der Fahrzeugauslastung verteilen helfen sollen (vgl. System der Firma INIT, siehe Teil B). Diese werden erst seit kurzem im prototypischen Betrieb getestet, so dass noch keine belastbare Datenbasis besteht, um deren Nutzen zu bewerten und auf deren Grundlage Simulationen der Fahrgastlenkung durchzuführen.

Des Weiteren wird Fahrgastlenkung in Bahnhöfen mittels auf den Boden geklebter Markierungen oder Absperrungen durchgeführt. Auch dazu existieren keine Studien und empirischen Daten, die für Simulationen der Fahrgastlenkung erforderlich wären. Ziel solcher organisatorischen Maßnahmen, wie Kommunikation durch Plakate oder Bodenmarkierungen, ist die Erinnerung an die Abstandsregeln zu unterstützen. Ergänzend hilfreich zur Identifikation problematischer Bereiche und/oder Bereiche, in denen Abstandsregeln nicht eingehalten werden (können), durch die Betreiber könnten neue Ansätze zur Erfassung von Distanzen im Crowd Management sein, wie sie etwa von [35] für die Echtzeit-Erfassung von Fußgänger-Bewegungsverläufen inklusive Gruppen- und Interaktionsanalysen demonstriert werden. Allerdings sind auch diese noch im Forschungsstadium.

Ähnlich auseinander fallen die Möglichkeiten zur Unterstützung bei der Einhaltung von Abstandsregeln in den Innenbereichen (Waggons). Während im Fernverkehr die zurzeit umgesetzten Blockierungen von Sitzen im Buchungssystem mit ggf. Erhöhung der Verbindungen bis zu einer erheblichen Reduktion des Allgemeinrisikos als geeignete Maßnahmen zur Abstandswahrung erscheinen, ist dies im Nahverkehr kaum möglich. Hier können ebenfalls nur Kommunikationsmaßnahmen zur Erinnerung an die Abstandsregeln helfen. Diese müssen so gestaltet sein, dass sie nicht zur Reaktanz, also einer Abwehrreaktion, bei Fahrgästen führen (z. B. indem klargemacht wird, dass auch die Betreiber wissen, dass Abstände in vollen Zügen natürlich nicht eingehalten werden können).

TABELLE 23: TYPISCHE BELEGUNGEN WÄHREND UND VOR DER PANDEMIE (TATSÄCHLICHE SITZ-/STEHPLÄTZE VARIIEREN JE NACH AUSFÜHRUNG)

Fahrzeugart (Referenz)	Sitz- plätze	Steh- plätze	Pandemie- faktor [36],[33]	Fahrgastanzahl (Ergebnisse absolut und je m ²)								Quelle
				Typisch (Pandemiebetrieb)		Hoch (Pandemiebetrieb)		Typisch (Normalbetrieb)		Hoch (Normalbetrieb)		
				abs.	1/m ²	abs.	1/m ²	abs.	1/m ²	abs.	1/m ²	
Fernverkehrs-Triebzug (ICE 4)	88	73*	0,28	20	0,27	45	0,61	70	0,96	88+73*	2,18	[37, 38]
Regionaltriebzug (Talent) 3)	53	59	0,41	28	0,64	46	1,04	69	1,55	112	2,52	[39, 40]
S-Bahn (Talent 2)	56	67	0,41	31	0,68	50	1,12	75	1,66	123	2,73	Angaben Alstom
U-Bahn (SWM Typ A)	49	96	0,59	49	1,05	86	1,84	82	1,77	145	3,13	[29]
U-Bahn (SWM Typ C2)	220	720	0,59	294	1,11	555	2,10	499	1,89	940	3,56	[29]
Stadtbus (Citaro 12m)	31	75	0,64	37	1,25	68	2,26	58	1,95	106	3,53	[41]
Stadtbahn (TW 3000 Hannover)	54	113	0,59	55	1,09	99	1,94	94	1,85	167	3,29	[42]

*inkl. theoretische Abschätzung Stehplätze auf Basis der Grundfläche und Personendichte von 4 Personen/m² (gemäß [43]).

5 Risikobewertung

SARS-CoV-2 ist ein neuartiges Coronavirus, welches als Auslöser der Erkrankung COVID-19 identifiziert wurde [44]. In dieser Risikoeinschätzung wird das Ansteckungsrisiko mit SARS-CoV-2 durch Nutzung des Schienen- sowie im Straßenpersonennah und -fernverkehrs in Deutschland dargestellt.

Die Bewertung des Risikos erfolgt nach dem Leitfaden für die Bewertung gesundheitlicher Risiken des BfR [45]. Hierbei werden folgende Schritte durchgeführt:

- Gefahrenidentifizierung:
„Identifizierung und Beschreibung eines biologischen, chemischen oder physikalischen Agens, das möglicherweise zu gesundheitsschädlichen Auswirkungen führt“
- Gefahrencharakterisierung
„Qualitative und/oder quantitative Beurteilung der gesundheitsschädlichen Wirkung, die von der Gefahrenquelle ausgehen könnte, ggf. unter Berücksichtigung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung“
- Expositionsschätzung
„Qualitative und/oder quantitative Beschreibung und Beurteilung der Aufnahme des Agens unter Berücksichtigung der relevanten Expositionspfade“
- Risikocharakterisierung
„Qualitative und/oder quantitative Ermittlung von Art, Wahrscheinlichkeit des Auftretens und Schwere der gesundheitlichen Beeinträchtigungen, basierend auf Gefahrenidentifizierung, Gefahrencharakterisierung sowie Expositionsschätzung“

5.1 Gefahrenidentifizierung

Beim Robert-Koch-Institut (RKI) findet sich eine gute und ausführliche Übersicht zu den Eigenschaften und der Infektiosität des neuartigen Coronavirus SARS-CoV-2, die ständig überarbeitet wird [46]. Auf diese wird im Folgenden Bezug genommen. Coronaviren sind sowohl bei Säugetieren, als auch bei Vögeln weit verbreitet. Beim Menschen lösen sie hauptsächlich milde Erkältungen aus, können jedoch auch schwere Lungenentzündungen hervorrufen. Um in die Wirtszellen zu gelangen, verwendet SARS-CoV-2 das ACE-2-Enzym als Rezeptor. Eine hohe Dichte dieser Rezeptoren findet sich im Atemwegstrakt, aber auch im Darm, in Gefäßzellen, in der Niere, im Herzmuskel und in weiteren Organen [46].

Das Virus wird hauptsächlich durch Inhalation virentragender Partikel übertragen [47]. Es werden derzeit die folgenden drei Übertragungswege für SARS-CoV-2 diskutiert [48, 49]:

- Die Übertragung durch Tröpfchen unterschiedlicher Größe, die das Virus enthalten, die durch eine infizierte Person emittiert werden.
- Die Übertragung kleinster Tröpfchen und Partikel (Aerosole), die das Virus enthalten und für längere Zeit in der Luft schweben können und größere Distanzen überwinden.
- Die Übertragung durch den direkten Kontakt mit dem Virus durch Kontakt mit einer infizierten Person oder durch direkten Kontakt mit kontaminierten Oberflächen.

Zu Beginn der Pandemie wurde befürchtet, dass die Übertragung in erheblichem Umfang auch durch kontaminierte Oberflächen erfolgt, weil SARS-CoV-2 auf verschiedenen Oberflächen auch über mehrere Tage nachgewiesen werden konnte. Allerdings konnten keine viralen SARS-CoV-2-Genombestandteile amplifiziert werden und auch kein replikationsfähiges Virus von diesen Oberflächen kultiviert werden. Damit verlor die Exposition mit kontaminierten Oberflächen als Hauptübertragungsweg an Bedeutung.

Kontaminierte Aerosole erhöhen das Ansteckungsrisiko vor allem in Innenräumen bei längerer Aufenthaltsdauer. Diskrete Zeitangaben für die Aufenthaltsdauer, die zu einer Infektion führt, können aufgrund der großen Bandbreite der das medizinische Risiko beeinflussenden Faktoren nicht gegeben werden. Genau aus diesem Grund ist auch Bahn- und Busreisen mit einem nicht exakt bestimmbar medizinischen Infektionsrisiko verbunden, wenn Mitreisende infektiös sind. Gegenstand der derzeitigen Forschung ist es, herauszufinden, in welcher Form sich bestimmte Mutationen auf die Eigenschaften des Virus wie z. B. Übertragbarkeit, Virulenz oder Immunogenität auswirken. Für die neu aufgetretenen Varianten des Virus wird eine deutlich erhöhte Übertragbarkeit diskutiert [50]. Da in dieser Studie relative technische Risiken miteinander verglichen werden, beeinflusst dieser Umstand die prinzipiellen Ergebnisse dieser Studie nicht. Allerdings ist davon auszugehen, dass sich die Ansteckungsrate bereits bei niedrigerer Exposition erhöht. Die Bedeutung der in den vorigen Kapiteln beschriebenen wirksamen Risiko-Reduktionsmaßnahmen nimmt dadurch weiter zu.

5.2 Gefahrencharakterisierung

Für die Gefahrencharakterisierung dient die Übersicht des RKI zu diesem Thema [46] als Orientierung.

Die Übertragung von SARS-CoV-2 durch Tröpfchen, wie sie beim Atmen, Husten, Sprechen, Singen und Niesen entstehen [51, 52], gilt als wichtigster Infektionsweg. Diese Erkenntnis führte zur Empfehlung des Mindestabstandes zu anderen Personen, wobei der als „sicher“ angegebene Abstand je nach Behörde unterschiedlich angegeben wird. So empfiehlt das Center for Disease Control (CDC) der USA einen Mindestabstand von 2 Metern, während die WHO einen Abstand von 1 Meter postuliert. In Deutschland wird ein Abstand von mindestens 1,5 Metern empfohlen. Diese voneinander abweichenden Empfehlungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Einschätzungen, in welchem Abstand die Tröpfchen nach dem Ausstoßen zu Boden sinken. Dies hängt mit der angenommenen Tröpfchengröße und den Größenunterschieden zwischen „Tröpfchen“ und „kleinen Tröpfchen“ zusammen. Bisher wurde üblicherweise ein Cut off von 5 μm für die Tröpfchengröße angenommen [53]. Auch die Empfehlung des Tragens eines Mund-Nasen-Schutzes (MNS) basiert darauf, die (größeren, > 20 μm) Tröpfchen zurückzuhalten.

Eine Übertragung von SARS-CoV-2 durch Aerosole wurde erst im weiteren Verlauf der Pandemie als Übertragungsweg identifiziert [54, 55]. Der Unterschied zwischen Tröpfchen und Aerosolen besteht in der Partikelgröße bzw. den physikalischen Eigenschaften. Der Übergang zwischen beiden Formen ist fließend. Während größere Partikel schneller zu Boden sinken, können die kleineren Aerosole noch über längere Zeit in der Luft schweben und sich dadurch in geschlossenen Räumen verteilen. Ob und wie lange die Tröpfchen und Aerosole in der Luft schweben bleiben, ist von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig [46, 52].

Studien haben gezeigt, dass Aerosole beim Atmen und Sprechen und vermehrt beim Schreien und Singen freigesetzt werden [6, 55–64]. Neben der unterschiedlichen Lautstärke können auch individuelle Eigenschaften, wie z. B. eine erhöhte Aerosolabgabe durch Superemitter, zu einer erhöhten Emission beitragen [6].

Die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung von SARS-CoV-2 auch über weitere Distanzen als den empfohlenen Mindestabstand hinaus steigt mit zunehmender Quellstärke der infizierten Person (z. B. durch lautes Sprechen) und mit längerer gemeinsamer Aufenthaltsdauer in geschlossenen und schlecht belüfteten Räumen. Dies wurde bereits in mehreren Fällen, wie beim gemeinsamen Singen oder schwerer körperlicher Arbeit, nachgewiesen [65–67]. Laut Aussage des Umweltbundessamtes ist es durch einen

effektiven Luftaustausch im Raum möglich, die Konzentration der Aerosole zu verringern [68], allerdings wird auch hier keine quantitative Angabe getätigt, wie hoch der Luftwechsel sein sollte und welche Risikoreduktion erreicht wird.

Die Studienlage zeigt, dass unter Einhaltung des Mindestabstandes die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung auf andere in Außenbereichen sehr gering ist [69], so dass Übertragungen in Außenbereichen insgesamt selten vorkommen. Im anhängenden Material von [69] sind bis Juni 2020 weltweit 7 von insgesamt 266 identifizierten Clustern einer Außenansteckung zugeordnet, 20 waren Innen-/Außen zugeordnet.

Es hat sich als wichtig herausgestellt, ob eine infizierte Person zum Übertragungszeitpunkt bereits Symptome entwickelt hat oder sich in einem (noch) asymptomatischen Stadium befindet, wobei Personen mit bereits vorhandenen Krankheitssymptomen von großer Bedeutung sind [70]. Um die Zeit des Symptombeginns ist die Ansteckungsfähigkeit am höchsten [70, 71]. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil von Personen steckt sich allerdings bei Personen an, die erst einige Tage später Krankheitssymptome entwickeln [72], [70]. Ansteckungen, die bei asymptomatischen Erkrankten erfolgten, wurden zwar beschrieben, konnten aber nicht ausreichend gut quantifiziert werden [71].

Um das Infektionsrisiko, das insbesondere auch von (noch) nicht erkannten Infektionsträgern ausgeht, zu verringern, sind vor allem folgende Maßnahmen wirksam [46]:

- Schnelle Isolierung von positiv getesteten Personen
- Identifikation von Kontaktpersonen
- Frühzeitige Quarantäne
- Einhalten der AHA + L- Regel (Abstand, Hygieneregeln, (Alltags-)Masken, Lüften)

Die Inkubationszeit wird meist mit 5-6 Tagen angegeben [46]. In unterschiedlichen Übersichtsarbeiten werden die Manifestationsindizes (Anteil der Infizierten, die auch tatsächlich erkranken) auf 55 % - 85 % geschätzt [71, 73, 74].

Männliche und weibliche Personen sind von Infektionen mit SARS-CoV-2 mit etwa gleicher Häufigkeit betroffen. Männer weisen jedoch eine höhere Rate an schweren Erkrankungen sowie eine höhere Letalität als Frauen auf [75, 76].

Die in Deutschland am häufigsten gemeldeten Symptome umfassen Husten, Schnupfen, Fieber, sowie den Verlust von Geruchs- und Geschmackssinn. Es existieren Unterschiede im Krankheitsverlauf bezüglich Schwere und Symptomatik vom asymptomatischen Verläufen bis hin zu schweren Pneumonien mit Lungenversagen und einem letalen Verlauf. In Deutschland sind etwa 2,6 % der Personen mit bestätigter SARS-CoV-2-Infektion in Zusammenhang mit COVID-19 verstorben ([46], Stand: 24.02.2021).

Schwangere entwickeln laut aktueller Datenlage seltener Symptome [77–81]. Erste Auswertungen aus dem CRONOS-Register zeigten für Schwangere in Deutschland einen überwiegend günstigeren Verlauf [77]. Einige wenige Studien zeigten eine höhere Wahrscheinlichkeit für einen schweren Verlauf mit Aufnahme auf eine Intensivstation sowie für eine invasive Beatmung [80]. Bei der Bewertung des relativen Risikos Schwangerer ist zu beachten, dass das Risiko für schwerere Krankheitsverläufe für Frauen im gebärfähigen Alter grundsätzlich gering ist. Die Mortalität ist als insgesamt sehr gering einzustufen, die bekannten Risikofaktoren erhöhen jedoch auch bei Schwangeren das Risiko für einen schwereren Verlauf. Das Risiko nimmt zu, je älter die werdende Mutter ist.

Bei Personen ohne bekannte Vorerkrankungen und bei jüngeren Patienten kann es ebenfalls zu schweren Krankheitsverläufen kommen [82–85].

Bei den folgenden Personengruppen wurden häufiger schwere Verläufe beobachtet:

- Ältere Personen (mit stetig steigendem Risiko für einen schweren Verlauf ab etwa 50–60 Jahren; 85 % der in Deutschland an COVID-19 Verstorbenen waren 70 Jahre alt oder älter)
- Männliches Geschlecht [75, 76]
- Raucher [86–88] (schwache Evidenz)
- Stark adipöse Menschen
- Personen mit bestimmten Vorerkrankungen (Herz-Kreislauf-System, chronische Lungenerkrankungen, chronische Leber- und Nierenerkrankungen, Diabetes mellitus, Krebserkrankungen) [89–91].

Durch die Infektion mit SARS-CoV-2 bilden sich Antikörper, die sich in der Regel zwei Wochen nach Beginn der Krankheitssymptome nachweisen lassen [92–94]. Ab welchem Grad die Antikörper-Titer mit einem Schutz vor einer erneuten Infektion oder schweren Erkrankung in Zusammenhang stehen, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch offen.

Die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln wie Zügen, Bussen und Straßenbahnen stellt einen Aufenthalt in geschlossenen Räumen dar. Oberirdische, überdachte Bahnhöfe und Haltestellen entsprechen dem Außenraum. Unterirdische Bahnhöfe können nicht eindeutig dem Außen- bzw. Innenraum zugeordnet werden. Baulich werden sie zwar als Innenraum wahrgenommen, die hohe Luftwechselrate durch die Kolbenströmung der durchfahrenden Züge führt aber zu einer Lüftungssituation nahe dem Außenraum. Eine zusätzliche aktive Belüftung unterirdischer Bahnhöfe erfolgt in der Regel nicht.

5.3 Expositionsschätzung – Aufnahme von SARS-CoV-2 durch Aerosole

In Kapitel 4 wurde dargestellt, dass innerhalb der Verkehrsmittel des ÖV damit zu rechnen ist, dass der Abstand von 1,5 m zwischen zwei Personen wiederholt, zeitweise oder auch dauerhaft unterschritten wird. Um die Exposition durch Tröpfchen zu verhindern, ist das Tragen eines MNS oder einer FFP2-Maske in diesen Verkehrsmitteln notwendig.

Die mögliche Exposition gegenüber SARS-CoV-2 über Aerosole wird für die einzelnen Verkehrsmittel in Kapitel 3 detailliert dargestellt. In Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60 sind vergleichend die Fälle „Atmen ohne Maske“, „Sprechen mit MNS“ und „laut Sprechen mit FFP2“ dargestellt. Die jeweiligen Aufenthaltszeiten in den Verkehrsmitteln mussten mangels vorhandener Datengrundlagen abgeschätzt werden. Für die Auswahl wurden jeweils ein Referenzfall bzw. tatsächlich gemessene Fälle herangezogen. Dabei wird die im Szenario ermittelte Quanta-Aufnahme angegeben.

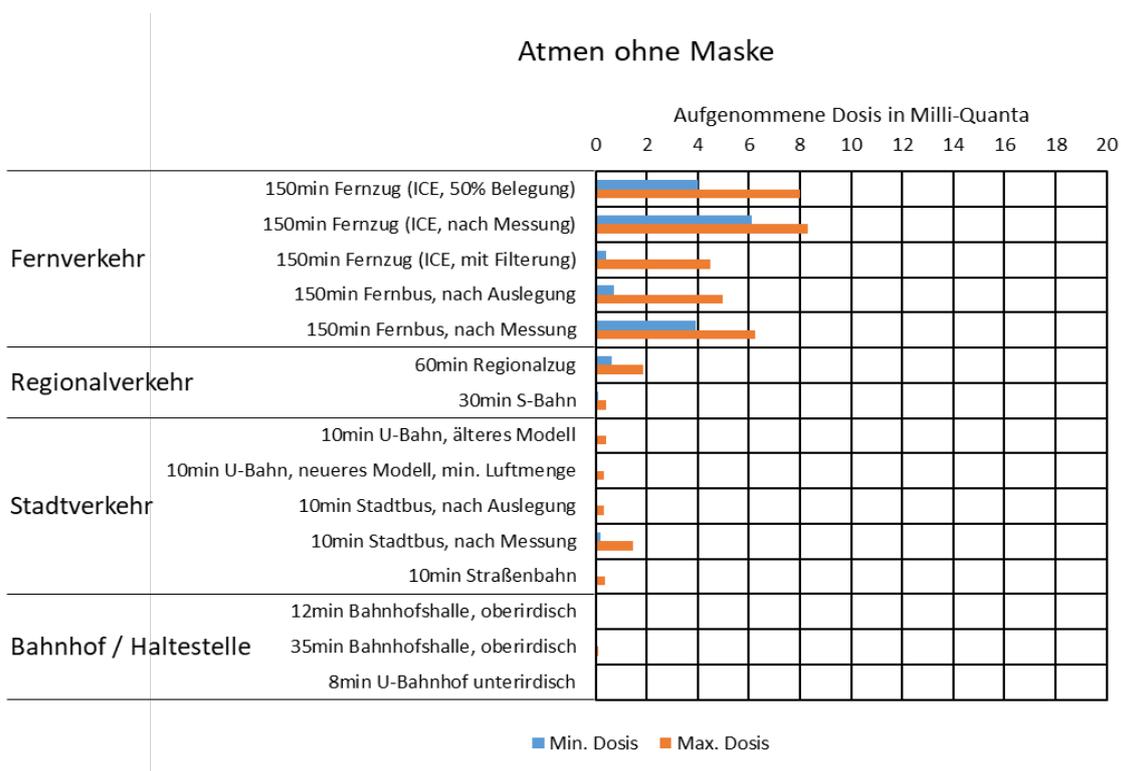


Abbildung 58: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "Atmen ohne Maske". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

Abbildung 59 zeigt, dass die Kombination „Sprechen mit MNS“ im Vergleich zu „Atmen ohne Maske“ zu einer erhöhten Exposition führt.

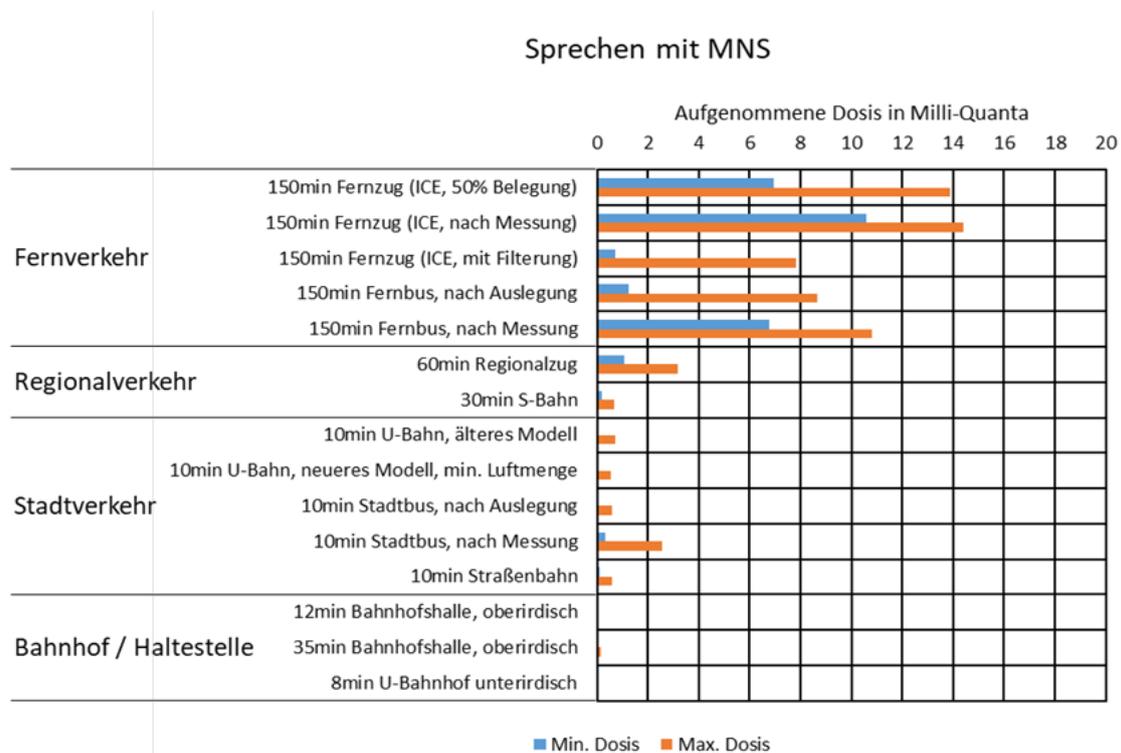


Abbildung 59: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "Sprechen mit MNS". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emitter.

Abbildung 60 zeigt, dass selbst lautes Sprechen mit einer FFP2-Maske zu einer geringeren Dosis führt als das Atmen ohne Maske.

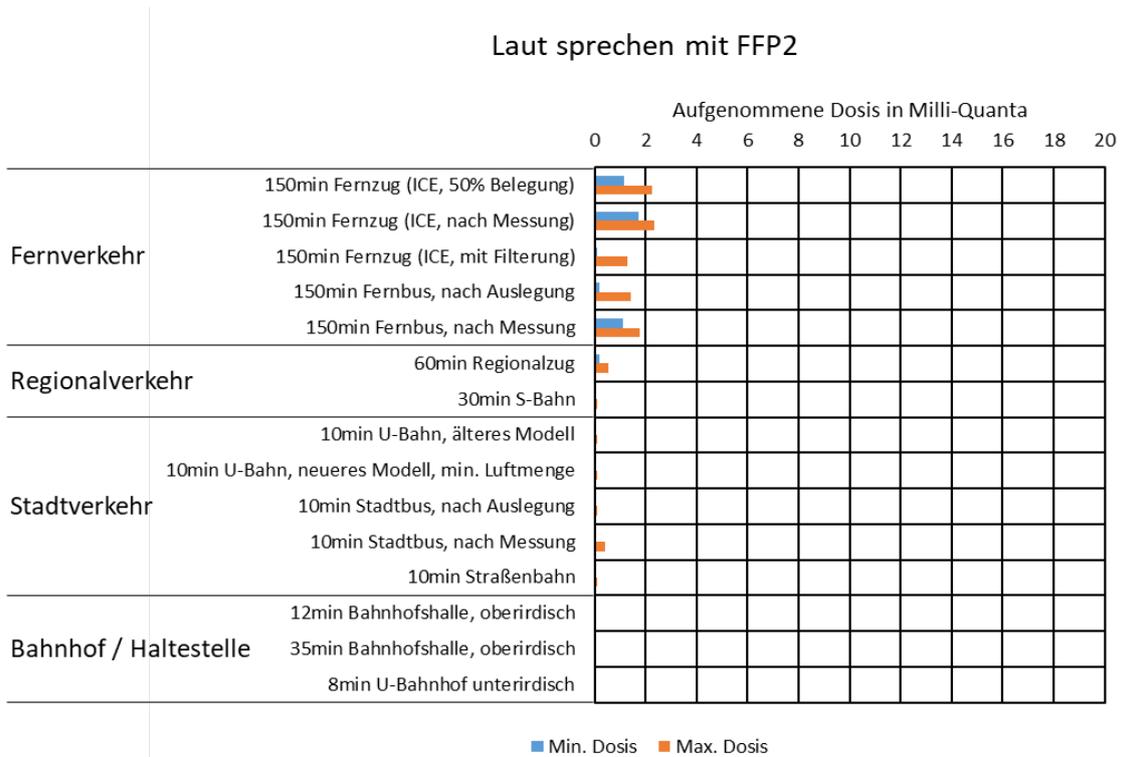


Abbildung 60: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "laut Sprechen mit FFP2". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nah am Emittent.

5.4 Expositionsschätzung – Stabilität von SARS-CoV-2 auf Oberflächen

Wie bereits in der Einführung erwähnt, wurde zu Beginn der Pandemie vermutet, dass SARS-CoV-2 auch durch kontaminierte Oberflächen übertragbar ist, obwohl das Virus von vielen untersuchten Oberflächen nicht kultiviert werden konnte.

Trotzdem erklärt das RKI [46], dass eine Übertragung durch kontaminierte Oberflächen insbesondere im unmittelbaren Umfeld von infektiösen Person nicht auszuschließen sei [95], da vermehrungsfähige SARS-CoV-2-Viren unter Laborbedingungen auf Flächen einige Zeit infektiös bleiben können.

An den Ergebnissen der o.g. Studie wurde bereits im Sommer 2020 bezüglich deren Anwendbarkeit auf reale Bedingungen Kritik geübt [96], da hohe Konzentrationen infektiöser Viruspartikel auf eine kleine Oberfläche aufgebracht wurden; laut Aussagen des Wissenschaftlers sind diese damit um mehrere Größenordnungen höher als unter realen Bedingungen. Nach Aussage der Autoren ist die Chance der Übertragung von SARS-CoV-2 durch Oberflächen gering [97]. Trotzdem betonen öffentliche Gesundheitsbehörden immer noch, dass Oberflächen eine Bedrohung darstellen und häufig desinfiziert werden sollten.

Zur Möglichkeit der Übertragung von SARS-CoV-2 durch Oberflächen in öffentlichen Verkehrsmitteln existieren kaum Daten. Eine einzige Studie aus Italien, in der Luft- und Wischproben in einem Stadtbuss genommen wurden, konnte in keiner der 20 Proben SARS-CoV-2 nachweisen. Die Probensammlung erfolgte im Mai 2020 während des strikten Lockdowns bzw. kurz danach [98]. Im Rahmen der Studie zum

Covid-Risiko im ÖV wurde, Stand bei Berichtserstellung (Februar 2021), ebenfalls auf keiner der in AP 3 genommenen Oberflächenproben ein Nachweis von SARS-CoV-2 erbracht, obwohl die als Indikator- und Modellsystem u. a. für Oberflächenkontamination verwendeten humanen Adenoviren (HAdV) detektiert werden konnten. Aufgrund fehlender Daten (so berichten [99] über den Nachweis in Faeces, betonen aber gleichzeitig, dass unklar ist, ob es sich hierbei um inaktive virale RNA handelt, eine fäkal-orale Infektion also möglich wäre) und der vermutlich geringeren Relevanz wurde das Infektionsrisiko durch Berührung kontaminierter Oberflächen (Schmierinfektion) bei Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs nicht in die Simulationen einbezogen.

5.5 Risikocharakterisierung

Detaillierte Informationen zu möglichen Gefahrenquellen, Gefährdungspotenzial und Exposition in den einzelnen Verkehrsmitteln sind in Kapitel 3 und 4 und medizinischen Charakterisierungen in den bisherigen Abschnitten des Kapitels 5 aufgeführt.

Die Ergebniszusammenfassung der Risikobewertung erfolgt in Abschnitt 5.5.1 und die genauere Ausarbeitung erster Handlungsempfehlungen in Kapitel 7.

5.5.1 Risikobewertung für im ÖV tätiges Personal mit Kundenkontakt

Als gesonderte Gruppe von Betroffenen, bei denen eine andere Form von Exposition im ÖV anzunehmen ist, wird das Personal beschrieben. Prinzipiell kann angenommen werden, dass das Personal mit Kundenkontakt einer ähnlichen Exposition ausgesetzt ist, wie die Fahrgäste. Durch die Bewegung von z. B. Zugbegleitern kann sich die Expositionszeit im Nahbereich des Emitters verkürzen bzw. durch einen regelmäßigen Wagenwechsel wird ein möglicher Expositionsbereich ggf. komplett verlassen. Diese beiden Umstände könnten dazu beitragen, dass in zwei Publikationen zum Ansteckungsrisiko von Mitarbeitern der Deutschen Bahn während ihres Dienstes als ZugbegleiterInnen oder Service-MitarbeiterInnen im Fernverkehr der DB [100] sowie der registrierten COVID-19-Erkrankungen bei Personen im Nahverkehr und Bahn-Fernverkehr einer großen Krankenversicherung Deutschlands [101] kein höheres Risiko ermittelt werden konnte (siehe Teil B).

Das medizinische Risiko für eine Person mit entsprechender Tätigkeit sollte grundsätzlich durch den zuständigen Betriebsarzt in Rücksprache mit den behandelnden Ärzten eingeschätzt werden.

5.5.2 Ergebnis der Risikocharakterisierung

Aufgrund der Erkenntnisse aus AP 1 beschäftigt sich diese Studie mit dem Risiko einer im Wesentlichen luftgetragenen Übertragung. Diese wird verglichen mit der Studie nach [27] zu Ansteckungen in chinesischen Hochgeschwindigkeitszügen und mit den Simulationsergebnissen des ICE aus Abschnitt 3.1. Durch diese Analogiebetrachtung zeigt sich, dass auch bei Nutzung des Schienen- sowie Straßenpersonennah- und -fernverkehrs ein Risiko der Infektion mit SARS-CoV-2 besteht. Dieses Risiko ist für unterschiedliche Szenarien verschieden hoch ausgeprägt. So konnte das höchste theoretische Infektionsrisiko für Strecken mit längerer Aufenthaltsdauer, wenn keine Masken getragen werden und laut gesprochen wird, anhand der vergleichsweise hohen Quanta-Dosis ermittelt werden.

Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen, dass insbesondere in Verkehrsmitteln mit hohem Umluftanteil auch weiter entfernt vom Emitter eine erhöhte Exposition errechnet wird. Im Nahbereich trifft dies auch auf Verkehrsmittel ohne Umluftanteil

zu. Eine deutliche Reduktion der Dosis und damit des Risikos ergab sich in der Simulation durch die Nutzung von MNS bzw. FFP2-Masken sowie durch Verzicht auf lautes Sprechen. Hierbei führt der Verzicht auf lautes Sprechen zu einer Reduktion der Quanta-Dosis von etwa 80 %. Das Tragen einer FFP2-Maske durch die Passagiere führt zu einer Reduktion der Exposition von 99 %. Falls die Fahrgäste MNS verwenden, beträgt die Reduktion der Aufnahme nur 65 %.

Auch wenn dies naheliegt, kann man dennoch nicht von der Quanta-Dosis direkt auf das medizinische Ansteckungsrisiko schließen. Im Umkehrschluss gilt, dass ein Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden kann.

Aus den Expositionsrechnungen wird ersichtlich, dass an den Bahnsteigen der untersuchten Bahnhöfe im Vergleich zum Innenraum der jeweiligen Verkehrsmittel eine deutlich niedrigere Dosis erreicht wird, zum einen aufgrund des relativ kurzen Aufenthalts von nur wenigen Minuten, zum anderen aufgrund der guten Belüftung.

In Übereinstimmung mit der aktuellen wissenschaftlichen Literatur (z. B. [102]) findet sich in Außenbereichen, in diesem Fall im Bereich oberirdischer Bahnhöfe, kein höheres theoretisches Infektionsrisiko. In Außenbereichen kann demnach, sofern der Mindestabstand eingehalten werden kann, auf das Tragen eines MNS oder einer FFP2-Maske verzichtet werden.

In geschlossenen Räumen und wenn der erforderliche Mindestabstand nicht eingehalten werden kann, besteht ein theoretisches Infektionsrisiko. In diesen Fällen sollten weitere Maßnahmen zur Senkung des Risikos ergriffen werden, mindestens das Tragen einer Maske zur Vermeidung der direkten Infektion durch Tröpfchen. FFP2-Masken zeigen gegenüber MNS sowohl eine höhere Reduktion der Emission als auch der Aufnahme von infektiösem Material. Aus diesem Grund sind sie sowohl für den Dritt-, als auch für den Eigenschutz besser geeignet.

Insbesondere im Fernverkehr kann aber das lange Tragen der Maske als belastend empfunden werden. An oberirdischen Bahnhöfen (was im Fernverkehr meistens der Fall ist) würde sich die Möglichkeit zur „Maskenpause“ unter Wahrung der Abstandsregeln auf dem Bahnsteig anbieten. Diese Möglichkeit muss allerdings im Fahrplan berücksichtigt werden bzw. entsprechende Lücken im Fahrplan sind zu identifizieren und den Passagieren zu kommunizieren. Insbesondere ergeben sich derartige Gelegenheiten in Wendebahnhöfen, wie z. B. München, Stuttgart, Leipzig, Frankfurt bzw. beim Umsteigen. Während des Ein- und Aussteigens sollte die Maske jedoch unbedingt weitergetragen werden.

Technische Maßnahmen wie die Umluftfilterung und Erhöhung der Frischluftzufuhr sind geeignet, die Dosis und damit das Infektionsrisiko in den Verkehrsmitteln zu senken. Deren Effekt ist in der Größenordnung des Effekts des Tragens eines MNS.

Ein Verzicht auf die empfohlenen Maßnahmen bei negativem Antigen-Test kann nach derzeitigem Stand nicht befürwortet werden.

6 Diskussion

6.1 Einfluss der Input-Parameter und von Mutationen

Es sollte berücksichtigt werden, dass die hier vorliegende Studie die mittlere Emission eines mit SARS-CoV-2 Infizierten bei verschiedenen Aktivitäten (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) und unter der Nutzung verschiedener Masken (keine, MNS, FFP2) untersucht. Hierbei wird immer angenommen, dass alle Fahrgäste für die gesamte Fahrt dieselbe Art Maske tragen. Mischungen von Maskentypen ergeben jeweils Ergebnisse zwischen den betrachteten Fällen. Hat also z. B. der Emittent eine MNS und der Aufnehmende eine FFP2-Maske, so kann mit einer Dosis zwischen dem Fall „MNS“ und dem Fall „FFP2“ gerechnet werden.

Es gibt Berichte über sogenannte Superemitter, die bis zu 100-fach höhere Emissionen an infektiösem Material aufweisen. In der Simulation würde dies ebenso zu einer um den Faktor 100 höheren Exposition führen. Bei den berichteten Ansteckungen im ÖV ist nicht bekannt, ob diese auf „normale“ oder auf Superemitter zurückzuführen sind. Der Einfluss eines Superemitters in dieser Simulation wäre eine um den Faktor 100 höhere Dosis für die anderen Passagiere, die relativen Verhältnisse der Maßnahmen zueinander bleiben hiervon jedoch unberührt.

Die Quanta-Formulierung wurde auf Basis des ursprünglichen SARS-CoV-2-Virus entwickelt. Seitdem aufgetretene Mutationen („britische Variante“, „südafrikanische Variante“) sind derzeit noch nicht eingehend genug erforscht, um hier den Grad der höheren Ansteckungsfähigkeit zu quantifizieren. Bisher ist jedoch davon auszugehen, dass Unterschiede nicht in der Menge der emittierten Viren liegen, sondern in deren besserer Fähigkeit, an potentiellen Wirtszellen anzudocken. Für die Ergebnisse der Simulationen bedeutet dies, dass ggf. die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung schon bei niedrigerer Quanta-Dosis steigen könnte. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die relativen Verhältnisse der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen dadurch nicht beeinflusst werden.

6.2 Vergleich mit Bewertung des RKI

Das RKI kommt mit seiner Handreichung „ControlCOVID-Strategie und Handreichung zur Entwicklung von Stufenkonzepten bis Frühjahr 2021“ [103] mit Stand vom 18.02.2021 zu dem Schluss, dass das individuelle Infektionsrisiko im ÖPNV höher ist als im Fernverkehr. Die Ergebnisse der Simulationen dieser Studie hingegen legen den Schluss nahe, dass ein höheres theoretisches Infektionsrisiko im Fernverkehr besteht als im ÖPNV.

Zum einen ist die im Verkehrsmittel verbrachte Zeit, und damit die Exposition gegenüber einem Emittenten, im Fernverkehr länger (bis zu mehreren Stunden in einem Fernverkehrsbus oder -zug). Somit besteht für eine Person im Fernverkehr eine höhere Exposition als für eine Person im ÖPNV mit einer Fahrtzeit von wenigen Minuten. Auf der anderen Seite besteht im ÖPNV aufgrund der höheren Anzahl an Personenkontakten eine erhöhte Wahrscheinlichkeit gegenüber dem Fernverkehr, einer infizierten Person zu begegnen, und aufgrund einer potenziell höheren Personendichte, einer direkten Tröpfchenübertragung ausgesetzt zu sein.

6.3 Einfluss der Compliance

Die Simulationen gehen von einer vollständigen Compliance der Fahrgäste aus, also davon, dass die Regeln zum Tragen von MNS bzw. FFP2-Maske sowie der Verzicht auf (lautes) Sprechen eingehalten werden. In Bezug auf die Compliance der Fahrgäste im Fernverkehr bzw. im ÖPNV sind zwei Varianten denkbar:

- Es ist naheliegend, dass die Compliance Abstand zu halten und die Masken korrekt zu tragen bei einer wenige Minuten dauernden Fahrt und bei einem kurzen Aufenthalt in gut belüfteten Bahnhofsbereichen höher eingeschätzt werden kann als dies bei einem längeren Aufenthalt in einem Fernverkehrsmittel der Fall ist.
- Gleichzeitig ist aufgrund der erheblich heterogeneren Fahrgastgruppe im ÖPNV auch denkbar, dass sich eine deutlich größere Anzahl an Personen im ÖPNV aufgrund des mangelnden Risikobewusstseins oder aufgrund von Unkenntnis der bestehenden Risiken genau deshalb nicht regelkonform verhalten.

Auch im Fall der Compliance mit Regeln im ÖV ist eine Abschätzung der Anzahl sich regelkonform verhaltender Fahrgäste kaum möglich, es dürfte aber der weitaus überwiegende Teil der Teilnehmer am ÖV sein.

Für die Kommunikation zu dieser Studie bietet es sich im Hinblick auf die Umsetzung einzelner Empfehlungen durch Fahrgäste an, diese auf die Haupt-Schutzmaßnahmen Abstand halten, Verzicht auf laute Gespräche und Maske tragen zu konzentrieren.

6.4 Wissenslücken

Viren-Expositionen können durch das gewählte Modell zeitlich und räumlich aufgelöst dargestellt und quantifiziert werden. Daraus aber eine Korrelation für eine genaue Quantifizierung des medizinischen Infektionsrisikos zu ermitteln, ist jedoch nicht möglich.

Dazu müsste u. a. zunächst bekannt sein, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person ein öffentliches Verkehrsmittel benutzt. Dies würde es erlauben, die Wahrscheinlichkeit der hier simulierten Szenarien nach der Statistik-Rechnung mit dem Los-Verfahren zu bewerten (also: Wie wahrscheinlich genau ein Infizierter unter z. B. 25 zufällig gewählten Fahrgästen ist, ist derzeit nicht bekannt). Der reine Inzidenzwert oder andere häufig zitierte Parameter des Infektionsgeschehens sind hierzu nicht ausreichend. Zum Beispiel ist ein Zusammenhang zwischen dem Inzidenzwert, der die bestätigten Fälle widerspiegelt, und der unentdeckten Dunkelziffer an Infektionen sowie bereits ansteckenden aber (noch) nicht symptomatischen Personen, also der Gruppe von Personen, die vor allem noch den ÖV benutzen würden, derzeit nicht bekannt.

Die Modellierungen in der Studie ermöglichen viele valide Aussagen, wie zum Beispiel, dass eine höhere Quanta-Dosis auch zu einem höheren Ansteckungsrisiko führt. Wie ausgeführt, ist das Eintreten einer Infektion jedoch zusätzlich von vielen individuellen Unterschieden abhängig, so dass unklar bleibt, wie hoch genau diese Quanta-Dosis für eine individuelle Infektion sein muss. Auch bei einer exakten Bestimmung der emittierten Partikel- oder Aerosolmengen, ist es nicht möglich, einen exakten Schwellenwert für das Ansteckungsrisiko anzugeben.

Weiter erfordert die Bewertung des Risikos eine genaue Kenntnis darüber, wie lange sich eine infizierte Person die Fahrtroute mit den zufällig anwesenden anderen Fahrgästen teilt. Aufgrund der vielen Ein- und Ausstiege entlang der Fahrstrecken lassen sich zu dieser Fragestellung insbesondere im Nahverkehr deshalb keine validen Aussagen tätigen.

7 Handlungsempfehlungen

7.1 Maske tragen

Alle Simulationen zur luftgetragenen Ausbreitung von Keimen zeigen eine signifikante Reduktion der Exposition durch das Tragen von Masken. Die höchste Wirkung im Dritt- wie im Eigenschutz hat hierbei eine gutschitzende FFP2-Maske. Die Simulationen zeigen des Weiteren, dass das Tragen einer FFP2-Maske der Passagiere den technischen Maßnahmen überlegen ist.

Zudem hält die Maske emittierte, potentiell infektiöse Tropfen ab und erlaubt somit auch einen zuverlässigen Schutz vor der direkten Tröpfcheninfektion in Bereichen, in denen der Mindestabstand nicht eingehalten werden kann.

7.2 Kommunikation einschränken

Das Einschränken der Kommunikation insbesondere, wenn nur ein MNS statt einer FFP2-Maske vorgeschrieben ist, ist eine weitere wirksame Maßnahme zur Senkung der Erregerbelastung der Raumluft. Insbesondere sollte auf lautes Sprechen verzichtet werden, da dies eine um den Faktor 5 bzw. 25–50 höhere Emissionsstärke verursacht als Sprechen bzw. Atmen.

7.3 Technische Maßnahmen

Ein reiner Frischluftbetrieb bzw. die Umluftfilterung sind mögliche technische Maßnahmen zur Senkung der Erregerlast in der Raumluft. Dabei zeigt sich, dass vor allem Fahrgäste in größerer Entfernung des infektiösen Fahrgastes von diesen Maßnahmen profitieren. Im Nahbereich der Infizierten besteht auch mit diesen Maßnahmen noch eine erhöhte Erregerkonzentration. Somit können diese Maßnahmen zwar unterstützend wirken, sie eignen sich jedoch nicht als einziges Mittel zur Verhinderung einer Ansteckung.

7.4 Betriebliche Maßnahmen

Die Simulationen zeigen, dass der Aufenthalt in Bahnhöfen bezüglich der luftgetragenen Ansteckung ein niedrigeres Risiko aufweist als der Aufenthalt im Verkehrsmittel. Somit sollte der Betrieb danach ausgerichtet werden, störungsbedingte Standzeiten auf der Strecke – schlimmstenfalls mit gleichzeitiger Reduktion der Lüftung – unbedingt zu vermeiden. Wenn störungs- oder fahrplanbedingte Standzeiten unvermeidbar sind, sollten diese an Bahnhöfen erfolgen – gleichzeitig sollte den Fahrgästen das Verlassen der Verkehrsmittel ab einer gewissen Wartezeit empfohlen und ermöglicht werden. Bezüglich der Belastung im Verkehrsmittel selbst ist es zwar nicht bedeutend, ob es in einem Bahnhof oder auf der Strecke steht, allerdings ist anzunehmen, dass die Belegungsdichte des Verkehrsmittels und somit auch das prinzipielle Risiko eines Infizierten an Bord aufgrund des Passagierwechsels am Bahnhof geringer sind.

Zudem sollten Verkehrsmittel auch am Bahnhof belüftet werden bevor sie für die Passagiere zum Einsteigen frei gegeben werden. Die Simulation zeigt, dass nach dem Leeren des Verkehrsmittels noch mindestens 8–9 Minuten weiter gelüftet werden muss, um möglicherweise in der Raumluft verbliebene Erreger der letzten Fahrt heraus zu lüften. Dies entspricht einer etwa 10-fachen Erneuerung der Raumluft.

7.5 Organisatorische Maßnahmen

Wie in den vorigen Kapiteln bereits erwähnt zeigt sich, dass die höchste Risikoreduktion mit dem Tragen einer FFP2-Maske erreicht werden kann. Insbesondere im Fernverkehr kann aber das lange Tragen der Maske als belastend empfunden werden. An oberirdischen Bahnhöfen (was im Fernverkehr meistens der Fall ist) sollte von den Betreibern der Verkehrsmittel erwogen werden, ob nicht die Möglichkeit einer „Maskenpause“ unter Wahrung der Abstandsregeln auf dem Bahnsteig angeboten werden kann. Ob sich eine solche Möglichkeit allerdings im Fahrplan berücksichtigen lässt, wäre zu prüfen. In diesem Fall müssten die Betreiber eine Maskenpause am Bahnsteig zulassen und die Zugbegleiter entsprechende Lücken im Fahrplan identifizieren und den Passagieren kommunizieren. Während des Ein- und Aussteigens und im Inneren der Verkehrsmittel sollte die Maskenpflicht obligatorisch bleiben.

7.6 Crowd Management

Die Abschätzung der Personendichte gegenüber der verfügbaren Fläche in den Verkehrsmitteln zeigen, dass die Einhaltung der Abstandsregeln meist nicht möglich ist. Somit sind dem Crowd-Management außer allgemeinen Hinweisen, möglichst viel Abstand zu halten bzw. Abstände mit Markierungen wie Klebebändern am Boden vorzugeben, enge Grenzen gesetzt. Teilweise können Lenkungsmaßnahmen sogar das Gegenteil bewirken.

7.7 Schnelltests

Das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) [104] hat die ersten Sonderzulassungen nach Kapitel 11 Absatz 1 Medizinproduktegesetz (MPG) von Antigen-Tests zur Eigenanwendung durch Laien (Selbsttests) zum Nachweis von SARS-CoV-2 erteilt. Es stellt sich nun die Frage, ob ein solcher Test beispielsweise vor einer längeren Fahrt im Fernverkehr geeignet ist, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten und dann bei negativem Ergebnis keine Einhaltung von Schutzmaßnahmen mehr notwendig ist.

Laien-Selbsttests sind zur Anwendung durch Privatpersonen bestimmt. Diese Tests können mit einem (vorderen) Nasenabstrich oder mit Speichel erfolgen. Ein tiefer Nasenabstrich ist demnach hierfür nicht notwendig. In einer aktuellen Studie [105] erfolgten parallele Testungen mittels eines SARS-CoV-2-Antigen-Tests und einer SARS-CoV-2-RT-PCR. Es konnte gezeigt werden, dass die Sensitivität bei symptomatischen Patienten deutlich besser war als bei symptomlosen Patienten (85,7 % vs. 38,9 %). Unter folgenden Gegebenheiten kann es laut den Autoren zu einem falsch negativen Testergebnis kommen:

1. Asymptomatische Patienten im späten Infektionsstadium: Die Viruslast liegt bereits unter der Nachweisgrenze des Antigen-Tests und wird noch weiter absinken.
2. Asymptomatische Patienten im frühen Infektionsstadium: Die Viruslast liegt noch unter der Nachweisgrenze des Antigen-Tests, wird jedoch weiter ansteigen.
3. Präsymptomatische Patienten: Die Viruslast liegt noch unter der Nachweisgrenze des Antigen-Tests, wird jedoch im Zeitverlauf weiter ansteigen.

Bei den Szenarien 2 und 3 handelt es sich um unbedingt zu verhindernde Fälle. Hierbei werden Personen, die u. U. zeitnah hohe Viruslasten und dadurch eine hohe Ansteckungsfähigkeit in einigen Stunden oder am folgenden Tag entwickeln werden, durch den Antigen-Test nicht erkannt.

Auch in der am 25.02.2021 vorab online veröffentlichten Version von [106] wird darauf hingewiesen, dass Antigen-Tests eine geringere Sensitivität und Spezifität als PCR-Tests aufweisen, wodurch es zu einer höheren Rate falsch negativer bzw. falsch positiver Testergebnisse kommen kann.

Aufgrund der sehr eingeschränkten Sensitivität des Antigen-Tests bei Personen, die (noch) keine Krankheitssymptome zeigen, kann die Einzeltestung mit einem Antigen-Test eine Infektion mit SARS-CoV-2 demnach nicht hinreichend ausschließen. Aus diesem Grund kann nach derzeitigem Wissensstand nicht empfohlen werden, nach einem einzelnen negativen Selbsttest im ÖV von den empfohlenen Schutzmaßnahmen abzusehen. Daher bleiben die wesentlichen Handlungsempfehlungen weiter gültig:

- MNS, besser FFP2-Maske tragen
- Lautes Sprechen vermeiden
- Maskenpause am oberirdischen Bahnhof, wenn Mindestabstand eingehalten werden kann

7.8 Psychologische Unterstützung von Handlungsempfehlungen

Die Ausbreitungsmodellierungen und Risikobewertung haben gezeigt, dass ein Infektionsrisiko im Personennah- und Fernverkehr ganz wesentlich in Innenräumen durch eine Kombination von Aerosol- und Tröpfchenübertragung besteht, während Außenbereiche wie Bahnhöfe, Bahnsteige und Haltestellen erheblich günstigere Profile aufweisen. Gleichzeitig zeigen vor allem verhaltensbezogene Maßnahmen, wie das Tragen von Masken (insbesondere FFP2) und Verringerung der Kommunikation/-slautstärke, einen deutlichen positiven Beitrag zu Risikoverminderung bei Nutzung des Personennah- oder Fernverkehrs. Das Einhalten von 1,5 bis 2 m Abstand ist darüber hinaus eine wesentliche protektive Maßnahme zur Verhinderung von Infektionen durch Tröpfchen (vgl. Abschnitt 5.3; z. B. [51, 52]). Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Bewertungen möglicher Handlungsstrategien vor allem mit Blick auf psychologische Mechanismen vorgenommen, da diese verhaltensbezogenen Maßnahmen eine individuelle Compliance und Bereitschaft zur Verhaltensänderung voraussetzen, die von den Betreibern nur unterstützend gefördert werden können, einer unmittelbaren und hundertprozentigen Umsetzung aber entzogen sind. Einige der angesprochenen Punkte sind dabei bereits seit Beginn der Pandemie (in Teilen) umgesetzt, benötigen aber unter Umständen einen weiteren Ausbau respektive Vertiefung.

Als wesentlichste Einflussfaktoren auf das Risiko haben sich die verhaltensbezogenen Maßnahmen „Maske tragen“ und „Verringerung der Kommunikation“ herausgestellt, wobei ersteres auch geeignet ist, bei Unterschreitungen von Mindestabständen das Infektionsrisiko durch Tröpfchen gering zu halten. Maßnahmen, die hier unterstützend zur Verhaltensänderung beitragen können, werden im Folgenden vorgestellt, allerdings sind zwei Vorbemerkungen wichtig. Erstens: aufgrund des hohen Infektionsaufkommens ist derzeit noch eine vergleichsweise hohe Compliance mit den Regeln zum Tragen von Masken zu erkennen. Eine Abnahme dieser Compliance ist zu erwarten, sobald der wahrgenommene (subjektive) Nutzen geringer wird. Dies kann aufgrund sinkender Inzidenzzahlen, Impfungen und/oder aufgrund einer Risikoadaptation (z. B. für Maßnahmen in der Verkehrssicherheit, von [107] beschrieben) geschehen. Damit ist einerseits der Vorteil einhergehend, dass das Maskentragen mittlerweile bereits im Verhaltensrepertoire der Menschen vorhanden ist, gleichzeitig besteht jedoch die Herausforderung, die Bereitschaft zur weiteren Durchführung dieses Verhaltens aufrecht zu erhalten. Und zweitens: Forschungen zur Regel-Compliance im Allgemeinen und auch im Kontext von Regeln zur Bekämpfung der

Pandemie zeigen, dass es immer einen Teil der Bevölkerung geben wird, der – unabhängig von flankierenden Maßnahmen – sich nicht an die Regeln halten wird. So konnten etwa [108] für Covid-19-Präventionsmaßnahmen feststellen, dass bestimmte Überzeugungen und Glaubenssysteme das Vertrauen in die Wissenschaft mindern, das wiederum als zentraler Mediator für die Compliance mit Maßnahmen identifiziert werden konnte. [109] zeigten für schweizerische Jugendliche, dass u. a. die geringe Akzeptanz moralischer Regeln, Zynismus in Bezug auf das Rechtssystem, geringe Selbstkontrolle, geringes Vertrauen inklusive geringes Vertrauen in Maßnahmen der Regierung zur Bekämpfung der Pandemie, ebenfalls deutlich häufiger zu einer Nichtbefolgung der Regeln führten.

Vor diesem Hintergrund sollten Maßnahmen zur Erhöhung und Erhaltung der Compliance mit den Regeln auf eine Unterstützung all derjenigen zielen, die eine prinzipielle Bereitschaft zur Veränderung mitbringen. Aus dem Bereich der Gesundheitswissenschaften gibt es eine Reihe von Modellen und Theorien, die herangezogen werden, um gesundheitsbezogene Einstellungs- und Verhaltensänderungen zu erklären. Eine gute Zusammenfassung liefern die Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung [110] oder auch spezifische Modelle wie etwa von [111]. Allen Modellen gemeinsam sind eine Reihe von Voraussetzungen, die vorhanden sein sollten, damit es zu einer (gesundheitsbezogenen) Verhaltensänderung kommt:

- eine subjektiv wahrgenommene Krankheitsanfälligkeit,
- der wahrgenommene Schweregrad der Konsequenzen bei Nicht-Verhaltensänderung,
- Vorteile bzw. Nutzen durch die Verhaltensweise,
- Barrieren, die sich für die Durchführung des Verhaltens ergeben,
- Auslöser für das Verhalten und
- Selbstwirksamkeitsüberzeugungen respektive wahrgenommene Verhaltenskontrolle.

Zudem werden häufig auch soziodemographische Aspekte betrachtet, die aufgrund der Heterogenität von Fahrgästen hier aber weniger Berücksichtigung finden sollten. Diese Faktoren werden häufig ergänzt mit Aspekten der „Theory of Planned Behavior“ [112, 113], die zusätzlich vor allem subjektive und später auch deskriptive Normen als relevante Handlungsvoraussetzung aufführt, die durch Einstellung und Wahrnehmung anderer Personen vermittelt werden [114]. So werden deskriptive Normen als das Ausmaß beschrieben, in dem die Wahrnehmung des Verhaltens Anderer die eigene Meinung zu diesem Verhalten formt. Das Verhalten Anderer ist damit eine Art Abkürzung bei der Entscheidung zu diesem Verhalten, indem es Hinweise auf den wahrscheinlich effektivsten Weg, sich zu verhalten, gibt. Damit ist hier eine enge Verschaltung zu der Konformitätsforschung, v. a. mit dem informationalen sozialen Einfluss gegeben, der bereits 1935 von Sherif nachgewiesen werden konnte [115, 116].

Legt man diese zentralen Faktoren von Verhaltensänderungen an, um Regeln des Maskentragens und geringerer Kommunikation(-slautstärke) im Personennah- und Fernverkehr zu implementieren, lassen sich psychologisch einige mögliche Handlungsempfehlungen, insbesondere aus dem Bereich der Kommunikation sowie der Organisation, ableiten:

Wahrgenommene Krankheitsanfälligkeit: Eine höhere wahrgenommene Krankheitsanfälligkeit erhöht die Wahrscheinlichkeit für eine Verhaltensänderung. Für Menschen, die sich bereits zu einer Risikogruppe zählen, wird vermutlich keine Notwendigkeit einer weiteren Erhöhung vorhanden sein. Damit diese wieder oder weiterhin den Personennah- und -fernverkehr nutzen, wird es vermutlich eher darum gehen, die Überzeugung, sich durch eigenes Verhalten (Maske tragen) schützen zu können, zu erhöhen, also in der Maßnahmenkommunikation die wahrgenommene Verhaltenskontrolle zu erhöhen. Für alle anderen Fahrgäste sollte die Kommunikation des Risikos realistische Informationen inklusive der Krankheitsanfälligkeit auch von Nicht-Risikogruppen enthalten. Wie eine Studie zur Nutzung von Masken im ÖPNV während eines H1N1-Ausbruchs zeigte, folgt diese ansonsten leicht dem Verlauf der Epidemie [117].

Wahrgenommene Schwere der Konsequenzen bei Nicht-Compliance: Neben der notwendigen und medial bereits immer wieder verbreiteten Botschaft der Schwere möglicher Erkrankungen stellt sich als zweite Säule hier die Verhaltenssteuerung regelkonformen Handelns dar. Aus dem Bereich des Straßenverkehrs zeigt sich die Wirksamkeit von Strafen auch, wenn eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein nicht-regelkonformes Verhalten nicht entdeckt wird. Gleichzeitig ist die persönliche Moral und soziale Identität ein höherer Prädiktor für regelkonformes Verhalten [118], so dass in der Kommunikation und Organisation vermutlich die Betonung letzterer Komponente, v. a. die Bedeutsamkeit regelkonformen Verhaltens für die Gemeinschaft, in Kombination mit klaren Sanktionen hilfreich ist. Im Personenahverkehr wird diese Form der Regelunterstützung vor allem bei Maskennutzung hilfreich sein, die Einschränkung des (laut) Sprechens, Telefonierens im ÖPNV stellt hingegen eine bisher noch nicht von den Fahrgästen eingeübte und regional unterschiedlich starke Herausforderung dar. Ähnlich wie bisher schon in Ruheabteilen im Fernverkehr sollten Hinweisschilder genutzt werden, um die Fahrgäste zu erinnern (d. h. ihr Arbeitsgedächtnis zu entlasten); gleichzeitig ist aber auch an Informationskampagnen zu denken, die diese (tiefgreifende) Maßnahme klar und verständlich erläutern. Beispielsweise hat die MVG bereits mit ihren Münchener Kindl Infotainment „Minifilmen“ u. a. eine Darstellung von Aerosolverbreitung in der Anwendung, ähnliches ließe sich auch für die Problematik des (laut) Sprechens aufnehmen. Im Fernverkehr sind weitere organisatorische Möglichkeiten denkbar: Wenn eine vollständige Durchsetzung der Regel zur Kommunikationsenkung nicht gewünscht ist (beispielsweise, weil es Familien-, Gruppen- und Urlaubsreisen zu unattraktiv macht), könnten einige wenige Abteile davon ausgenommen werden und die restlichen zu Ruheabteilen (wie bisher schon vorhanden) umdeklariert werden. Um die Nutzung der letzteren zu erhöhen, wäre ein Verhaltensanreiz eine denkbare Möglichkeit, beispielsweise, indem Tickets für die Ruheabteile etwas günstiger – und sei es nur symbolisch – sind als für Abteile, in denen geredet werden „darf“.

Verhaltensänderungen hängen immer auch davon ab, wie groß die Barrieren für eine Umsetzung des Verhaltens sind. In der Verhaltensmodifikation haben sich hier unter anderem Verhaltenskontrakte bewährt, mit der sich eine Person zu einem bestimmten Verhalten verpflichtet. Insbesondere für den Fernverkehr könnte die Verpflichtung, höchstens leise zu reden, als eine Klausel bei Abschluss einer Buchung aufgenommen werden, wie dies zum Teil schon bei Betreibern anderer Länder (z. B. Polen) geschieht. Weitere Barrieren, wie die Verfügbarkeit von (hochwertigen FFP2-) Masken, stellen zurzeit eher kein Problem dar, da aufgrund der aktuellen Regelungen vermutlich jeder potentielle Fahrgast damit ausgerüstet ist. Für die Zukunft könnte eine entsprechende Möglichkeit zum Erwerb direkt an Bahnhöfen oder Stationen aber hilfreich sein.

Hilfreich, um erfolgreiche Verhaltensänderungen durchzuführen, sind auch klare Hinweise, um das Verhalten auszulösen: Sowohl im Nah- wie im Fernverkehr sollten Erinnerungen, an welchen Orten Masken zu tragen sind und wo nicht, deutlich und für jeden klar erkennbar angebracht sein. Beschilderungen existieren bereits, sind möglicherweise bei abgelenkten oder gestressten Fahrgästen oder zukünftig verminderter Präsenz des Themas in der Öffentlichkeit nicht deutlich genug. Ebenso sollten Aufforderungen, leise oder gar nicht zu sprechen, als Schilder und erinnernde Durchsagen in den Waggons des Nah- und Fernverkehrs gemacht werden. Wesentlich ist hierbei zu bedenken, dass aufgrund der begrenzten Aufmerksamkeits- und Gedächtniskapazitäten [34] von Menschen die zentralen Verhaltensregeln nicht in einem Wust von Empfehlungen und Schildern untergehen.

Ein wesentlicher Aspekt, um Verhaltensänderungen herbeizuführen, ist die Stärkung der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle, das heißt, die Überzeugung von Menschen, durch ihr eigenes Verhalten tatsächlich ein positives Ergebnis hier mit Blick auf die eigene Gesundheit herbeiführen zu können. Diese Voraussetzung für das Befolgen der genannten Empfehlungen kann erneut durch gezielte Kommunikation unterstützt werden, die vor allem klare Informationen zur Wirksamkeit verschiedener Masken und zum richtigen Tragen dieser Masken enthält. Auch wenn vielen Menschen durch die letzten Monate diese Themen vertraut sind, zeigen internationale Studien auch Informationsdefizite auf (z. B. [119–

121)). Dass eine gute Aufklärung insbesondere mit dem Schwerpunkt auf einer Stärkung der Selbstwirksamkeit (im Sinne dessen, dass ich das Risiko, mich bei der Nutzung von Nah- oder Fernverkehr zu infizieren, durch (richtiges) Maskentragen selber stark in der Hand habe und nicht von dem richtigen Verhalten anderer Fahrgäste abhängig bin) helfen kann, dieses Verhalten zu zeigen und weniger Stress zu erleben [122] – letzteres ist sicherlich auch mit Blick auf das Ziel, Fahrten mit dem Personennah- und -fernverkehr wieder (für viele Menschen) weniger aversiv zu machen, wichtig. Inwieweit Gamification-Ansätze, z. B. durch spielerische Möglichkeiten den Sitz von Masken zu überprüfen, hier ebenfalls hilfreich sein könnten, wäre aufgrund der gemischten Evidenz zu solchen Maßnahmen zu überdenken [123].

Schließlich spielen zur Unterstützung von Verhaltensänderungen Normen und Werte sowie deren Formung und Ausdruck im Gruppenkontext eine wichtige Rolle. Interessanterweise weisen [11] in ihrem Review zu Masken gegen Covid-19 auf genau diesen gesellschaftlichen Aspekt hin: Bereits das Tragen von Masken durch eine Gruppe von Personen signalisiert die Beteiligung an Gesundheitsverhalten und kann bei anderen – ganz im Sinne von deskriptiven Normen/Konformitätsverhalten – die Nachahmung und damit die Compliance mit den Maskenregeln erhöhen. Ähnliches gilt auch für die Kommunikationsreduktion – die soziale Hemmung zu sprechen, wenn alle schweigen, ist deutlich höher als wenn bereits mehrere Personen reden. Dieser Punkt spricht zumindest im Fernverkehr auch für die oben genannte Anregung, Ruheabteile deutlich von Abteilen zu trennen, in denen geredet werden kann, um die Konformität mit dieser Verhaltensregel zu erhöhen. Schließlich wird im Bereich von Werten und Normen, als Voraussetzung von Verhaltensänderungen und Compliance mit Regeln immer auch Gerechtigkeit, Fairness und wahrgenommene Legitimität und Legitimierung der Regelgeber hervorgehoben [124]. Da es sich bei den Betreibern des Personennah- und -fernverkehrs nicht um unmittelbar gesellschaftlich/staatlich legitimierte Instanzen handelt, wird die Durchsetzung der Regeln möglicherweise von einigen Personen als weniger verbindlich wahrgenommen. Dies ist kaum zu ändern und hier kann nur mit gemeinschaftlich geteilten Normen entgegengewirkt werden. Ein Teil dieses Themenkomplexes ist das Verhalten von Vertretern der regelaufstellenden Organisation (z. B. Zugbegleiter, Sicherheitsdienstmitarbeiter). Werden hier nicht die Regeln befolgt, z. B. indem Masken nicht oder falsch getragen werden oder eng beieinandergestanden wird, kommt es schnell zu einer Ablehnung dieser Regeln, da sie als ungerecht oder unfair, weil nicht von allen geteilt und befolgt, wahrgenommen werden. Hier sollten auch die Mitarbeiter der Nah- und Fernverkehrsbetreiber durch Verhaltenskontrakte und Schulungen stärker sensibilisiert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick Teil C

Die hier vorgestellte Studie untersucht das Risiko für eine Ansteckung mit SARS-CoV-2 im öffentlichen Verkehr anhand einer Ausbreitungsmodellierung in verschiedenen Fahrzeugen und Bahnhöfen. Ausgehend von der Beschreibung eines infektiösen Fahrgastes im Modell wird anhand der Aktivität (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) sowie der getroffenen Schutzmaßnahmen (Maske, Umluftfilterung, Frischluftbetrieb) bewertet, inwieweit eine relative Reduktion des Risikos erzielt werden kann.

Es zeigt sich, dass das Risiko am effizientesten reduziert wird, wenn auf lautes Sprechen verzichtet und eine FFP2-Maske korrekt getragen wird. Nur diese beiden Maßnahmen schaffen eine Reduktion der Last sowohl im Nahbereich des Infizierten wie auch weiter entfernt. Sofern lediglich das Tragen von MNS vorgegeben wird, sind weitere technische Maßnahmen wie eine Umluftfilterung oder eine erhöhte Frischluftzufuhr geeignet, die Exposition der anderen Fahrgäste infolge einer mit SARS-CoV-2 infizierten Person weiter zu senken.

Verglichen mit dem Risiko im Inneren der Verkehrsmittel ist die Belastung auf den Bahnsteigen der untersuchten Bahnhöfe als untergeordnet anzusehen. Insbesondere an oberirdischen Bahnsteigen und unter der Voraussetzung, dass der empfohlene Mindestabstand von 1,5 Metern sicher eingehalten werden kann, ist das Tragen eines MNS/einer FFP2-Maske zeitweise verzichtbar bzw. ist eine Unterbrechung der Maskenpflicht vertretbar.

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 zum Schutz vor Übertragung durch Tröpfchen bestehen bleiben.

Die Infektion über Oberflächenberührungen erscheint in der Literatur sowie in den in AP 3 (Teil D) bisher ausgewerteten mikrobiologischen Feldmessungen auf verschiedensten Oberflächen im ÖV untergeordnet.

Für die Umsetzung der wichtigsten Maßnahmen – Maske tragen, leise Sprechen, Abstand halten – werden Vorschläge aufgezeigt, wie diese psychologisch unterstützt umgesetzt werden können. Hierbei sind die als Eigenschutz verstandene Wirkung der Maßnahme sowie regelmäßige Erinnerungen, z. B. durch Piktogramme zentrale Elemente der Umsetzung.

Ein detaillierter Maßnahmenkatalog sowie die Definition des weiteren Forschungsbedarfs und die Entwicklung eines Messkonzepts zur Validierung der in diesem Bericht dargelegten Modellierungsszenarien werden in AP 3 vorgelegt.

9 Abbildungsverzeichnis Teil C

Abbildung 1: Schematische 2D-Darstellung eines zonalen Modells.	119
Abbildung 2: Beispiel zur Auswertung / Darstellung der Simulation.	121
Abbildung 3: Relativer Vergleich der Ansätze, den Emittenten als Quanta-, Partikel- oder Aerosolquelle zu beschreiben.	123
Abbildung 4: Häufigkeit des Vorkommens verschiedener U-Bahn- und U-Stadtbahntypen, ohne Straßenbahnen.	128
Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der Fahrzeuglängen bei Straßen- und Stadtbahnen, ohne U-Bahnen.	129
Abbildung 6: Verteilung von Stationstypen in Deutschland im Zuständigkeitsbereich der BOStrab.	130
Abbildung 7: Darstellung im zonalen Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- und Kühlbetrieb, angelehnt an den ICE 4.	132
Abbildung 8: Mess- und Auswertepositionen der CO ₂ -Konzentration bei einer Messfahrt.	134
Abbildung 9: Vergleich der gemessenen und simulierten CO ₂ -Konzentration.	134
Abbildung 10: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ für den Fall "HVAC Heizen – 50 % Belegung, Sprechen, ohne Maske" im ICE.	135
Abbildung 11: Vergleich der Dosis in Milli-Quanta nach 2,5 Stunden Aufenthalt mit einem mit SARS-CoV-2 Infizierten bei unterschiedlichen Aktivitäten (Atmen, Sprechen, laut Sprechen) des Emitters und bei unterschiedlichen Maskentypen (keine, MNS, FFP2).	135
Abbildung 12: Einfluss der Frisch- und Umluftmengensteuerung auf die Expositionsmenge.	136
Abbildung 13: Einfluss der Umluftfilterung im ICE.	137
Abbildung 14: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ für den Fall "Laut Sprechen, ohne Maske" im ICE mit Abteilmittlung um den Emitter.	139
Abbildung 15: Vergleich der Quanta-Dosis im Großraumwaggon gegenüber einem Abteil.	139
Abbildung 16: Vergleich der in der Simulation ermittelten Dosis in Milli-Quanta im Bereich weiter entfernt von der mit SARS-CoV-2 infizierten Person (min. Dosis) und im Nahbereich (max. Dosis) im Vergleich zum ermittelten Ansteckungsrisiko angelehnt an [27].	142
Abbildung 17: Exemplarische Innenansicht des Talent-Zuges (oben, zonales Modell eines exemplarischen Regionalzugs im Heizfall bzw. Kühlfall.	144
Abbildung 18: Angepasstes zonales Modell.	146
Abbildung 19: Temperaturmesspositionen für den Validierungsfall.	146
Abbildung 20: Vergleich der Abweichung der mit der zonalen Simulation ermittelten Temperaturen mit denen detaillierter Strömungssimulationen von Alstom.	147
Abbildung 21: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ für den Fall "HVAC Auslegung Heizen, Sprechen, ohne Maske" im Regionalzug (Kopfhöhe sitzend).	147
Abbildung 22: Einfluss der Frisch- und Umluftmengensteuerung auf die Expositionsmenge.	148

Abbildung 23: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ für den Fall "HVAC Auslegung Kühlen beim Sprechen ohne Maske" mit Darstellung der zwei Plätze mit höchster Konzentration neben dem Emitter.	150
Abbildung 24: Zonales Modell eines exemplarischen Regionalzugs im Heizfall bzw. Kühlfall.....	151
Abbildung 25: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ für den Fall "Sprechen, ohne Maske" in der S-Bahn (HVAC Auslegung Heizen, Kopfhöhe sitzend).....	153
Abbildung 26: Einfluss der Frisch- und Umluftmengen-Steuerung auf die Expositionsmenge	153
Abbildung 27: Innenansicht und Umsetzung im zonalen Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- und Kühlbetrieb am Beispiel der U-Bahn älterer Bauart.....	156
Abbildung 28: Auswertezone für CO ₂ -Validierung in der U-Bahn älteren Baujahres.	158
Abbildung 29: Vergleich gemessene und simulierte CO ₂ -Konzentration für die U-Bahn älteren Baujahres.	158
Abbildung 30: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ auf Atemhöhe um den Emittenten in der U-Bahn älterer Bauart für den Fall "Sprechen ohne Maske" im Heizbetrieb.....	158
Abbildung 31: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge.....	159
Abbildung 32: Zonales Modell mit Quellen und Senken für den Heiz- und Kühlbetrieb am Beispiel der U-Bahn neuerer Bauart.....	161
Abbildung 33: Auswertezone für CO ₂ -Validierung in der U-Bahn neuerer Bauart	162
Abbildung 34: Vergleich gemessene und simulierte CO ₂ -Konzentration für die U-Bahn neuerer Bauart.....	163
Abbildung 35: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ auf Atemhöhe um den Emittenten in U-Bahn neuerer Bauart für den Fall "Sprechen ohne Maske" im Heizbetrieb.....	163
Abbildung 36: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge.....	163
Abbildung 37: Zonales Modell eines exemplarischen Fernbusses.	165
Abbildung 38: Auswertezone für CO ₂ -Validierung im Fernbus.	167
Abbildung 39: Vergleich der gemessenen und simulierten CO ₂ -Konzentration im Fernbus.....	167
Abbildung 40: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in einem Fernbus mit Umluftanteil beim "Sprechen ohne Maske" für den Referenzfall. .	167
Abbildung 41: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge.....	168
Abbildung 42: Zonales Modell eines exemplarischen 12m-Stadtbusses.....	170
Abbildung 43: Auswertezone für CO ₂ -Validierung im 12 m Stadtbus.	171
Abbildung 44: Vergleich der gemessenen und simulierten CO ₂ -Konzentration im Stadtbus.....	171
Abbildung 45: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m ³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in einem Stadtbus mit Umluft-Anteil beim "Sprechen ohne Maske".	171
Abbildung 46: Einfluss der Frischluftmenge auf die Expositionsmenge.....	172
Abbildung 47: Zonales Modell einer exemplarischen Straßenbahn.....	173
Abbildung 48: Auswertezone für CO ₂ -Validierung in der Straßenbahn 2.	174
Abbildung 49: Vergleich der gemessenen und simulierten CO ₂ -Konzentration in der Straßenbahn 2.....	175

Abbildung 50: Konzentrationsverteilung in Milli-Quanta je m³ auf Kopfhöhe um den Emittenten in der Straßenbahn 1 mit Umluft-Anteil beim "Sprechen ohne Maske". 175

Abbildung 51: Einfluss der Frischluftmenge und Filterung auf die Expositionsmenge 175

Abbildung 52: Simulationsmodell des oberirdischen Bahnhofs am Beispiel des Münchener Hauptbahnhofs 177

Abbildung 53: Konzentrationsverlauf in Milli-Quanta je m³ entlang des Bahnsteigs beim "Sprechen ohne Maske" und rein thermischem Strömungsantrieb. 178

Abbildung 54: Zonales Modell der unterirdischen U-Bahnstation mit Mittelbahnsteig..... 180

Abbildung 55: Auswerte-Zone (6,3,2) für die Validierung der CO₂-Konzentration..... 181

Abbildung 56: Vergleich der gemessenen und simulierten CO₂-Konzentration im tiefliegenden U-Bahnhof mit Mittelbahnsteig. 181

Abbildung 57: Konzentrationsverlauf in Milli-Quanta je m³ entlang des Bahnsteigs beim "Sprechen ohne Maske". 181

Abbildung 58: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "Atmen ohne Maske".190

Abbildung 59: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "Sprechen mit MNS". 190

Abbildung 60: Vergleich typischer betrachteter Verkehrsmittel für den Fall "laut Sprechen mit FFP2". 191

Tabellenverzeichnis Teil C

Tabelle 1: Vergleich der Quellenbeschreibung des Emittenten.....	124
Tabelle 2: Reduktionswirkung durch Masken [13]	125
Tabelle 3: Kategorisierung der Zugtypen im Fern- und Regionalverkehr	127
Tabelle 4: Simulationsfälle und Eingangsdaten für einen typischen ICE-Großraumwagen	133
Tabelle 5: Exposition in der Nähe sowie weiter entfernt vom Emitter sitzend bei einem 2,5h- Aufenthalt in einem typischen ICE	138
Tabelle 6: Simulationsfälle und Eingangsdaten für den Talent 3 im Regionalverkehr.....	144
Tabelle 7: Exposition in Milli-Quanta bei einer 1:38 Stunden dauernden Fahrt zusammen mit einem Infizierten.....	148
Tabelle 8: Simulationsfälle und Eingangsdaten für die S-Bahn	151
Tabelle 9: Exposition bei einer 77-minütigen Fahrt zusammen mit einer infizierten Person.....	153
Tabelle 10: Eingangsdaten für die Simulation der U-Bahn älterer Bauart	156
Tabelle 11: Exposition bei einer 29,5-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten in einer älteren U-Bahn	159
Tabelle 12: Eingangsdaten für die Simulation der U-Bahn neuerer Bauart	161
Tabelle 13: Exposition bei einer 29,5-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten	163
Tabelle 14: Eingangsdaten für die Simulation des Fernbusses.....	165
Tabelle 15: Exposition bei einer 2,5 h Fahrt zusammen mit einem Infizierten	167
Tabelle 16: Eingangsdaten für die Simulation des Stadtbusses	169
Tabelle 17: Exposition bei einer 21,5 min Fahrt zusammen mit einem Infizierten	171
Tabelle 18: Eingangsdaten für die Simulation der Straßenbahn.....	173
Tabelle 19: Exposition bei einer rund 25-minütigen Fahrt zusammen mit einem Infizierten.....	175
Tabelle 20: Wartezeit am Bahnhof im Fernverkehr nach [26]	176
Tabelle 21: Exposition im Nahbereich bzw. weiter entfernt vom Emitter am oberirdischen Bahnsteig: 12 und 35 Minuten Wartezeit, Windanströmung, thermischer Antrieb	178
Tabelle 22: Exposition im Nahbereich bzw. weiter entfernt vom Emitter am unterirdischen Bahnhof für 8 Minuten Wartezeit	181
Tabelle 23: Typische Belegungen während und vor der Pandemie (Tatsächliche Sitz-/Stehplätze variieren je nach Ausführung).....	184

Quellenverzeichnis Teil C

- [1] **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**:183–194, doi:[10.1016/j.buildenv.2011.09.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.007).
- [2] **Müller, D.**, Rewitz, K., Derwein, D., Burgholz, T.M. et al., (2020): *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*. doi:[10.18154/RWTH-2020-11340](https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-11340).
- [3] **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**:106–112, doi:[10.1016/j.envint.2020.106112](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112).
- [4] **Buonanno, G.**, Stabile, L., and Morawska, L., (2020): *Estimation of airborne viral emission: Quantitative 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).
- [5] **Jimenez, J.L.**, (2020): *SARS-CoV-2 aerosol transmission estimator* [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/16K1OQkLD4BjgBdO8ePj6ytf-RpP-MUJ6aXFg3PrIQBbQ/edit#gid=519189277>.
- [6] **Asadi, S.**, Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S. et al., (2019): *Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness*. In: *Sci Rep* **9**(1), doi:[10.1038/s41598-019-38808-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z).
- [7] **Edwards, D.A.**, Man, J.C., Brand, P., Katstra, J.P. et al., (2004): *Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* **101**(50):17383–17388, doi:[10.1073/pnas.0408159101](https://doi.org/10.1073/pnas.0408159101).
- [8] **RWTH Aachen University**, (2021): *RisiCo* [Online]. Verfügbar unter: <https://risico.eonerc.rwth-aachen.de/>.
- [9] **Duhm, L.**, *Wieso sollen Fahrgäste in der S-Bahn den Mund halten, Herr Wortmann?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/panorama/wieso-sollen-fahrgaeste-in-der-s-bahn-ihren-mund-halten-herr-wortmann-a-5044363d-5773-4ab0-89b7-ede9ae8eeabf>.
- [10] **Boos R.**, Damberger B., Hutter H.-P. et al., (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):1358–1369, doi:[10.1007/s00103-008-0707-2](https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2).
- [11] **Howard, J.**, Huang, A., Li, Z., Tufekci, Z. et al., (2021): *An evidence review of face masks against COVID-19*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* **118**(4), doi:[10.1073/pnas.2014564118](https://doi.org/10.1073/pnas.2014564118).
- [12] **DIN** - Deutsches Institut für Normung e.V., EN, *DIN EN 149:2001-10 - Atemschutzgeräte - Filtrierende Halbmasken zum Schutz gegen Partikeln - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung*; Deutsche Fassung EN 149:2001, 149:2001-10, Beuth Verlag GmbH, Rev. Oct. 2010.

- [13] **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):413–418, doi:[10.1017/dmp.2013.43](https://doi.org/10.1017/dmp.2013.43).
- [14] **Grinshpun, S.A.**, Haruta, H., Eninger, R.M., Reponen, T. et al., (2009): *Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration.* In: *Journal of occupational and environmental hygiene* 6(10):593–603, doi:[10.1080/15459620903120086](https://doi.org/10.1080/15459620903120086).
- [15] **Nordquist, B.**, (1998): *Vädning av skolor - ett komplement till normal ventilation?*
- [16] **Deutscher Wetterdienst**, *Testreferenzjahre (TRY)* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- [17] **Deutsche Bahn AG**, *Daten & Fakten 2019* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.dbregio.de/db_regio/view/mdb/db_regio/unternehmen/mdb_311901_duf_d_web_02.pdf.
- [18] **Deutsche Bahn AG**, *Kennzahlen der DB Regio nach Geschäftsbereichen* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.dbregio.de/db_regio/view/wir/zahlen-daten-fakten.shtml.
- [19] **Deutsche Bahn AG**, *Züge im Fernverkehr: Zugtypen und ihre Strecken* [Online]. [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.bahn.de/p/view/service/zug/fahrzeuge/zugtypen.shtml?dbkanal_007=L01_S01_D001_KIN_-rs-zug_NAVIGATION-fahrzeuge_LZ01.
- [20] **Schwandl, R.**, (2019): *Tram Atlas Deutschland 5*, 5th ed., Schwandl, Robert, Berlin, ISBN 9783936573602.
- [21] **Maibaum, C.-A.**, *Datenbank der Webseite www.strassenbahn-online.de* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: <http://www.strassenbahn-online.de/>.
- [22] **Wittenfeld, U.**, *Datenbank der Webseite https://trampicturebook.de/tram/* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: Mühlheim a.d.Ruhr, <https://trampicturebook.de/tram/>.
- [23] **Esser, B.**, *Datenbank der Webseite www.tram-info.de* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tram-info.de/>.
- [24] **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV**, *VDV-Statistik & Jahresbericht* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/statistik-jahresbericht.aspx>.
- [25] **Stade, C.**, *Gleispläne der Webseite gleisplanweb.de* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: <https://gleisplanweb.eu/>.
- [26] **Norta, M.**, Valleé, D., (2012): *Ein Verkehrsmittelwahlmodell für den Personenfernverkehr auf der Basis von Verkehrswiderständen.* Aachen.
- [27] **Hu, M.**, Lin, H., Wang, J., Xu, C. et al., (2021): *Risk of Coronavirus Disease 2019 Transmission in Train Passengers: an Epidemiological and Modeling Study.* In: *Clinical Infectious Diseases* 72(4):604–610, doi:[10.1093/cid/ciaa1057](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1057).
- [28] **Robert Koch-Institut**, *Berichte zu Virusvarianten von SARS-CoV-2 in Deutschland, insbesondere zur Variant of Concern (VOC) B.1.1.7* [Online], [Zugriff am: 22.03.2021]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/DESH/Berichte-VOC-tab.html.

- [29] **Münchener Verkehrsgesellschaft mbH**, *website der Münchener Verkehrsgesellschaft mbH (MVG)* [Online], [Zugriff am: 20.01.2021]. Verfügbar unter: <https://www.mvg.de/>.
- [30] **DIN** - Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 14750-1: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter*, Rev. Aug. 2006.
- [31] **Luo, K., Lei, Z., Hai, Z., Xiao, S. et al.**, (2020): *Transmission of SARS-CoV-2 in Public Transportation Vehicles: A Case Study in Hunan Province, China*. In: *Open forum infectious diseases* **7**(10), doi:[10.1093/ofid/ofaa430](https://doi.org/10.1093/ofid/ofaa430).
- [32] **Shen, Y., Li, C., Dong, H., Wang, Z. et al.**, (2020): *Community Outbreak Investigation of SARS-CoV-2 Transmission Among Bus Riders in Eastern China*. In: *JAMA internal medicine* **180**(12):1665–1671, doi:[10.1001/jamainternmed.2020.5225](https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.5225).
- [33] **Statistisches Bundesamt**, *KORREKTUR: 46 % weniger Fahrgäste im Fernverkehr mit Bussen und Bahnen im 1. Halbjahr 2020* [Online], [Zugriff am: 02.03.2021]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemit>.
- [34] **Xie, W., Campbell, S., and Zhang, W.**, (2020): *Working memory capacity predicts individual differences in social-distancing compliance during the COVID-19 pandemic in the United States*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* **117**(30):17667–17674, doi:[10.1073/pnas.2008868117](https://doi.org/10.1073/pnas.2008868117).
- [35] **Pouw, C.A.S., Toschi, F., van Schadewijk, F., and Corbetta, A.**, (2020): *Monitoring physical distancing for crowd management: Real-time trajectory and group analysis*. In: *PloS one* **15**(10), doi:[10.1371/journal.pone.0240963](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240963).
- [36] **Statista**, *Statista-Dossier Fernbusmarkt*, January 28, 2021.
- [37] **Deutsche Bahn AG**, *Produktmanagement ICE: Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr* [Online]. Verfügbar unter: http://download-data.deutschebahn.com/static/datasets/fahrzeuglexikon/Fahrzeuglexikon_2017.pdf.
- [38] **Siemens AG**, *Der ICx - Eine neue Ära im Fernverkehr der Deutschen Bahn* [Online], [Zugriff am: 18.01.2021]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/37850426-Siemens-com-mobility-der-icx-eine-neue-aera-im-fernverkehr-der-deutschen-bahn.html>.
- [39] **Scharff, S.**, (20217): *Markteinführung des TALENT 3 mit Ausblick*. In: *Sonderheft Graz 2017* 141(2017).
- [40] **vlexx GmbH**, *Datenblatt Bombardier Talent 3* [Online], [Zugriff am: 18.01.2021]. Verfügbar unter: https://www.vlexx.de/media/vlexx/downloads/ens/Datenblatt_TALENT-3_lr.pdf.
- [41] **EvoBus GmbH**, *Die Citaro Stadtbusse. Technische Information* [Online], [Zugriff am: 18.01.2021]. Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-technical-brochures/images/content/regular-service-buses/citaro/citaro-08-09/TI_Citaro_Stadt_2019-DE.pdf.
- [42] **Kiepe Electric GmbH**, *Stadtbahn TW3000 Hannover, Deutschland* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.kiepe.knorr-bremse.com/schienenfahrzeuge/strassen-und-stadtbahnen/vkproduktordner.2008-05-15.5609169940/vkprodukt.2011-08-26.0906138624/vkprodukt_download.

- [43] **DIN** - Deutsches Institut für Normung e.V., EN, *DIN EN 15663:2019-03 - Bahnanwendungen - Fahrzeugreferenzmassen; Deutsche Fassung EN 15663:2017+A1:2018*. 15663:2019-03, Beuth Verlag GmbH, Rev. Mar. 2019.
- [44] **Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of V.**, (2020): *The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2*. In: *Nature microbiology* **5**(4):536–544, doi:[10.1038/s41564-020-0695-z](https://doi.org/10.1038/s41564-020-0695-z).
- [45] **Bundesinstitut für Risikobewertung**, (2020): *Leitfaden für die Bewertung gesundheitlicher Risiken*, 2000th ed., ISBN 978-3-948484-11-8.
- [46] **Robert Koch-Institut**, *Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19* [Online], [Zugriff am: 26.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html.
- [47] **Scheuch, G.**, (2020): *Breathing Is Enough: For the Spread of Influenza Virus and SARS-CoV-2 by Breathing Only*. In: *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery* **33**(4):230–234, doi:[10.1089/jamp.2020.1616](https://doi.org/10.1089/jamp.2020.1616).
- [48] **Prather, K.A.**, Wang, C.C., and Schooley, R.T., (2020): *Reducing transmission of SARS-CoV-2*. In: *Science* **368**(6498):1422–1424, doi:[10.1126/science.abc6197](https://doi.org/10.1126/science.abc6197).
- [49] **Harrison, A.G.**, Lin, T., and Wang, P., (2020): *Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmission and Pathogenesis*. In: *Trends in immunology* **41**(12):1100–1115, doi:[10.1016/j.it.2020.10.004](https://doi.org/10.1016/j.it.2020.10.004).
- [50] **Robert Koch-Institut**, *Übersicht und Empfehlungen zu besorgniserregenden SARS-CoV-2-Virusvarianten (VOC)* [Online]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Virusvariante.html.
- [51] **Haslbeck, K.**, Schwarz, K., Hohlfeld, J.M., Seume, J.R. et al., (2010): *Submicron droplet formation in the human lung*. In: *Journal of Aerosol Science* **41**(5):429–438, doi:[10.1016/j.jaerosci.2010.02.010](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.02.010).
- [52] **Ji, Y.**, Qian, H., Ye, J., and Zheng, X., (2018): *The impact of ambient humidity on the evaporation and dispersion of exhaled breathing droplets: A numerical investigation*. In: *Journal of Aerosol Science* **115**:164–172, doi:[10.1016/j.jaerosci.2017.10.009](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.10.009).
- [53] **Staudt, A.**, Saunders, J., Pavlin, J., and Shelton-Davenport, M. (eds.), (2020): *Airborne Transmission of SARS-CoV-2: Proceedings of a Workshop—in Brief*. Washington (DC), ISBN 0309684080.
- [54] **Hadei, M.**, Hopke, P.K., Jonidi, A., and Shahsavani, A., (2020): *A Letter about the Airborne Transmission of SARS-CoV-2 Based on the Current Evidence*. In: *Aerosol Air Qual. Res.* **20**(5):911–914, doi:[10.4209/aaqr.2020.04.0158](https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0158).
- [55] **Morawska, L.** and Cao, J., (2020): *Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality*. In: *Environment International* **139**, doi:[10.1016/j.envint.2020.105730](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730).
- [56] **Morawska, L.**, Johnson, G.R., Ristovski, Z.D., Hargreaves, M. et al., (2009): *Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities*. In: *Journal of Aerosol Science* **40**(3):256–269, doi:[10.1016/j.jaerosci.2008.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002).
- [57] **Asadi, S.**, Cappa, C.D., Barreda, S., Wexler, A.S. et al., (2020): *Efficacy of masks and face coverings in controlling outward aerosol particle emission from expiratory activities*. In: *Sci Rep* **10**(1), doi:[10.1038/s41598-020-72798-7](https://doi.org/10.1038/s41598-020-72798-7).

- [58] **Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S. et al., (2020):** *Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech.* In: PloS one **15**(1), doi:[10.1371/journal.pone.0227699](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227699).
- [59] **Tellier, R., Li, Y., Cowling, B.J., and Tang, J.W., (2019):** *Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary.* In: BMC infectious diseases **19**(1):101, doi:[10.1186/s12879-019-3707-y](https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y).
- [60] **Anfinrud, P., Stadnytskyi, V., Bax, C.E., and Bax, A., (2020):** *Visualizing Speech-Generated Oral Fluid Droplets with Laser Light Scattering.* In: N Engl J Med **382**(21):2061–2063, doi:[10.1056/NEJMc2007800](https://doi.org/10.1056/NEJMc2007800).
- [61] **Kang, M., Wei, J., Yuan, J., Guo, J. et al., (2020):** *Probable Evidence of Fecal Aerosol Transmission of SARS-CoV-2 in a High-Rise Building.* In: Ann Intern Med **173**(12):974–980, doi:[10.7326/M20-0928](https://doi.org/10.7326/M20-0928).
- [62] **Lu, J., Gu, J., Li, K., Xu, C. et al., (2020):** *COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020.* In: Emerging infectious diseases **26**(7):1628–1631, doi:[10.3201/eid2607.200764](https://doi.org/10.3201/eid2607.200764).
- [63] **Mürbe, D., Fleischer, M., Lange, J., Rotheudt, H. et al., (2020):** *Aerosol emission is increased in professional singing.* doi:[10.14279/depositonce-10375.3](https://doi.org/10.14279/depositonce-10375.3).
- [64] **Stadnytskyi, V., Bax, C.E., Bax, A., and Anfinrud, P., (2020):** *The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission.* In: Proceedings of the National Academy of Sciences **117**(22):11875–11877, doi:[10.1073/pnas.2006874117](https://doi.org/10.1073/pnas.2006874117).
- [65] **Streeck, H., Schulte, B., Kümmerer, B.M., Richter, E. et al., (2020):** *Infection fatality rate of SARS-CoV-2 infection in a German community with a super-spreading event.*
- [66] **Guenther, T., Czech-Sioli, M., Indenbirken, D., Robitailles, A. et al., (2020):** *Investigation of a super-spreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany.* In: SSRN Journal, doi:[10.2139/ssrn.3654517](https://doi.org/10.2139/ssrn.3654517).
- [67] **Hamner, L., Dubbel, P., Capron, I., Ross, A. et al., (2020):** *High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice - Skagit County, Washington, March 2020.* In: MMWR. Morbidity and mortality weekly report **69**(19):606–610, doi:[10.15585/mmwr.mm6919e6](https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6919e6).
- [68] **Umweltbundesamt, (2020):** *Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren.*
- [69] **Leclerc, Q.J., Fuller, N.M., Knight, L.E., Funk, S. et al., (2020):** *What settings have been linked to SARS-CoV-2 transmission clusters?* In: Wellcome open research **5**:83, doi:[10.12688/wellcomeopenres.15889.2](https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.15889.2).
- [70] **Zhu, H., Wang, L., Fang, C., Peng, S. et al., (2020):** *Clinical analysis of 10 neonates born to mothers with 2019-nCoV pneumonia.* In: Translational pediatrics **9**(1):51–60, doi:[10.21037/tp.2020.02.06](https://doi.org/10.21037/tp.2020.02.06).
- [71] **Zeng, L., Xia, S., Yuan, W., Yan, K. et al., (2020):** *Neonatal Early-Onset Infection With SARS-CoV-2 in 33 Neonates Born to Mothers With COVID-19 in Wuhan, China.* In: JAMA pediatrics **174**(7):722–725, doi:[10.1001/jamapediatrics.2020.0878](https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2020.0878).
- [72] **Dong, L., Tian, J., He, S., Zhu, C. et al., (2020):** *Possible Vertical Transmission of SARS-CoV-2 From an Infected Mother to Her Newborn.* In: JAMA **323**(18):1846–1848, doi:[10.1001/jama.2020.4621](https://doi.org/10.1001/jama.2020.4621).

- [73] **Linton**, N.M., Kobayashi, T., Yang, Y., Hayashi, K. et al., (2020): *Incubation Period and Other Epidemiological Characteristics of 2019 Novel Coronavirus Infections with Right Truncation: A Statistical Analysis of Publicly Available Case Data*. In: *Journal of clinical medicine* **9**(2), doi:[10.3390/jcm9020538](https://doi.org/10.3390/jcm9020538).
- [74] **Yang**, L., Dai, J., Zhao, J., Wang, Y. et al., (2020): *Estimation of incubation period and serial interval of COVID-19: analysis of 178 cases and 131 transmission chains in Hubei province, China*. In: *Epidemiology and infection* **148**:e117, doi:[10.1017/S0950268820001338](https://doi.org/10.1017/S0950268820001338).
- [75] **Lauer**, S.A., Grantz, K.H., Bi, Q., Jones, F.K. et al., (2020): *The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application*. In: *Ann Intern Med* **172**(9):577–582, doi:[10.7326/M20-0504](https://doi.org/10.7326/M20-0504).
- [76] **Li**, Q., Guan, X., Wu, P., Wang, X. et al., (2020): *Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia*. In: *N Engl J Med* **382**(13):1199–1207, doi:[10.1056/NEJMoa2001316](https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001316).
- [77] **Ma**, S., Zhang, J., Zeng, M., Yun, Q. et al., (2020): *Epidemiological Parameters of COVID-19: Case Series Study*. In: *Journal of medical Internet research* **22**(10), doi:[10.2196/19994](https://doi.org/10.2196/19994).
- [78] **McAloon**, C., Collins, Á., Hunt, K., Barber, A. et al., (2020): *Incubation period of COVID-19: a rapid systematic review and meta-analysis of observational research*. In: *BMJ open* **10**(8), doi:[10.1136/bmjopen-2020-039652](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039652).
- [79] **Qin**, J., You, C., Lin, Q., Hu, T. et al., (2020): *Estimation of incubation period distribution of COVID-19 using disease onset forward time: A novel cross-sectional and forward follow-up study*. In: *Science advances* **6**(33), doi:[10.1126/sciadv.abc1202](https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1202).
- [80] **Wang**, X., Zhou, Z., Zhang, J., Zhu, F. et al., (2020): *A Case of 2019 Novel Coronavirus in a Pregnant Woman With Preterm Delivery*. In: *Clinical Infectious Diseases* **71**(15):844–846, doi:[10.1093/cid/ciaa200](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa200).
- [81] **Xiao**, F., Sun, J., Xu, Y., Li, F. et al., (2020): *Infectious SARS-CoV-2 in Feces of Patient with Severe COVID-19*. In: *Emerging infectious diseases* **26**(8):1920–1922, doi:[10.3201/eid2608.200681](https://doi.org/10.3201/eid2608.200681).
- [82] **Cummings**, M.J., Baldwin, M.R., Abrams, D., Jacobson, S.D. et al., (2020): *Epidemiology, clinical course, and outcomes of critically ill adults with COVID-19 in New York City: a prospective cohort study*. In: *The Lancet* **395**(10239):1763–1770, doi:[10.1016/S0140-6736\(20\)31189-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31189-2).
- [83] **Huang**, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L. et al., (2020): *Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China*. In: *The Lancet* **395**(10223):497–506, doi:[10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5).
- [84] **Petersen**, E., Koopmans, M., Go, U., Hamer, D.H. et al., (2020): *Comparing SARS-CoV-2 with SARS-CoV and influenza pandemics*. In: *The Lancet. Infectious diseases* **20**(9):e238–e244, doi:[10.1016/S1473-3099\(20\)30484-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30484-9).
- [85] **Potere**, N., Valeriani, E., Candeloro, M., Tana, M. et al., (2020): *Acute complications and mortality in hospitalized patients with coronavirus disease 2019: a systematic review and meta-analysis*. In: *Critical care (London, England)* **24**(1):389, doi:[10.1186/s13054-020-03022-1](https://doi.org/10.1186/s13054-020-03022-1).
- [86] **European Medicines Agency EMA**, (2020): *Update on remdesivir - EMA will evaluate new data from*.
- [87] **Siemieniuk**, R., Rochweg, B., Agoritsas, T., Lamontagne, F. et al., (2020): *A living WHO guideline on drugs for covid-19*. In: *BMJ (Clinical research ed.)* **370**, doi:[10.1136/bmj.m3379](https://doi.org/10.1136/bmj.m3379).

- [88] **Wu**, Y.-C., Chen, C.-S., and Chan, Y.-J., (2020): *The outbreak of COVID-19: An overview*. In: Journal of the Chinese Medical Association: JCMA **83**(3):217–220, doi:[10.1097/JCMA.0000000000000270](https://doi.org/10.1097/JCMA.0000000000000270).
- [89] **Cunningham**, J.W., Vaduganathan, M., Claggett, B.L., Jering, K.S. et al., (2020): *Clinical Outcomes in Young US Adults Hospitalized With COVID-19*. In: JAMA internal medicine, doi:[10.1001/jamaintern-med.2020.5313](https://doi.org/10.1001/jamaintern-med.2020.5313).
- [90] **Karagiannidis**, C., Mostert, C., Hentschker, C., Voshaar, T. et al., (2020): *Case characteristics, resource use, and outcomes of 10 021 patients with COVID-19 admitted to 920 German hospitals: an observational study*. In: The Lancet Respiratory Medicine **8**(9):853–862, doi:[10.1016/S2213-2600\(20\)30316-7](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30316-7).
- [91] **CDC Weekly**, C., (2020): *The Epidemiological Characteristics of an Outbreak of 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19) – China, 2020*. In: China CDC Weekly **2**(8):113–122, doi:[10.46234/ccdcw2020.032](https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.032).
- [92] **Kellam**, P. and Barclay, W., (2020): *The dynamics of humoral immune responses following SARS-CoV-2 infection and the potential for reinfection*. In: The Journal of general virology **101**(8):791–797, doi:[10.1099/jgv.0.001439](https://doi.org/10.1099/jgv.0.001439).
- [93] **Okba**, N.M.A., Müller, M.A., Li, W., Wang, C. et al., (2020): *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2-Specific Antibody Responses in Coronavirus Disease Patients*. In: Emerging infectious diseases **26**(7):1478–1488, doi:[10.3201/eid2607.200841](https://doi.org/10.3201/eid2607.200841).
- [94] **To**, K.K.-W., Tsang, O.T.-Y., Leung, W.-S., Tam, A.R. et al., (2020): *Temporal profiles of viral load in posterior oropharyngeal saliva samples and serum antibody responses during infection by SARS-CoV-2: an observational cohort study*. In: The Lancet. Infectious diseases **20**(5):565–574, doi:[10.1016/S1473-3099\(20\)30196-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30196-1).
- [95] **ECDC European Centre for Disease Prevention and Control**, *Factsheet for health professionals on Coronaviruses European Centre for Disease Prevention and Control* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecdc.europa.eu/en/covid-19/latest-evidence>.
- [96] **Goldman**, E., (2020): *Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites*. In: The Lancet. Infectious diseases **20**(8):892–893, doi:[10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2).
- [97] **Goldman**, E., (2021): *Coronavirus is in the air - there's too much focus on surfaces*. In: Nature **590**(7844):892–893, doi:[10.1038/d41586-021-00277-8](https://doi.org/10.1038/d41586-021-00277-8).
- [98] **Di Carlo**, P., Chiacchiarretta, P., Sinjari, B., Aruffo, E. et al., (2020): *Air and surface measurements of SARS-CoV-2 inside a bus during normal operation*. In: PloS one **15**(11), doi:[10.1371/journal.pone.0235943](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235943).
- [99] **Kutti-Sridharan**, G., Vegunta, R., Vegunta, R., Mohan, B.P. et al., (2020): *SARS-CoV2 in Different Body Fluids, Risks of Transmission, and Preventing COVID-19: A Comprehensive Evidence-Based Review*. In: International journal of preventive medicine **11**:97, doi:[10.4103/ijpvm.IJPVM_255_20](https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_255_20).
- [100] **Gravert**, C., et al., (2021): *Bisherige Erkenntnisse zu COVID-19 im Personenfernverkehr der Deutschen Bahn*.
- [101] **Möhner**, M. and Wolik, A., (2020): *Differences in COVID-19 Risk Between Occupational Groups and Employment Sectors in Germany*. In: Dtsch Arztebl Int **117**(38):641–642, doi:[10.3238/arztebl.2020.0641](https://doi.org/10.3238/arztebl.2020.0641).

- [102] **Qian, H., Miao, T., Liu, L., Zheng, X. et al., (2020):** *Indoor transmission of SARS-CoV-2*. In: Indoor Air, doi:[10.1111/ina.12766](https://doi.org/10.1111/ina.12766).
- [103] **Robert Koch-Institut, ControlCOVID - Strategie und Handreichung zur Entwicklung von Stufenkonzepten bis Frühjahr 2021** [Online], [Zugriff am: 24.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Downloads/Stufenplan.pdf?__blob=publicationFile.
- [104] **BfArM, Antigen-Tests auf SARS-CoV-2** [Online], [Zugriff am: 27.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.bfarm.de/DE/Medizinprodukte/Antigentests/_node.html.
- [105] **Robert Koch-Institut, Epidemiologisches Bulletin: STIKO: Aktualisierung der Influenza-Impfempfehlung für Personen im Alter von ≥ 60 Jahren** [Online], [Zugriff am: 24.02.2021]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2021/Ausgaben/01_21.pdf?__blob=publicationFile.
- [106] **Robert Koch-Institut, Epidemiologisches Bulletin: Was ist bei Antigentests zur Eigenanwendung (Selbsttests) zum Nachweis von SARS-CoV-2 zu beachten?** February 24, 2021.
- [107] **Koornstra, M.J., (2009):** *Risk-adaptation theory*. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **12**(1):77–90, doi:[10.1016/j.trf.2008.08.002](https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.08.002).
- [108] **Plohl, N. and Musil, B., (2021):** *Modeling compliance with COVID-19 prevention guidelines: the critical role of trust in science*. In: Psychology, health & medicine **26**(1):1–12, doi:[10.1080/13548506.2020.1772988](https://doi.org/10.1080/13548506.2020.1772988).
- [109] **Nivette, A., Ribeaud, D., Murray, A., Steinhoff, A. et al., (2021):** *Non-compliance with COVID-19-related public health measures among young adults in Switzerland: Insights from a longitudinal cohort study*. In: Social science & medicine (1982) **268**, doi:[10.1016/j.socscimed.2020.113370](https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113370).
- [110] **Seibt, A.C., (2016):** *Erklärungs- und Veränderungsmodelle I: Einstellungs- und Verhaltensänderungen*. doi:[10.17623/BZGA:224-i012-1.0](https://doi.org/10.17623/BZGA:224-i012-1.0).
- [111] **Heiby, E.M., Lukens, C.L., and Frank, M.R., (2005):** *The Health Compliance Model-II*. In: The Behavior Analyst Today **6**(1):27–42, doi:[10.1037/h0100050](https://doi.org/10.1037/h0100050).
- [112] **Ajzen, I., (1985):** *From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior*, in: Kuhl, J. and Beckmann, J. (eds.), Action Control, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-69748-7:11–39.
- [113] **Ajzen, I., (1991):** *The theory of planned behavior*. In: Organizational Behavior and Human Decision Processes **50**(2):179–211, doi:[10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T).
- [114] **Cialdini, R.B., (2003):** *Crafting Normative Messages to Protect the Environment*. In: Curr Dir Psychol Sci **12**(4):105–109, doi:[10.1111/1467-8721.01242](https://doi.org/10.1111/1467-8721.01242).
- [115] **Cialdini, R.B. and Goldstein, N.J., (2004):** *Social influence: compliance and conformity*. In: Annual review of psychology **55**:591–621, doi:[10.1146/annurev.psych.55.090902.142015](https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.142015).
- [116] **Muzaffer, S., (1935):** *A study of some social factors in perception: Chapter 3*. In: Archives of Psychology **27**(187):23–46.

- [117] **Condon**, B.J. and Sinha, T., (2010): *Who is that masked person: the use of face masks on Mexico City public transportation during the Influenza A (H1N1) outbreak*. In: Health policy (Amsterdam, Netherlands) **95**(1):50–56, doi:[10.1016/j.healthpol.2009.11.009](https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2009.11.009).
- [118] **Bradford**, B., Hohl, K., Jackson, J., and MacQueen, S., (2015): *Obeying the Rules of the Road*. In: Journal of Contemporary Criminal Justice **31**(2):171–191, doi:[10.1177/1043986214568833](https://doi.org/10.1177/1043986214568833).
- [119] **Azlan**, A.A., Hamzah, M.R., Sern, T.J., Ayub, S.H. et al., (2020): *Public knowledge, attitudes and practices towards COVID-19: A cross-sectional study in Malaysia*. In: PloS one **15**(5), doi:[10.1371/journal.pone.0233668](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233668).
- [120] **Jabbari**, P., Taraghikhah, N., Jabbari, F., Ebrahimi, S. et al., (2020): *Adherence of the General Public to Self-Protection Guidelines During the COVID-19 Pandemic*. In: Disaster medicine and public health preparedness:1–4, doi:[10.1017/dmp.2020.445](https://doi.org/10.1017/dmp.2020.445).
- [121] **Zhong**, B.-L., Luo, W., Li, H.-M., Zhang, Q.-Q. et al., (2020): *Knowledge, attitudes, and practices towards COVID-19 among Chinese residents during the rapid rise period of the COVID-19 outbreak: a quick online cross-sectional survey*. In: International journal of biological sciences **16**(10):1745–1752, doi:[10.7150/ijbs.45221](https://doi.org/10.7150/ijbs.45221).
- [122] **Zhao**, S.Z., Wong, J.Y.H., Wu, Y., Choi, E.P.H. et al., (2020): *Social Distancing Compliance under COVID-19 Pandemic and Mental Health Impacts: A Population-Based Study*. In: International journal of environmental research and public health **17**(18), doi:[10.3390/ijerph17186692](https://doi.org/10.3390/ijerph17186692).
- [123] **Johnson**, D., Deterding, S., Kuhn, K.-A., Staneva, A. et al., (2016): *Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature*. In: Internet interventions **6**:89–106, doi:[10.1016/j.invent.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.invent.2016.10.002).
- [124] **Tyler**, T.R., (2006): *Psychological perspectives on legitimacy and legitimation*. In: Annual review of psychology **57**:375–400, doi:[10.1146/annurev.psych.57.102904.190038](https://doi.org/10.1146/annurev.psych.57.102904.190038).

Teil D

Arbeitspaket 3:

Ableitung eines Maßnahmenkatalogs sowie
Validierung der Modellierungsszenarien

Inhaltsverzeichnis – Teil D

Kurzbeschreibung Teil D	221
1 Einführung Teil D.....	223
2 Messkonzept	224
2.1 Fahrzeugauswahl.....	224
2.2 Auswahl von Stationen.....	225
2.3 Auswahl der Mess- und Probenahmezeiten	225
2.4 Innenraumluft	226
2.5 Oberflächen	227
3 Feldversuche (Messkampagne) und Ergebnisse	228
3.1 Aerosoldynamik, Innenraumluftthygiene und Lüftungseffizienz	228
3.2 Luftkeimsammlung und ergänzende physikalisch-chemische Parameter	240
3.3 Molekularbiologische und mikrobiologische Untersuchungen an der TU München	262
3.4 Molekularbiologische Untersuchungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik.....	275
3.5 Zusammenfassung der molekular- und mikrobiologischen Ergebnisse	277
4 Validierung der Simulation	278
4.1 ICE.....	278
4.2 Regionalzug und S-Bahn.....	278
4.3 U-Bahnen.....	278
4.4 Fernbus.....	279
4.5 Stadtbus	279
4.6 Straßenbahn.....	279
4.7 Bahnhof oberirdisch.....	279
4.8 Bahnhof unterirdisch	279
5 Ableitung eines Maßnahmenkatalogs.....	280
5.1 Organisatorische und betriebliche Maßnahmen.....	280
5.2 Technische Maßnahmen.....	281
5.3 Hygienekonzepte.....	281
5.4 Am Markt verfügbare Technologien	282
5.5 Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	283
5.6 Zielrichtung öffentlicher Forschungsförderung.....	284

6	Diskussion.....	285
6.1	Luftqualität.....	285
6.2	Aerosole	285
6.3	SARS-CoV-2 und HAdV	286
6.4	Validierung	286
7	Zusammenfassung und Ausblick Teil D	287
	Abbildungsverzeichnis Teil D	288
	Tabellenverzeichnis Teil D	291
	Quellenverzeichnis Teil D	293
	Anhang Teil D	297
	Tabellen.....	297
	Abbildungen.....	304

Kurzbeschreibung Teil D

Die hier vorgestellten Arbeiten umfassen die Erstellung eines Messkonzepts mit dem Ziel, Daten für die Validierung der Ausbreitungssimulation von SARS-CoV-2 in Fahrzeugen und Stationen (Bahnhöfe, Bahnsteige, Haltestellen) des öffentlichen Personenverkehrs zur Verfügung zu stellen und die Simulationen anhand der erhobenen Daten zu validieren. Die zu beprobenden Fahrzeuge deckten die wesentlichen Ausprägungen des öffentlichen Personenverkehrs ab. In die Messkampagne wurden Schienenfahrzeuge des Fern-, Regional-, Nah- und Stadtverkehrs ebenso miteinbezogen wie Fernreise- und Stadtbusse. Die Untersuchungen fanden in der Zeit vom 30.11.2020 bis Ende März 2021 und damit auch unter den Bedingungen des Lockdowns bzw. der in Bayern seit dem 18.01.2021 geltenden gesetzlichen Verpflichtung zum Tragen einer FFP2-Maske in allen Einrichtungen des Nahverkehrs statt.

Neben klimatischen Parametern wie Lufttemperatur und relativer Feuchte wurde die CO₂-Konzentration in den Fahrzeugen und den stationären Einrichtungen aufgezeichnet, da CO₂ in Räumen mit hoher Personenbelegung als Anhaltspunkt für gute oder schlechte Lüftung dienen kann. Unter hygienischen Aspekten dient CO₂ in der Innenraumluft als Indikator für eine durch menschliche Aktivitäten beeinflusste Luftqualität. Die CO₂-Konzentration stellt also einen geeigneten und leicht bestimmbaren Marker dar, um Lüftungs- und Ausbreitungsmodelle zu validieren.

Die CO₂-Konzentrationen lagen in den meisten Fahrzeugen im hygienisch akzeptablen Bereich kleiner 1.000 ppm (parts per million). Nur im Fernbus lag die CO₂-Konzentration dauerhaft im auffälligen Bereich zwischen 1.000 und 2.000 ppm. Der hygienisch inakzeptable Bereich mit größer 2.000 ppm wurde in keinem der untersuchten Fahrzeuge erreicht. Die CO₂-Konzentrationen in Bahnhöfen lagen zwischen der Konzentration in der Außenluft (ca. 410 ppm) und 587 ppm und somit im hygienisch akzeptablen Bereich.

Aerosolpartikel werden als ein Übertragungsweg für SARS-CoV-2 angesehen. Die Bestimmung der Aerosolpartikel-Konzentration in der Luft in Verbindung mit der herrschenden CO₂-Konzentration kann Hinweise darauf geben, ob die Aerosolpartikel durch Exhalation oder durch andere Quellen in die Raumluft gelangen können. In der Regel steigt die Aerosolpartikel-Konzentration an den Haltestellen im Nahverkehr deutlich an. Ein Grund dafür ist die Bewegung der ein- und aussteigenden Fahrgäste und damit ein Aufwirbeln abgesetzter (sedimentierter) Aerosolpartikel. Aus dem Abklingverhalten der Aerosolpartikel-Konzentration nach dem Schließen der Türen lässt sich auf die Effizienz des Lüftungssystems im jeweiligen Fahrgastraum schließen. Es lässt sich feststellen, dass die Lüftungssysteme in den untersuchten Fahrzeugen effizient arbeiten: exhalierendes CO₂ und Aerosolpartikel werden innerhalb kurzer Zeit aus der Raumluft entfernt. Die Aerosolpartikel-Konzentrationen in den Fahrgastbereichen waren nicht durch die Atmung der anwesenden Personen bedingt. Sie nahmen nach dem Schließen der Türen schnell ab und erreichten meist nach kurzer Zeit wieder Außenluftniveau.

Die in ausgewählten straßen- und schienengebundenen Fahrzeugen und stationären Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs ermittelten CO₂-Konzentrationen wurden zur Validierung der Ausbreitungssimulation von virushaltigen Aerosolen herangezogen. Ergänzend wurden stichprobenartig Luftkeimmessungen durchgeführt, um die Anwesenheit von SARS-CoV-2 in der Luft zu prüfen. In Fahrzeugen und stationären Einrichtungen wurden von häufig berührten Oberflächen und von Oberflächen, die mit der Ausatemluft in Berührung kommen können, Wischproben genommen. Luft- und Wischproben wurden sowohl auf SARS-CoV-2 als auch auf Humane Adenoviren (HAdV) untersucht. HAdV kommen sehr häufig vor und dienten in dieser Untersuchung als Kontrollvirus für eine erfolgreiche Probenahme.

Luft- und Wischproben wurden mittels molekularbiologischer Methoden (quantitative Polymerase-Kettenreaktion (qPCR)) auf die Anwesenheit von SARS-CoV-2 und HAdV untersucht. In den Proben, bei de-

nen die qPCR ein positives Ergebnis zeigte, wurden außerdem die Vermehrungsfähigkeit der gesammelten Viren geprüft. Der reine Nachweis von Virus-Genom lässt noch keine Aussage über ein existierendes Infektionsrisiko zu. Nur vermehrungsfähige Viren sind in der Lage, Zellen zu infizieren und eine Erkrankung auszulösen. SARS-CoV-2 konnte in keiner Probe nachgewiesen werden. HAdV konnten in geringen Mengen nachgewiesen werden und waren vereinzelt auch noch vermehrungsfähig. Diese Befunde legen nahe, dass das Tragen von Masken, die Handhygiene der Fahrgäste und die von den Betreibern eingeleiteten Hygienemaßnahmen wirksam sind. Sie verringern die von den Fahrgästen emittierte Virenlast.

Die Simulation in AP 2 (Teil C) zeigt, dass die wirksamste Maßnahme zur Reduktion von potentiell virus-haltigen Bioaerosolen in der Luft das Tragen einer gut sitzenden FFP2-Maske in Kombination mit einer verringerten Kommunikationslautstärke ist. Technische Maßnahmen wie die Erhöhung des Frischluftanteils oder die Behandlung des Umluftanteils zur Verringerung der Aerosolkonzentration bzw. zur Inaktivierung von Viren leisten einen zusätzlichen Beitrag zur Verringerung des Infektionsrisikos in den Fahrzeugen.

Maßnahmen, die zur gleichmäßigeren Verteilung der Fahrgäste beim Ein- und Aussteigen führen und damit einer Pulkbildung entgegenwirken, sind ad hoc nicht ohne weiteres umsetzbar. Sie bedürfen entweder Änderungen bei der Fahrplangestaltung oder weitergehender Untersuchungen, die geeignete technische Maßnahmen und deren Umsetzbarkeit aufzeigen.

Das wesentlichste Element aller Maßnahmen zur Risikominimierung bleibt das menschliche Verhalten. Die Motivation der Passagiere, sich selbst und andere vor einer möglichen Ansteckung zu schützen, kann durch die Vermittlung der Selbst-Wirksamkeit und eine positive Rückkopplung (Belohnung, Lob) bei regelkonformem Verhalten aufrechterhalten werden. Eine Sanktionierung regelwidrigen Verhaltens wird damit nicht ausgeschlossen. Maßnahmen, die pandemieadäquates Verhalten fördern, erleichtern oder unterstützen, tragen dazu bei, die notwendigen Maßnahmen zum Fremd- und Eigenschutz weiterhin konsequent umzusetzen.

1 Einführung Teil D

Die SARS-CoV-2-Pandemie führte zu einem massiven Einbruch der Fahrgastzahlen im öffentlichen Personenverkehr. Dieser Einbruch ist mehreren Faktoren geschuldet: der verordneten Schließung von Betrieben, der Aufforderung, verstärkt von der eigenen Wohnung aus zu arbeiten und unnötige Reisen zu unterlassen, den Kontaktbeschränkungen, der Schließung von Schulen und Universitäten sowie der Befürchtung der Menschen, sich in Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs mit SARS-CoV-2 zu infizieren. Unzureichend belüftete Innenräume, in denen virenhaltige Aerosolpartikel lange Zeit schwebend verweilen können und in denen sich mehrere Personen aufhalten, gelten zurecht als Bereiche mit hohem Infektionsrisiko. Über das Risiko, sich im öffentlichen Personenverkehr mit SARS-CoV-2 zu infizieren, liegen aus Deutschland noch keine belastbaren Studien vor. Arbeiten chinesischer Autoren stammen noch vom Beginn der Pandemie, als das Tragen von Masken nicht allgemein üblich oder vorgeschrieben war.

Die Mess- und Probenahmekampagne fand von November 2020 bis März 2021 statt, fiel also bereits in die Zeit des erneuten Lockdowns zu Beginn des Jahres 2021. Während der gesamten Messkampagne war das Tragen von Mund-Nasen-Bedeckungen im öffentlichen Personenverkehr vorgeschrieben. In der Messregion Bayern ist seit Januar 2021 das Tragen von FFP2-Masken in allen Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs verpflichtend.

Zur Identifizierung des Infektionsrisikos im öffentlichen Personenverkehr sind mehrere Fragen von Bedeutung:

- Wie hoch ist die Belastung der Luft mit SARS-CoV-2 in den Einrichtungen und Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs?
- Wie hoch ist die Keimbelastung auf häufig berührten oder mit der Ausatemluft in Kontakt kommenden Oberflächen?
- Welche Maßnahmen können ergriffen werden, um das Infektionsrisiko mit SARS-CoV-2 zu verringern?

Die hier vorgestellten experimentellen Arbeiten umfassen Untersuchungen zur Aerodynamik und zur Lüftungseffizienz in öffentlichen Verkehrsmitteln, die Bestimmung von CO₂- und Aerosolpartikelanzahlkonzentrationen in Fahrzeugen und in stationären Einrichtungen, die Luftkeimsammlung in Fahrzeugen des Fern-, Regional-, Nah- und innerstädtischen Verkehrs und in drei unterschiedlichen Bahnhofstypen. Außerdem wurden Wischproben von häufig berührten Oberflächen in Fahrzeugen und stationären Einrichtungen sowie von Oberflächen, die mit der Ausatemluft in Kontakt stehen können, genommen. Luft- und Wischproben wurden mittels RT-qPCR (quantitative Echtzeit-Polymerase-Kettenreaktion) auf die Anwesenheit von SARS-CoV-2 und von humanen Adenoviren untersucht. Bei einem positiven Befund wurde die Vermehrungsfähigkeit des Virus geprüft. Der Nachweis von Virus-Genom mittels RT-qPCR lässt noch keine Aussage darüber zu, ob ein Virus noch vermehrungsfähig, also infektiös ist. Nur vermehrungsfähige Viren können in Wirtszellen eindringen und eine Infektion auslösen.

Wesentliche Antworten auf dritte Fragestellungen wurden im Rahmen einer Simulationsstudie (AP 2) bearbeitet, zu der die hier beschriebenen Untersuchungen die Validierungsdaten lieferten. Darüberhinausgehende, überwiegend technisch-organisatorische Maßnahmen und die dafür noch notwendigen Untersuchungen umfassen die Vermeidung der Pulkbildung, die Entzerrung von Personenansammlungen im Bereich der Zu- und Ausgänge sowie mögliche Anzeigesysteme für die Auslastung einzelner Fahrzeuge oder Wagen.

2 Messkonzept

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 die CO₂-Konzentration und die geschätzte Belegungsdichte als geeignete Parameter angesehen, denn der CO₂-Gehalt in der Innenraumluft stellt ein gutes Maß für die Anzahl und die Aktivität von Personen in einem Innenraum dar und lässt gleichzeitig Aussagen über das Ausmaß der Frischluftzufuhr und die Lüftungseffizienz zu. Die zeitlichen Verläufe der CO₂- und Aerosolpartikel-Konzentrationen werden mit direktanzeigenden Messgeräten erfasst. Da die Übertragung von SARS-CoV-2 auch über Aerosolpartikel stattfinden kann, ist das Verhalten von Aerosolpartikel- und CO₂-Konzentration gemeinsam zu betrachten. Insbesondere gilt es, Erkenntnisse über die Dynamik von Aerosolpartikeln in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs zu gewinnen (Abschnitt 3.1).

Die durchgeführten exemplarischen Untersuchungen umfassen die 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 (CO₂-Konzentrationen) im Betrieb für die Validierung der Simulation sowie Untersuchungen zur Innenraumluft-hygiene, Aerodynamik 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 Auslastung 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.

Die hinsichtlich einer Kontamination mit SARS-CoV-2 und HAdV beprobten Fahrzeuge und stationären Einrichtungen sind in Tabelle 16 im Anhang zusammengefasst.

2.1 Fahrzeugauswahl

Die untersuchten Fahrzeuge sollen möglichst die wesentlichen Ausprägungen des öffentlichen Personenverkehrs abbilden. Daraus folgt, dass folgende Verkehrsmittel in die Messkampagne miteinzubeziehen sind:

- Schienenfahrzeuge
 - Fernreisezüge (ICE)
 - Regionalzüge (RE, RB)
 - S-Bahnen
 - U-Bahnen, Stadt- und Straßenbahnen
- Busse
 - Fernbusse
 - Stadtbusse

Damit können

- unterschiedliche Fahrzeuggeometrien,
- unterschiedliche Lüftungskonzepte,
- unterschiedliche Verweildauern der Fahrgäste im Fahrzeug,

- unterschiedliche Belegungsdichten und der
- Einfluss der Häufigkeit der Türöffnung auf die Luftqualität im Fahrzeug

erfasst werden.

Bei der Auswahl der Fahrzeugtypen wird ein besonderes Augenmerk auf eine überregionale Verbreitung der Fahrzeuge gelegt. Die ICE-Züge der Baureihen 403, 406, 407 (ICE 3) und 412 (ICE 4) sollen mit 67 (ICE 3) bzw. zukünftig über 100 Fahrzeugen (ICE 4) das Rückgrat der ICE-Flotte der Deutschen Bahn AG bilden. Regionaltriebzüge vom Typ Bombardier Talent 2 werden von der Deutschen Bahn AG und von mehreren privaten Anbietern (Cantus, Abellio und National Express) eingesetzt. S-Bahn-Triebzüge der Baureihe 423/433 verkehren bei den S-Bahnen München, Stuttgart, Rhein-Main und der S-Bahn Köln. Die Hersteller von Stadt-, Straßen- und U-Bahnen entwickeln die Fahrzeuge hingegen meist nach den Vorgaben der lokalen Verkehrsbetriebe.

Für die Validierung der Simulationen werden von den Fahrzeugen, von denen auch Konstruktionsdaten verfügbar sind, Messwerte benötigt. Außerdem sollen a) die derzeit aktuellen Fahrzeuge im Fuhrpark der jeweiligen Verkehrsunternehmen bzw. b) die Fahrzeuge, die einen Großteil der Transportkapazität im Personenverkehr abbilden, untersucht werden.

Die Auswahl der Fahrzeuge ist dahingehend eingeschränkt, dass die Mindestfahrzeit von Endstation zu Endstation in einem Fahrzeug mehr als 35 Minuten betragen muss, um eine Luftkeimsammlung mit einem Volumen von mindestens 1.500 l durchzuführen. Die Alternative, eine Erhöhung des Luftflusses durch die Gelatinefilter über 50 l/min hinaus, erhöht das Risiko, den Filter zu beschädigen und die Probe unbrauchbar zu machen.

2.2 Auswahl von Stationen

Für die Luftkeimsammlung kommen die Bahnhofstypen in Betracht, bei denen aufgrund eines eingeschränkten Luftaustauschs mit der Umgebungsluft mit einer potenziellen Anreicherung von CO₂ und/oder Aerosolpartikeln gerechnet werden kann:

- oberirdischer Kopfbahnhof mit Bahnhofshalle,
- unterirdischer Durchgangsbahnhof mit Zentralbahnsteig und
- unterirdischer Durchgangsbahnhof mit Zentralbahnsteig und zwei Außenbahnsteigen.

U- und S-Bahnhöfe in München besitzen keine Lüftungsanlagen. Luftaustausch findet nur durch Konvektion statt bzw. durch die Druckschwankungen beim Ein- und Ausfahren der Züge. Im Münchener Hauptbahnhof, einem Kopfbahnhof mit Bahnhofshalle ist im Gegensatz zu einem oberirdischen Durchgangsbahnhof nicht mit einer komplett ungehinderten Durchströmung zu rechnen.

Bei oberirdischen Durchgangsbahnhöfen oder Bushaltestellen ist aufgrund des hohen Luftwechsels keine Anreicherung von potenziell virenhaltigen Aerosolpartikeln zu erwarten. Diese Bahnhofstypen werden bei der Luftkeimsammlung nicht berücksichtigt.

2.3 Auswahl der Mess- und Probenahmezeiten

Das höchste Fahrgastaufkommen ist während der Stoßzeiten am Morgen und am Nachmittag bzw. frühen Abend zu erwarten. Die Messfahrten sind möglichst in diese Zeitfenster zu legen. Die Abfahrtszeiten bzw. der Beginn der jeweiligen Luftprobenahme wird bei den Messfahrten angegeben.

2.4 Innenraumlufte

Bei der Beprobung der Innenraumlufte werden sowohl physikalisch-chemische Parameter aufgezeichnet als auch Luftproben für die Bestimmung von Virusgenom und den Nachweis der Vermehrungsfähigkeit der ggf. nachgewiesenen Viren gesammelt. Die alleinige Anwesenheit von Virusgenom, wie es durch die RT-qPCR [1, 2] nachgewiesen wird, lässt noch keine sichere Aussage über die Infektiosität und die Vermehrungsfähigkeit der Viren in der Luftprobe und damit über ein existierendes Infektionsrisiko zu. Nur vermehrungsfähige Viren sind in der Lage, Zellen zu infizieren und eine Erkrankung auszulösen.

2.4.1 Physikalisch-chemische Parameter

Folgende physikalisch-chemische Parameter werden mit direktanzeigenden Messgeräten während der Luftkeimsammlung erfasst und ausgewertet:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte,
- CO₂-Konzentration und
- Aerosolpartikel-Konzentration.

Die Dauer der Messung orientiert sich an der Dauer der Luftkeimsammlung (30 min - 2 h). Lufttemperatur und relative Luftfeuchte sind Komfort-Parameter, die CO₂-Konzentration wird als Leitwert für die Innenraumluftthygiene verwendet [3].

Das Messprogramm im Raum Braunschweig-Hannover ist im Abschnitt 3.1.3 beschrieben.

2.4.2 Molekular- und Mikrobiologie

Das primäre Ziel der Mess- und Probenahmekampagne ist es, einen ersten Überblick die Kontamination von Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs mit SARS-CoV-2 zu erhalten. Dazu sind Stichproben von häufig berührten oder der Atemluft ausgesetzten Oberflächen und die Innenraumlufte von Fahrzeugen und Einrichtungen zu beproben. Bislang sind nur zwei Arbeiten bekannt, die sich mit der Kontamination von öffentlichen Verkehrsmitteln mit SARS-CoV-2 beschäftigen [4, 5]. Um sicher zu gehen, dass die Probenahme auch tatsächlich Viren erfassen kann, werden die gesammelten Proben gleichzeitig auf SARS-CoV-2 und HAdV untersucht. HAdV ist weit verbreitet und sollte in den Proben auch dann nachweisbar sein, wenn kein SARS-CoV-2 gefunden werden kann.

Für die integrale Luftkeimsammlung stehen zwei Methoden zur Verfügung, die Sammlung direkt in einem Flüssigmedium (Impinger-Methode) und die Sammlung auf Gelatinefiltern [6]. Bei der Impinger-Methode entfallen die Auflösung des Gelatinefilters und die Suspendierung der Viren, da die Viren im Sammelmedium bereits suspendiert vorliegen. Bei der Luftkeimsammlung mit der Impinger-Methode werden die Viren allerdings einem höheren physikalischen Stress ausgesetzt als bei der Sammlung auf Gelatinefiltern, was insbesondere bei der Untersuchung auf Vermehrungsfähigkeit zu Minderbefunden führen kann. Die Luftkeimsammlung in Fahrzeugen und in stationären Einrichtungen erfolgt deshalb auf Gelatinefiltern. Bei Gelatinefiltern besteht das Risiko, dass sie bei hohen Flussraten (> 50 l/min) einreißen. Eine quantitative Luftkeimsammlung ist dann nicht mehr möglich. Beladene Gelatinefilter müssen in Pufferlösung suspendiert werden, denn die gesammelten Proben müssen für die Weiterverarbeitung als Suspension vorliegen.

Mit Ausnahme der orientierenden Messungen im ICE werden Doppelproben genommen. Ein Probensatz wird am Institut für Virologie der Technischen Universität München (TUM) untersucht; die Untersuchung des zweiten Probensatzes erfolgt am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Valley. Grundsätzlich sind Mehrfachbestimmungen sowohl bei der Beprobung von Oberflächen als auch bei der Luftkeimsammlung empfehlenswert.

An der TUM können sowohl HAdV als auch SARS-CoV-2 mittels PCR-Verfahren quantitativ bestimmt werden [7, 8]. Am IBP werden die Luft- und Wischproben quantitativ auf SARS-CoV-2 untersucht. Die Ergebnisse der RT-qPCR sind nur geeignet, Aussagen über die Anwesenheit von Virusgenom in der Luft oder auf Oberflächen zu machen. Aussagen über die Infektiosität und die Vermehrungsfähigkeit der gesammelten Viren lässt das Verfahren nicht zu.

Um die Vermehrungsfähigkeit der Viren bestimmen zu können, müssen potenzielle Wirtszellen mit den Viren inkubiert werden. Sind die Viren noch vermehrungsfähig, schädigen sie den aus den Wirtszellen bestehenden Zellrasen. Diese Schädigung ist optisch detektierbar. Beide Virusarten sind in der Lage, Menschen zu infizieren. Deshalb sind solche Untersuchungen unter Sicherheitsvorkehrungen in einem mikrobiologischen Labor der entsprechenden Sicherheitsstufe durchzuführen (HAdV: Sicherheitsstufe S2, SARS-CoV-2: Sicherheitsstufe S3 [9, 10]). Die TUM verfügt im Gegensatz zum IBP über Labore der Sicherheitsstufe S3. Deshalb werden die Virulenz-Untersuchungen [11] ausschließlich an der TUM durchgeführt.

Virulenz-Untersuchungen sind aufgrund der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen aufwändig. Deshalb werden nur die Proben einer Virulenz-Untersuchung unterzogen, die ein positives RT-qPCR-Ergebnis lieferten und bei denen die Anwesenheit von Virus-Genom festgestellt wurde.

2.5 Oberflächen

Oberflächen werden ausschließlich hinsichtlich einer möglichen Virus-Kontamination untersucht. Der Schwerpunkt der Beprobung liegt auf Oberflächen, die häufig und von vielen Personen berührt werden oder die der Ausatemluft ausgesetzt sein können. Existieren Einrichtungen in unterschiedlichen Materialausprägungen, z. B. Haltestangen aus Metall und Haltestangen mit Kunststoffbeschichtung, werden beide Typen beprobt. Die Untersuchung der Wischproben erfolgt analog zur molekular- und mikrobiologischen Untersuchung der Luftproben.

Es wird versucht möglichst Flächen mit ca. 100 cm² zu beproben. Bei Druckknöpfen (Haltewunsch, Türöffnung, Lift, etc.) oder Türdrückern ist dies aufgrund der Abmessungen nicht möglich. In diesem Fall werden diese Bedienteile als Ganzes beprobt. Das Untersuchungsergebnis ist qualitativ; es lässt ausschließlich eine Ja-Nein-Entscheidung zu.

3 Feldversuche (Messkampagne) und Ergebnisse

Die Messungen im Rahmen der Feldversuche verfolgen zwei Ziele: Im Raum Braunschweig–Hannover werden vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI Untersuchungen zur hygienischen Situation und zur Aerosoldynamik in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs durchgeführt. Dazu werden physikalische und chemische Parameter erfasst. Die Ergebnisse lassen Aussagen über die Lüftungseffizienz und die Luftqualität in den untersuchten Verkehrsmitteln zu.

Die Untersuchungen ausgehend vom Großraum München umfassen dieselben physikalisch-chemischen Parameter, allerdings in einer geringeren zeitlichen Auflösung. Der Schwerpunkt dieser Messkampagne liegt auf der stichprobenartigen Erfassung der Virenbelastung mit SARS-CoV-2 und HAdV in Fahrzeugen und stationären Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs. Die Messungen werden in Fahrzeugen durchgeführt, von denen Daten über Fahrzeugkonstruktion und Lüftungssystem zur Verfügung stehen. Die ermittelten Messwerte für die physikalisch-chemischen Parameter dienen neben der Beschreibung der hygienischen Situation der Validierung der in AP 2 entwickelten Simulationen.

Für den Fall, dass in der Luft SARS-CoV-2- und/oder HAdV-Genom nachweisbar sind, können die physikalisch-chemischen Parameter einen Anhaltspunkt z. B. für Optimierungen der Lüftungsanlagen oder deren Betrieb geben.

3.1 Aerosoldynamik, Innenraumlufthygiene und Lüftungseffizienz

3.1.1 Bedeutung der Messparameter

Bezüglich des Innenraumklimas ist der Mensch wenig anpassungsfähig, denn schon geringe Temperaturschwankungen und Luftbewegungen können bei ihm Unbehagen auslösen. Speziell das Wärmeempfinden ist abhängig von der körperlichen Aktivität, der Bekleidung, der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der Luftgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte [12]. DIN EN 12831 [13] sieht für die Aufenthaltsräume von geheizten Gebäuden 20 °C als Normtemperatur vor. Auch in Bussen und Bahnen werden daher in der Regel 20 °C bis 22 °C angestrebt, allerdings sind hier Zugerscheinungen durch das regelmäßige Öffnen von Fenstern und Türen unvermeidlich. Bei 20 °C empfinden Personen eine relative Luftfeuchte von 40 % bis 60 % im Allgemeinen als angenehm.

Hinsichtlich hygienischer Aspekte dient die CO₂-Konzentration in der Raumluft als Indikator für eine durch menschliche Tätigkeit verursachte Luftqualitätsverschlechterung. Das Konzept der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (jetzt Ausschuss für Innenraumrichtwerte AIR) [3] betrachtet CO₂-Konzentrationen kleiner 1.000 ppm (0,1 Vol-%) als hygienisch unbedenklich und CO₂-Konzentrationen größer 2.000 ppm als hygienisch inakzeptabel. Abbildung 1 zeigt komfortable (grün), akzeptable (gelb) und inakzeptable (rot) klimatische Bereiche in Abhängigkeit von Temperatur, relativer Luftfeuchte und CO₂-Konzentration [14, 15]. Das Bild bezieht sich auf Unterrichtsräume, kann aber auch auf andere Innenraumbereiche übertragen werden, in denen sich Personen dauerhaft aufhalten.

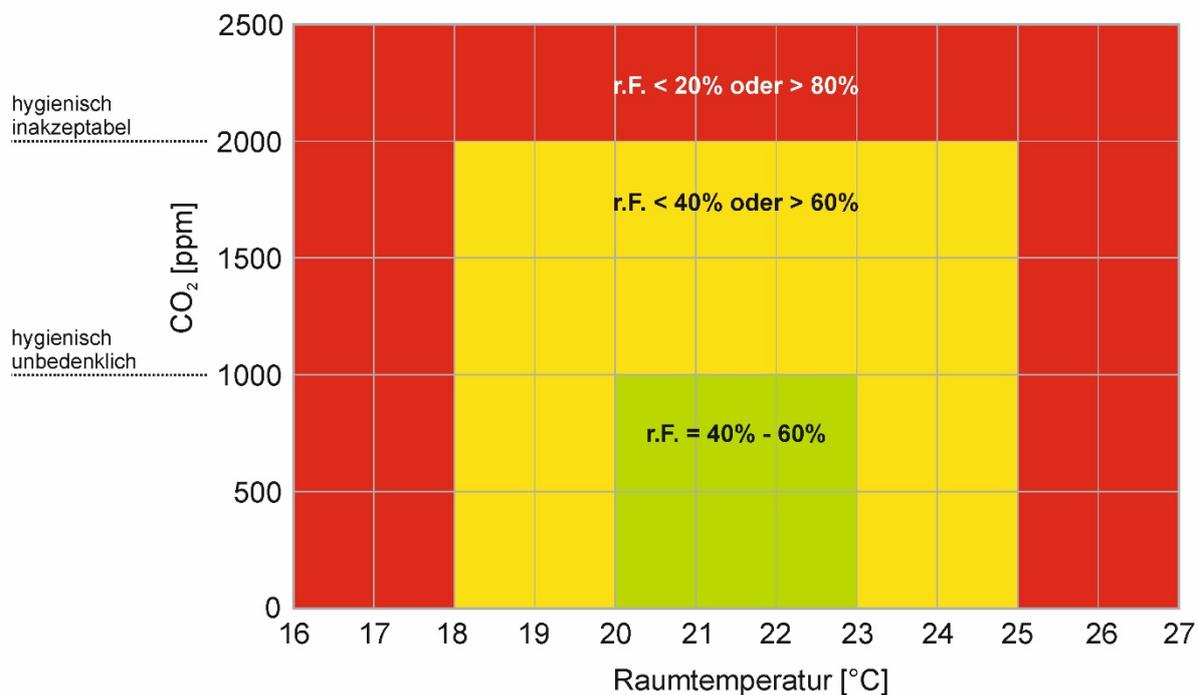


Abbildung 1: Verschiedene thermische Komfortzonen für Innenräume, wobei der gelbe Bereich hygienisch noch akzeptabel, der rote Bereich aber hygienisch inakzeptabel ist. Die Kriterien für CO₂ entsprechen dem Konzept des Ausschusses für Innenraumrichtwerte [3]. Die Abbildung wurde der Publikation von [15] entnommen.

Insbesondere in Räumen mit hoher Personenbelegung kann die CO₂-Konzentration als Anhaltspunkt für gute oder schlechte Lüftung dienen. Dies bedeutet allerdings nicht, dass eine CO₂-Konzentration kleiner 1.000 ppm grundsätzlich vor der Infektion mit SARS-CoV-2 schützt. Umgekehrt weisen aber CO₂-Konzentrationen deutlich oder dauerhaft größer als 1.000 ppm auf ein unzureichendes Lüftungsmanagement mit potenziell erhöhtem Infektionsrisiko hin [16].

Die Bestimmung der Partikelkonzentration, insbesondere PM₁₀ und PM_{2,5}, ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt zur Evaluation der Luftqualität in einem Innenraum [17, 18]. Im Personenverkehr ist die Dynamik von Partikeln durch das regelmäßige Öffnen der Türen, verbunden mit Ein- und Aussteigen, hoch. Teilweise werden die Partikel über die Außenluft eingetragen, teilweise über die Kleidung und die Bewegung der Fahrgäste [19]. Dadurch steigt die Partikelkonzentration an den Haltestellen oft deutlich an. Aus dem Abklingverhalten nach Schließen der Türen lässt sich auf die Effizienz des Lüftungssystems im jeweiligen Fahrgastraum schließen.

Für PM₁₀ und PM_{2,5} hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) Richtwerte definiert, die sich auf den Außenluftbereich beziehen [20]. Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte [21] zieht den Tagesmittelwert der WHO für PM_{2,5} von 25 µg/m³ als Beurteilungskriterium für den Innenbereich unter der Voraussetzung heran, dass die Partikelkonzentration im Innenraum maßgeblich durch Feinstäube aus der Außenluft bestimmt wird. Die Beurteilungskriterien der WHO für PM₁₀ sind 20 µg/m³ (Jahresmittelwert) und 50 µg/m³ (Tagesmittelwert).

3.1.2 Messgeräte

Zur Messung von Temperatur (T, in °C), relativer Luftfeuchte (r. F., in %) und CO₂ (in ppm) wurden ein Handmessgerät (Modell CP11 der Firma Rotronic Messgeräte GmbH) verwendet. Die zeitliche Auflösung beträgt 10 Sekunden. Die Messbereiche sind -20 °C bis +60 °C (Temperatur), 0,1 % bis 99,95 % (relative Luftfeuchte) und 0 ppm bis 5.000 ppm (CO₂).

Zur Messung der Partikelkonzentration wurde ein Optical Particle Sizer, Modell 3330 der TSI Inc., eingesetzt. Der Messbereich beträgt 0,3 µm bis 10 µm mit einer Größenauflösung von 16 Kanälen. Die zeitliche Auflösung beträgt 20 Sekunden. Das Gerät misst die Partikelanzahlkonzentration mittels Lichtstreuung. Die Umrechnung auf massenbezogene Konzentrationen erfolgt unter Annahme sphärischer Partikel und einer Dichte von 1 g/cm³.

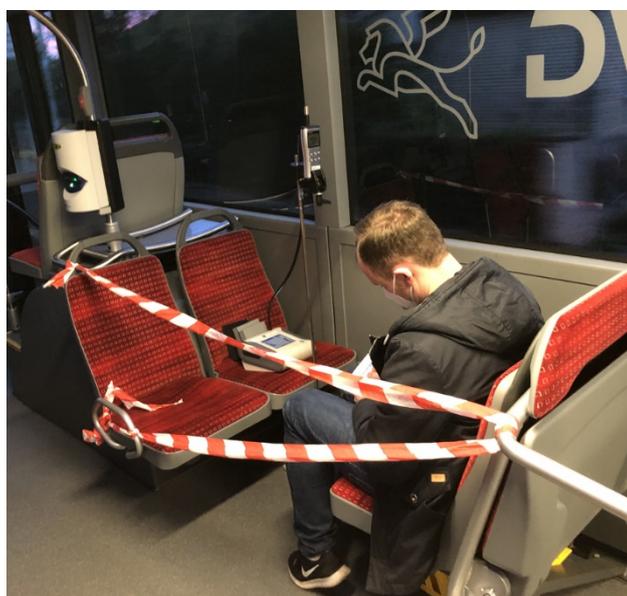


Abbildung 2: Position der Messgeräte im Linienbus 411 der BSVG am 4.12.2020, Fraunhofer WKI.

Die Messung von PM_{2,5} und PM₁₀ ist insbesondere bei expositions- und gesundheitsbezogenen Untersuchungen von Bedeutung. Da es hier lediglich um die Dynamik von Partikeln geht, wird als Messparameter „PM₁₀“ verwendet. Dies bezeichnet die massenbezogene Summe von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm, wobei für die 10 µm-Fraktion ein Abscheidegrad von 50 % zugrunde gelegt wird [22].

Soweit möglich wurde für die jeweilige Messung ein Sitzplatzbereich abgesperrt (siehe Abbildung 2). Die Probenahme erfolgte jeweils in Kopfhöhe einer sitzenden Person (ca. 1 m über dem Boden). Eine Messung der Temperatur, relativen Feuchte und Kohlendioxid wurde immer am Ort der Partikelmessung durchgeführt. Eine zweite Messung auf Temperatur, relative Feuchte und Kohlendioxid erfolgte zu Kontrollzwecken im selben Fahrgastbereich, aber je nach Gegebenheit drei bis fünf Meter von der anderen Probenahmestelle entfernt. Signifikante Unterschiede ließen sich zwischen den Messdaten nicht feststellen. Daher ist jeweils nur das Ergebnis für eine Messstelle gezeigt.

3.1.3 Messprogramm

Zu Beginn des Messprogramms wurde festgelegt, dass das Fraunhofer IBP die Messungen in den Fernzügen (ICE und IC) der Deutschen Bahn durchführt und das Fraunhofer WKI sich den orientierenden Messungen zur Aerosoldynamik auf den Regionalverkehr in Niedersachsen fokussiert. Dies geschah auch unter Berücksichtigung der pandemiebedingt mäßigen Passagierbelegung in den Fernzügen.

Nach den notwendigen Erlaubnissen der Braunschweiger Verkehrs-GmbH (BSVG), der WestfalenBahn GmbH und ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe wurden die Messungen vom Fraunhofer WKI am 27.11.2020 begonnen.

Die ursprünglich am 17.12.2020 in Fahrzeugen der BSVG geplanten Messungen konnten nach Ankündigung des verschärften Lockdowns nicht mehr durchgeführt werden. Die Messungen bei der BSVG in Braunschweig wurden am 01.03.2021 und am 04.03.2021 sowie am 09.03.2021 bei der ÜSTRA in Hannover nachgeholt.

Alle durchgeführten Messungen sind in Tabelle 17 im Anhang zusammengestellt.

Bei allen Messfahrten wurde die jeweilige Auslastung des Fahrgastbereichs protokolliert. Da im Stadtverkehr das jeweilige Fahrzeug im Minutentakt hält, wurden folgende Größenordnungen vorgegeben, die durch Ankreuzen zwischen den entsprechenden Haltestellen durch das Messpersonal anzugeben waren.

- Sitzplätze: a) nicht oder wenig belegt (< 10 %); b) vereinzelt belegt (10 % - 30 %); c) mäßig belegt (30 % - 70 %); d) dicht belegt (> 70 %).
- Stehplätze: a) nicht oder wenig belegt; b) vereinzelt belegt; c) dicht belegt.

Bei jeder Messung wurde die Belegung von jeweils zwei Personen, die sich im selben Bereich, aber an unterschiedlichen Orten (jeweils in der Wagenmitte und nahe einer Tür) befanden, protokolliert. Da die Personendichte im Bereich der Türen grundsätzlich höher war als in der Mitte, sind unterschiedliche individuelle Angaben möglich.

Zusätzlich erfolgte am 09.03.2021 eine Messung in der unterirdischen Haltestelle der Stadtbahn im Hauptbahnhof Hannover.

3.1.4 Ergebnisse der Messungen in Bussen und Bahnen der BSVG

In Abstimmung mit der BSVG wurden Linien und Fahrtzeiten ausgewählt, bei denen unter den gegebenen Umständen mit einer hohen Personenauslastung zu rechnen war, jeweils am frühen Vormittag oder am Nachmittag.

Abbildung 43 im Anhang zeigt das Liniennetz der BSVG im Stadtbereich Braunschweig.

3.1.4.1 Messungen vormittags (Buslinie 411 und Straßenbahnlinie 3)

Die Untersuchungen in der Buslinie 411 (Gelenkbusse, Mercedes, Fahrzeuge Nr. 2004 und 2001) und der Straßenbahnlinie 3 (Straßenino, Fahrzeug Nr. 1953) wurden jeweils am frühen Morgen durchgeführt. Es handelte sich in beiden Fällen um moderne und klimatisierte Fahrzeuge. Die Messungen erfolgten von Anfangs- bis Endstation und zurück. Auf der Hinfahrt waren Bus (04.12.2020) und Bahn (08.12.2020) auf Teilstrecken dicht mit Schülerinnen und Schülern belegt. Gemessen wurden Temperatur (2 Messstellen), relative Luftfeuchte (2 Messstellen), CO₂ (2 Messstellen) und Partikel

(1 Messstelle). In beiden Fahrzeugen waren die Temperaturen durch die Klimatisierung der Fahrzeuge konstant (siehe Abbildung 3). Der Temperatureinbruch bzw. Feuchteanstieg im Bus (411) gegen 08:00 Uhr resultiert vom längerfristigen Öffnen der Türen bei Erreichen der Endstation.

Die Belegungsichte lässt sich insbesondere anhand der CO₂-Konzentration gut nachvollziehen. Maximalwerte wurden in Bus und Bahn bereits kurz nach Abfahrt von der Anfangsstation erreicht, als die Belegungsichte mit Schülerinnen und Schülern 70 % oder höher war (Abbildung 4). Die Belegungsichte insgesamt war dann 70 % oder höher. Die Maximalwerte der CO₂-Konzentration lagen im Bereich von 800 ppm – 1.000 ppm. Es war jeweils eine Abhängigkeit der CO₂-Konzentration zur Position der Messstelle (Personendichte, Nähe zur Tür etc.) zu beobachten. Es ist festzustellen, dass Bus und Bahn jeweils über ein effizientes Lüftungssystem verfügen, was die CO₂-Konzentration auf niedrigem Niveau hält und daher auch zu einer Senkung des Infektionsrisikos beitragen dürfte.

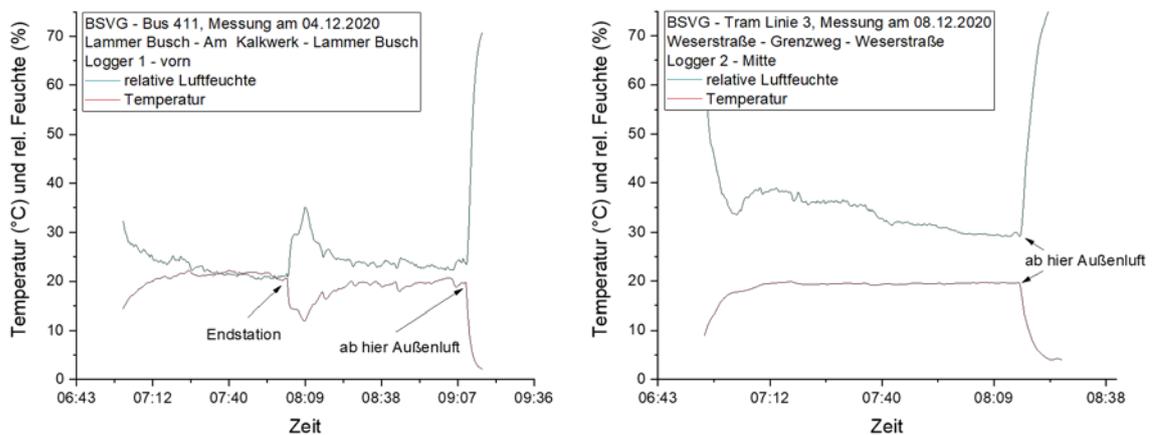


Abbildung 3: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.

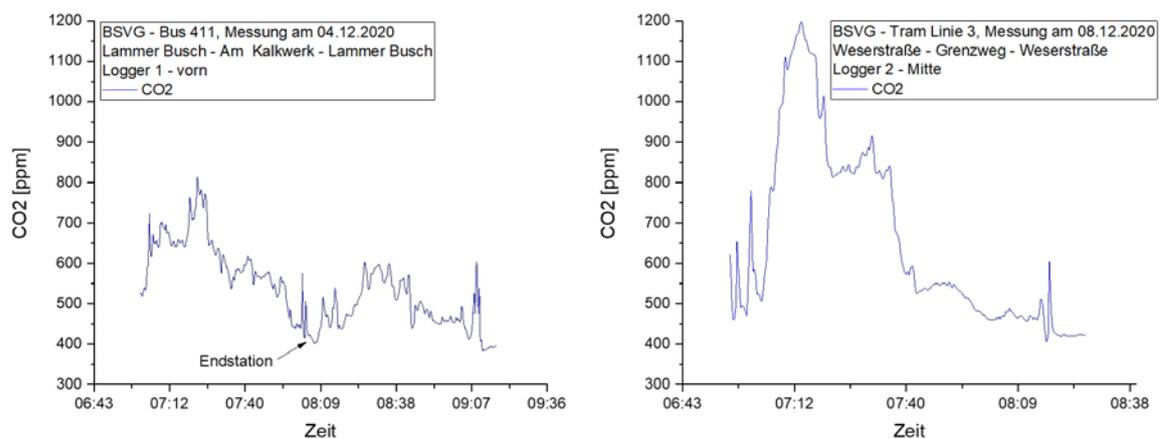


Abbildung 4: Zeitliche Profile der CO₂-Konzentrationen bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.

An diversen Haltestellen wurden bei den Ein- und Aussteigevorgängen erhöhte Partikelkonzentrationen (PM₁₀) beobachtet (siehe Abbildung 5). Ursächlich hierfür ist die Dynamik der Fahrgäste. Es ist bekannt, dass in Bewegung befindliche Personen relevante Partikelquellen sind bzw. Partikel resuspendieren. Für die Außenluft liegen Informationen der beiden Braunschweiger Messstationen DENI011 und DENI075 vor. Die für die Messtage am 04.12.2020 und 08.12.2020 publizierten PM₁₀-Stundenmittel waren aber deutlich geringer als die Konzentrationen in den Fahrzeugen. Mit Sicherheit ist die Atmung der Fahrgäste nicht Quelle der Partikel. Die Konzentrationsspitzen der Partikel treten nur sehr kurzfristig auf und erreichen innerhalb weniger Sekunden wieder Basisniveau. Auch diese Beobachtung spricht für sehr effiziente Lüftungssysteme in den untersuchten Fahrzeugen.

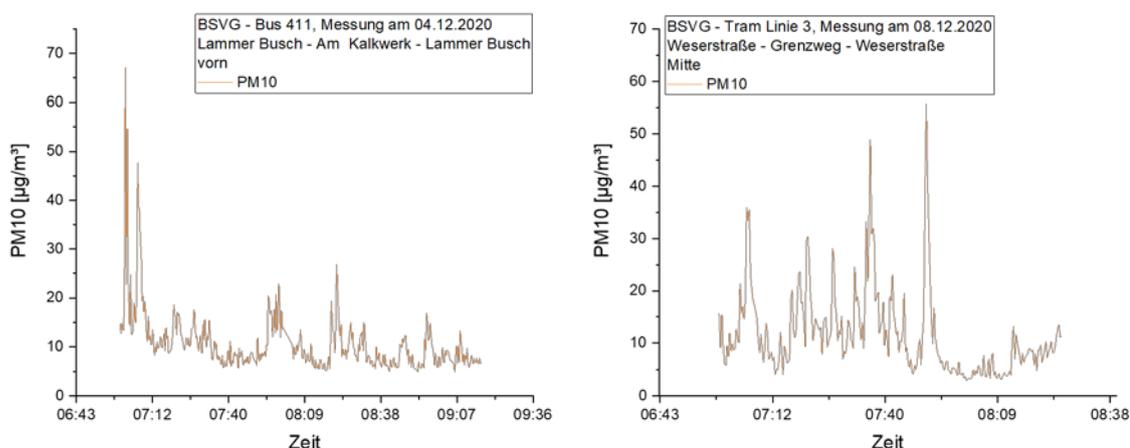


Abbildung 5: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.

3.1.4.2 Messungen nachmittags (Straßenbahnlinie 10 und Ringbuslinie 419)

Die Untersuchungen in der Straßenbahnlinie 10 (Gelenktriebwagen NGT8D, Baujahr 2007, Fahrzeug Nr. 0759) und in der Buslinie 419 (Mercedes Benz Citaro, Baujahr 2009, Fahrzeug Nr. 0903) wurden jeweils zur Hauptverkehrszeit am Nachmittag durchgeführt. Es handelte sich in beiden Fällen um klimatisierte Fahrzeuge. Die Messungen erfolgten bei der Straßenbahnlinie 10 von Anfangs- bis Endstation und zurück (2x) bzw. beim Ringbus 419 über die gesamte Fahrtstrecke (3x).

Die Ergebnisse waren analog zu den jeweiligen Vormittagsmessungen am 04.12.2020 und am 08.12.2020.

Die Personenbelegung war wiederum sehr unterschiedlich. Die höchsten Belegungsichten (dichte Sitzplatzbelegung mit mehr als 70 % und dichte Stehplatzbelegung) wurden in der Straßenbahnlinie 10 am 01.03.2021 zwischen 16:33 Uhr und 16:44 Uhr registriert. Ansonsten schwankte die Belegung zwischen vereinzelt (10 % - 30 %) und mäßig (30 % - 70 %). In der Buslinie 419 am 04.03.2021 wurde maximal eine mäßige Belegung erreicht.

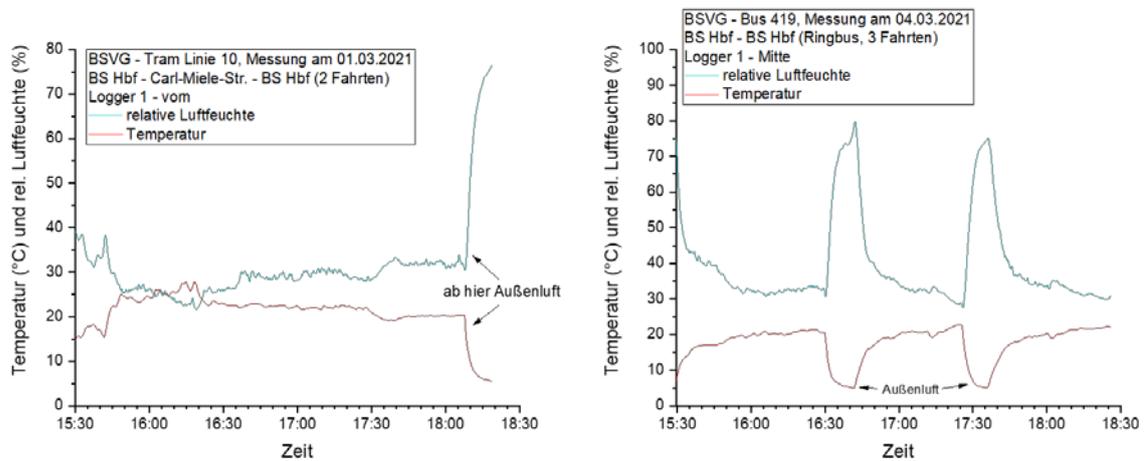


Abbildung 6: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG.

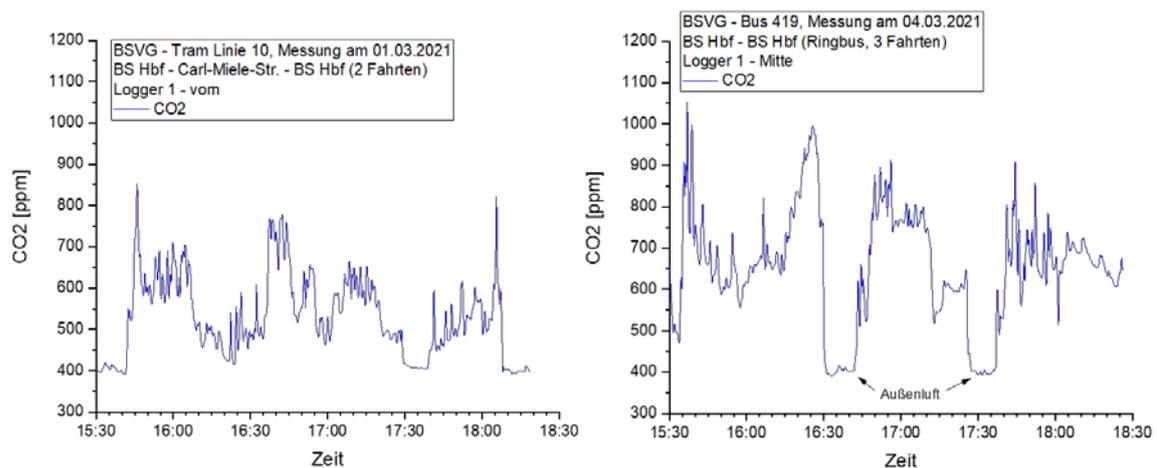


Abbildung 7: Zeitliche Profile der CO₂-Konzentrationen bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 6 bis Abbildung 8 gezeigt. Die Temperatur im Fahrgastbereich der Straßenbahn 10 lag anfangs bei 28 °C bis 29 °C, regelte sich dann aber auf ca. 20 °C ein. Die relative Luftfeuchte lag im Bereich von 30 %. Unter Berücksichtigung der geringen Außentemperaturen von ca. 5 °C und durch den hohen Luftaustausch beim häufigen Öffnen der Türen ist dies ein sehr akzeptabler Wert. Die Maximalwerte der CO₂-Konzentration lagen auch bei diesen Messungen im Bereich von 800 ppm bis 1.000 ppm und sind damit unter lufthygienischen Aspekten als einwandfrei zu bezeichnen.

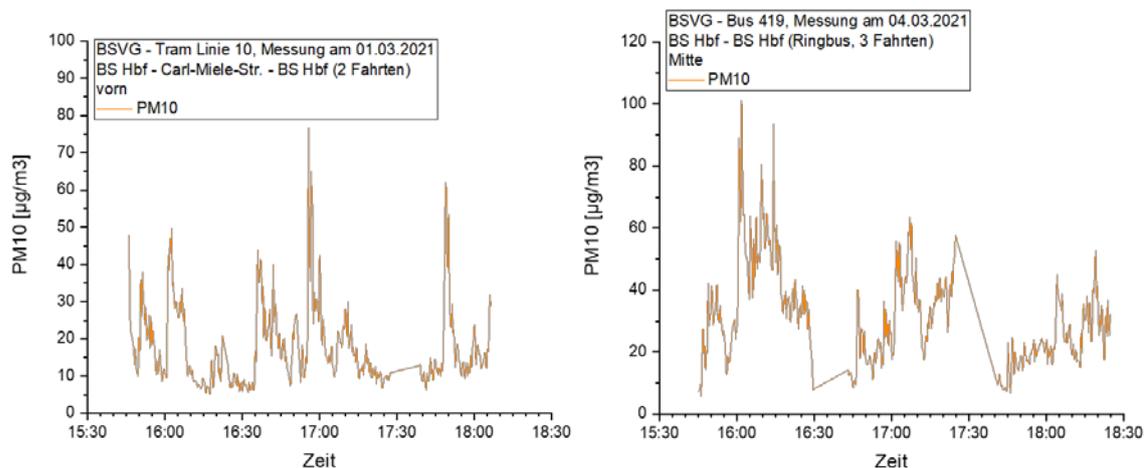


Abbildung 8: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG.

Die Partikelkonzentrationen fluktuieren wiederum sehr stark und sind deutlich mit der Personendynamik und dem Personenverhalten verknüpft. An der Haltestation von Ringbus 419 am Hauptbahnhof Braunschweig befanden sich beispielsweise die Raucherbereiche in direkter Nähe zu den Bustüren. Für die Außenluft liegen Informationen der beiden Braunschweiger Messstationen DENI011 und DENI075 vor. Die für die Messstage am 01.03.2021 und 04.03.2021 publizierten PM_{10} -Stundenmittel waren mit $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich geringer als die Konzentrationen in den Fahrzeugen. Dies korrespondiert auch mit den jeweiligen Außenluftmessungen an Stationen der Linien 10 und 419.

3.1.5 Ergebnisse der Messungen in der WestfalenBahn

Es wurde die Strecke zwischen Braunschweig und Hannover (und retour) befahren (siehe Abbildung 9). Die erste Messreihe erfolgte am frühen Vormittag, die zweite am Nachmittag. Das Fahrzeug war ein elektrischer Doppelstocktriebzug „KISS“ der Firma Stadler (Baureihenbezeichnung 445). Alle Messungen erfolgten in der 2. Klasse, untere Ebene. Ein Messplatz (mit Partikelmessgerät) befand sich jeweils in der Mitte des Wagens, ein zweiter in der Nähe einer Tür.

Die Auslastung der Bahn war trotz Berufsverkehr mäßig. Bei Abfahrt des Zugs in Braunschweig war die Belegung der Sitzplätze im Bereich von 20 %. Die Belegung erhöhte sich mit den nachfolgenden Haltestellen nur langsam. Lediglich zwischen Lehrte und Hannover (ca. 06:45 Uhr – 07:00 Uhr) war die Personendichte hoch. In diesem Abschnitt waren auch erstmals Stehplätze belegt. In umgekehrter Fahrtrichtung (Vormittag) nahm die Personenbelegung kontinuierlich ab. Auch bei den Messungen im Berufsverkehr am Nachmittag war das Personenaufkommen nicht besonders hoch. Die Sitzplätze waren nur vereinzelt belegt ($< 30 \%$), die Stehplätze gar nicht oder maximal standen kurzfristig ein bis zwei Personen.

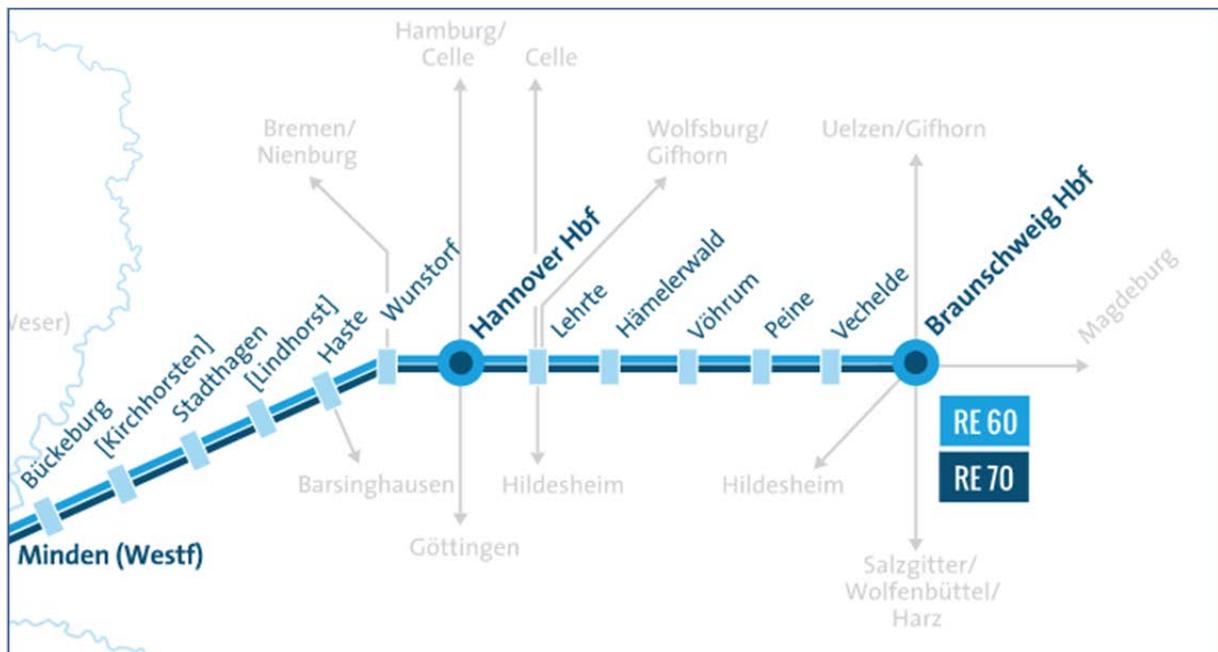


Abbildung 9: Liniennetzplan der WestfalenBahn (Ausschnitt). Messungen erfolgten am 08.12.2020 auf der Strecke zwischen Braunschweig und Hannover.

Bei allen Fahrten war die Temperatur sehr konstant im Bereich zwischen 20 °C und 22 °C. Auch die relative Luftfeuchte war mit 31 % bis 33 % in einem Bereich, den Personen in der Regel nicht als unangenehm empfinden (Abbildung 10, links). Die starken und plötzlichen Konzentrationsunterschiede erklären sich durch das Ein- und Aussteigen.

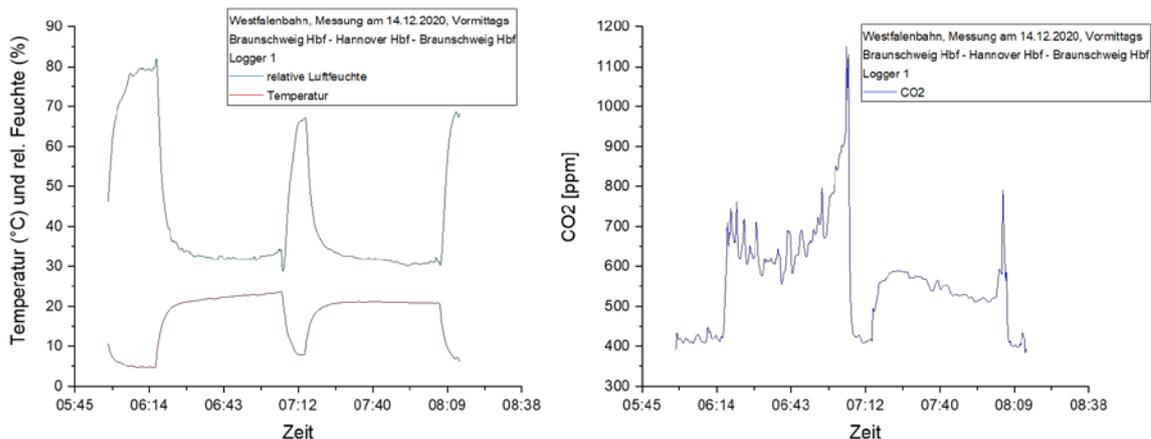


Abbildung 10: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte und CO₂ bei Messungen in der WestfalenBahn (14.12.2020, Vormittag) auf der Strecke Braunschweig – Hannover – Braunschweig.

Die CO₂-Konzentration stieg auch bei hoher Personenbelegung nur kurzfristig auf ca. 1.150 ppm (Abbildung 10, rechts). Die Partikelkonzentration (siehe Abbildung 11) stieg in diesem Zeitraum an (von < 10 µg/m³ auf > 30 µg/m³), blieb allerdings insgesamt gesehen gering. Der starke plötzliche Anstieg gegen 06:55 Uhr (Abbildung 11, links) resultiert aus dem erhöhten Personenaufkommen beim Halt in Lehrte. Die Außenluftkonzentrationen an PM₁₀ wurden auf dem Bahnsteig 5 des Braunschweiger Hauptbahnhofs bestimmt (14.12.2020, Vormittag und Nachmittag). Die Werte lagen jeweils unterhalb von 10 µg/m³, was in guter Übereinstimmung mit den Daten der Braunschweiger Messstationen (DENI011 und DENI075) ist.

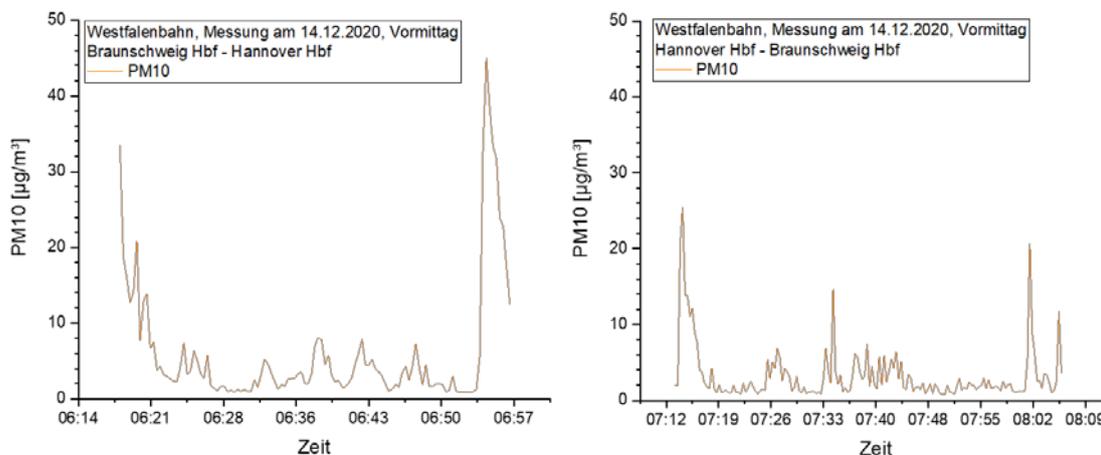


Abbildung 11: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der WestfalenBahn (14.12.2020, Vormittag) auf der Strecke Braunschweig – Hannover (links) und Hannover – Braunschweig (rechts).

Die Messungen in der WestfalenBahn am Nachmittag des 14.12.2020 brachten gegenüber den Messungen am Vormittag keine neuen Erkenntnisse. Die Kohlendioxidkonzentrationen lagen kontinuierlich unter dem Wert von 1.000 ppm. Allerdings war die Personenbelegung deutlich geringer als am Vormittag. Die Messungen am Nachmittag sind hinsichtlich der hier diskutierten Fragestellungen nicht repräsentativ und werden daher nicht thematisiert.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der in diesem Abschnitt diskutierten Messungen, dass die Fahrgastbereiche der WestfalenBahn über sehr effiziente Belüftungssysteme verfügen, die gleichzeitig für die Einstellung konstanter Temperaturen und relativer Luftfeuchten in Bereichen sorgen, die für das thermische Empfinden des Menschen angenehm sind.

3.1.6 Ergebnisse von Messungen in Fahrzeugen der ÜSTRA

Die Untersuchungen erfolgten am 09.03.2021. Für den frühen Morgen wurde die Stadtbahnlinie 4 ausgewählt (siehe Abbildung 44 im Anhang). Am Vormittag erfolgten Messungen in der Regiobuslinie 500 (siehe Abbildung 45 im Anhang) und in der unterirdischen Haltestelle der Stadtbahn am Hauptbahnhof. Zur Hauptverkehrszeit am Nachmittag erfolgten dann nochmals Messungen in der Stadtbahnlinie 4.

Die Ergebnisse der Messungen in der Stadtbahnlinie 4 sind in Abbildung 12 bis Abbildung 14 dargestellt. Bis auf den Umstand, dass die Temperaturen in den Fahrgastbereichen mit ca. 17 °C bis 19 °C etwas kühler und die relativen Luftfeuchten mit ca. 40 % etwas höher waren als in den Fahrzeugen der BSVG und der WestfalenBahn, waren die Ergebnisse vergleichbar und werden hier nicht noch einmal einzeln diskutiert.

Die gemessenen Außenluftkonzentrationen an PM10 lagen wiederum bei 10 µg/m³ oder darunter und entsprechen den am Messstag abgerufenen Werten der Stationen DENI048 und DENI054.

Die Personenbelegung war ähnlich wie bei BSVG und WestfalenBahn. In den meisten Fällen war die Stadtbahn mäßig belegt, im Innenstadtbereich sowohl am Vormittag als auch am Nachmittag dicht belegt.

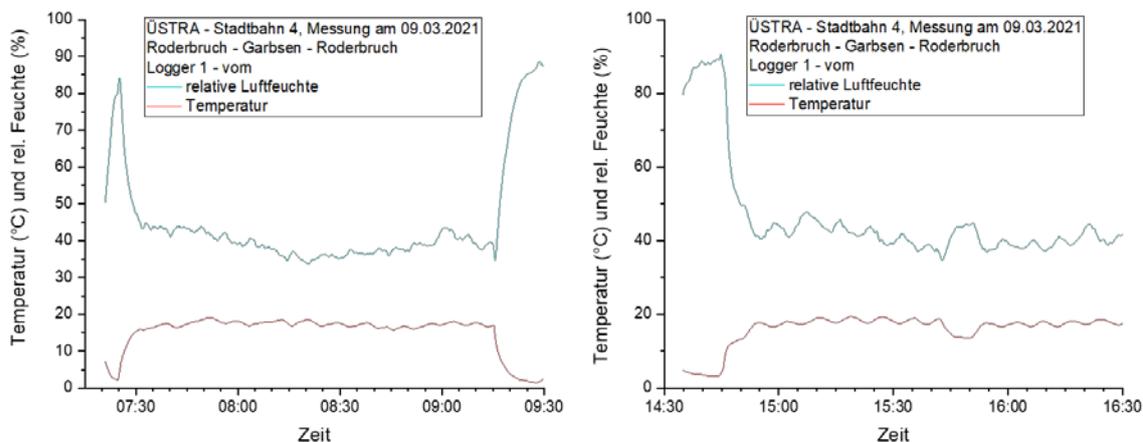


Abbildung 12: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).

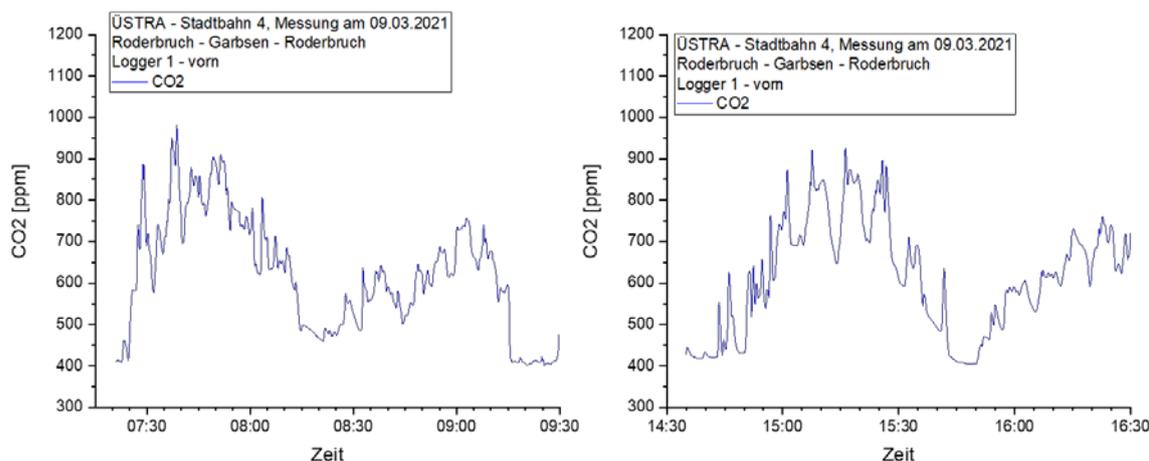


Abbildung 13: Zeitliche Profile der CO₂-Konzentrationen bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).

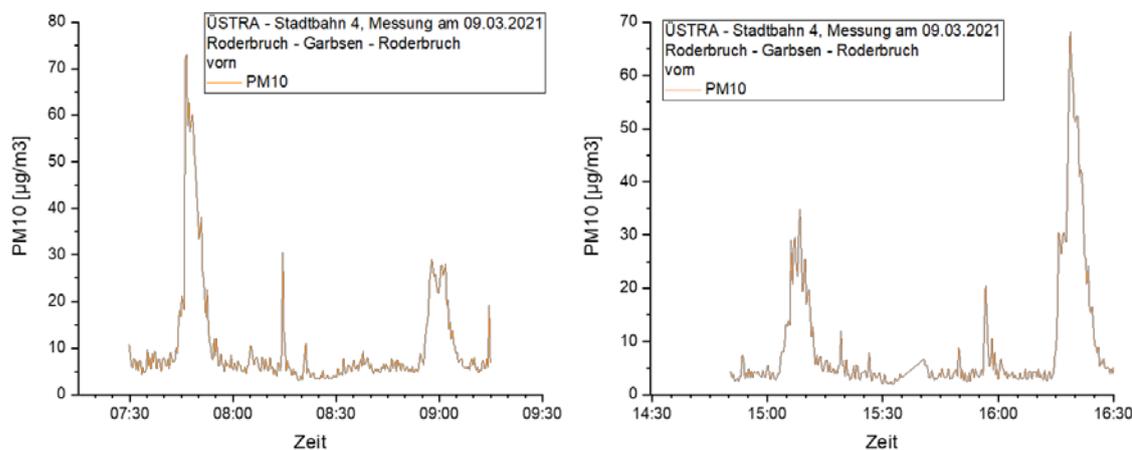


Abbildung 14: Zeitliche Profile der Partikelkonzentration bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).

Der Regiobus 500 war meist mäßig belegt, dichtes Personenaufkommen war lediglich zwischen 10:46 Uhr und 10:50 Uhr zu verzeichnen. Die klimatischen Daten und CO₂-Konzentrationen (siehe Abbildung 15) waren analog zu den früheren Messungen. Im Gegensatz zu allen anderen Untersuchungen war bei den Regiobusmessungen auffällig, dass keine Konzentrationsspitzen an PM₁₀ zu verzeichnen waren (siehe Abbildung 15), obwohl der Bus häufig Haltestellen anfuhr.

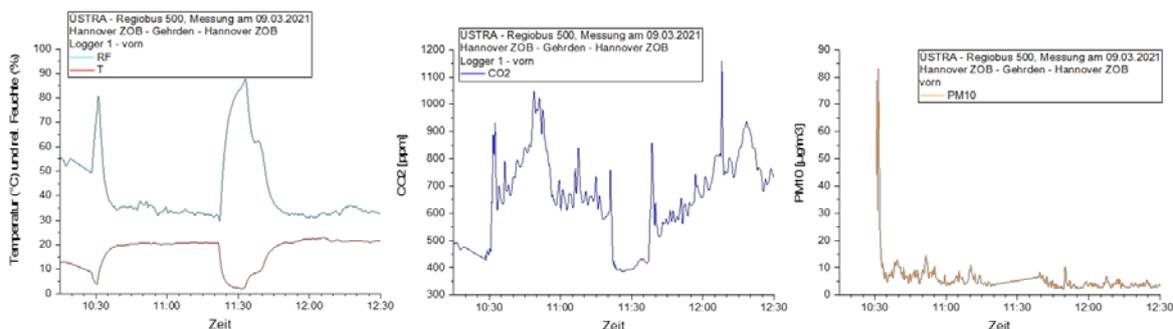


Abbildung 15: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte, CO₂ und Partikelkonzentration bei Messungen in der Regiobuslinie 500 der ÜSTRA (09.03.2021, Vormittag).

In Abbildung 16 sind die Messdaten an der unterirdischen Haltestelle der Stadtbahn gezeigt. Die Temperatur liegt bei ca. 12 °C, was zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte auf ca. 55 % führt. Die CO₂-Konzentration war zu keinem Zeitpunkt höher als 550 ppm, was auf eine effektive Lüftung hindeutet. Die Partikelkonzentration lag konstant bei ca. 50 µg/m³. Dies ist durch die hohe Dynamik auf unterirdischen Bahnhöfen bedingt.

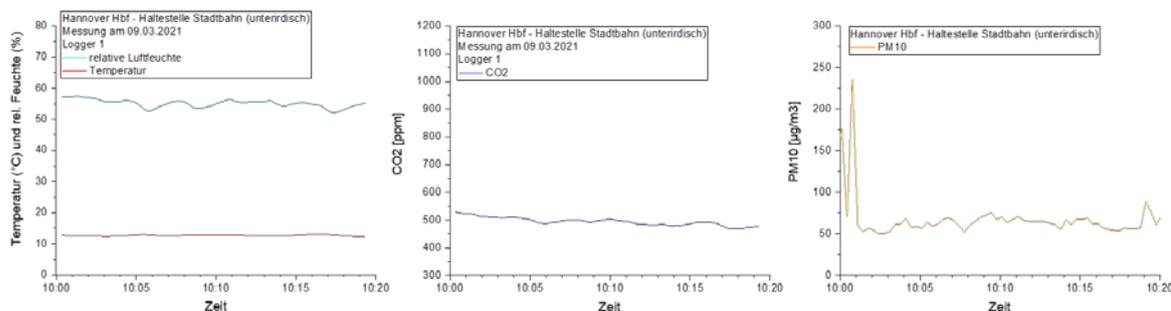


Abbildung 16: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte, CO₂ und Partikelkonzentration bei Messungen in der unterirdischen Haltestelle der Stadtbahn am Hauptbahnhof Hannover (09.03.2021, Vormittag).

3.1.7 Zusammenfassende Beurteilung

Es wurden auf insgesamt 21 Strecken im Raum Braunschweig–Hannover Messungen in Fahrgastbereichen von Bussen und Bahnen der BSVG, der WestfalenBahn und der ÜSTRA vorgenommen. Dabei wurde jeweils die Temperatur, die relative Luftfeuchte, die Kohlendioxidkonzentration und die Partikelkonzentration mit hoher Zeitauflösung registriert. Bei der Partikelmessung wurde ein zählendes Verfahren eingesetzt. Bei der Auswertung der Messdaten hat es sich als sinnvoll erwiesen, die rechnerisch bestimmte PM₁₀-Konzentration als Parameter zu verwenden.

Unabhängig vom Verkehrsmittel (Stadtbus, Regiobus, Straßenbahn, Stadtbahn, Regionalbahn) waren die Ergebnisse weitgehend übereinstimmend. Die Temperaturen und relativen Luftfeuchten lagen größtenteils in einem für die Fahrgäste angenehmen Bereich. Der wichtigste Parameter bei diesen Messungen war das von den Fahrgästen exhalierete CO₂, da dieser Parameter direkt mit der Atmung und der Anzahl der Fahrgäste korreliert. Die aus hygienischen Gründen empfohlene Konzentration von weniger als

1.000 ppm wurde auch bei hoher Personenbelegung in allen Fahrzeugen im Mittel eingehalten und meist deutlich unterschritten. In wenigen Fällen stiegen die Werte kurzzeitig auf maximal 1.200 ppm. Dies liegt allerdings immer noch deutlich unterhalb der Schwelle von 2.000 ppm zur hygienisch inakzeptablen Konzentration. Die Partikelkonzentration variierte im Wesentlichen mit dem Ein- und Aussteigen der Fahrgäste. Menschen, die sich in Bewegung befinden, erhöhen die Partikelkonzentration in ihrer Umgebung. Dazu kommen lokale Außenluftquellen, wie z. B. Baustellen und Raucherbereiche. Wesentlich ist, dass die Partikelkonzentration in den Fahrgastbereichen nicht durch die Atmung der anwesenden Personen bedingt war. Darüber hinaus nahmen die Partikelkonzentrationen nach dem Schließen der Türen schnell ab und erreichten oft bereits nach kurzer Zeit Außenluftniveau.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Lüftungssysteme in den untersuchten Fahrzeugen effizient arbeiten. Exhalierendes CO₂ und Partikel werden innerhalb kurzer Zeit aus der Raumluft entfernt. Analog mindert dies auch die Konzentration von Bioaerosolen, also z. B. SARS-CoV-2-Viren, in den Fahrgastbereichen. Bei guten Lüftungsbedingungen (CO₂-Konzentrationen < 1.000 ppm) und gleichzeitiger Einhaltung der Hygieneregeln (Abstand, Maskentragen, Desinfektion) ist nicht von einem erhöhten Infektionsrisiko in den Innenräumen auszugehen [16]. Dies gilt analog für den öffentlichen Personenverkehr. Es wird generell empfohlen, unter den gegenwärtigen Bedingungen in den Fahrzeugen vorhandene Lüftungssysteme mit hohem Luftdurchsatz und hohem Frischluftanteil zu betreiben, da sich ansonsten das Ansteckungsrisiko unnötig erhöhen würde. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommen [5] auf der Basis von Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln der Stadt Barcelona.

3.2 Luftkeimsammlung und ergänzende physikalisch-chemische Parameter

3.2.1 Einleitung

Relative Luftfeuchte, Temperatur, Aerosolpartikel- und CO₂-Konzentration sind Parameter, die zur Beurteilung von Komfort und Hygiene in Innenräumen herangezogen werden. Sie lassen aber noch keine Aussage über die tatsächlich in der Luft von Fahrzeugen und stationären Einrichtungen vorherrschende Virenbelastung zu. Von Interesse ist die Fragestellung, ob erhöhte Aerosolpartikelanzahl- und CO₂-Konzentrationen überhaupt mit höheren Virenanzahlen (HAdV und/oder SARS-CoV-2) einhergehen. Deshalb werden die Luftkeimmessungen und die Beprobung von Oberflächen um die Erfassung physikalisch-chemischer Parameter ergänzt. Die CO₂-Konzentration lässt Aussagen über die Lüftungseffizienz und die hygienische Situation in den Fahrzeugen und stationären Einrichtungen zu. Sie wird zudem für die Validierung der Modelle und Simulationen aus AP 2 (Teil C) benötigt.

Stabilität und Vermehrungsfähigkeit von Viren sind u. a. von den Klimabedingungen abhängig. Die Aufzeichnung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte lassen Aussagen darüber zu, ob die in den Fahrzeugen und stationären Einrichtungen herrschenden klimatischen Bedingungen für die Stabilität des Virus eher förderlich sind oder nicht.

Eine mögliche Oberflächenkontamination mit Viren kann mit physikalisch-chemischen Parametern nicht abgeschätzt werden. Es kann jedoch angenommen werden, dass es bei einer entsprechenden Virenkonzentration in der Luft auch zu einer Sedimentation virushaltiger Aerosole auf Oberflächen kommt.

3.2.2 Parameter

Die in den Fahrzeugen und stationären Einrichtungen aufgezeichneten physikalisch-chemischen Parameter und die durchgeführten Probenahmen sind in Tabelle 18 im Anhang zusammengefasst. Die physikalisch-chemischen Parameter umfassen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, CO₂-Konzentration und die Partikelanzahlkonzentration (PM_{0,5} und PM₁₀). Sowohl die Luftkeimsammlung als auch die Entnahme von Wischproben stellen integrierende Verfahren ohne Zeitauflösung dar.

3.2.3 Mess- und Probenahmegeräte

Die verwendeten direktanzeigenden und registrierenden Messgeräte sind in Tabelle 19 zusammengefasst, die für die Probenahme verwendeten Verbrauchsmaterialien finden sich in Tabelle 20 jeweils im Anhang.

Die Swab-Kits, also die Kombination aus Swab, Schraubdeckel- und Zentrifugenröhrchen sowie Zellkulturmedium für die Beprobung von Oberflächen wurden am IBP unter sterilen Bedingungen zusammengestellt. Alle Bestandteile wurden steril verwendet, bzw. autoklaviert und unter sterilen Randbedingungen in einer Sterilwerkbank kombiniert. Die Schraubdeckel-Röhrchen wurden mit 600 µl Zellkulturmedium befüllt. Anschließend wurden die autoklavierten Swabs unter sterilen Randbedingungen mittels einer zuvor sterilisierten Drahtschere auf die erforderliche Länge gekürzt und in die vorbereiteten, autoklavierten Zentrifugenröhrchen gegeben. Schließlich wurden die befüllten Schraubdeckelröhrchen dazugegeben und die Zentrifugenröhrchen verschlossen. Die fertigen Swab-Kits wurden bis zur Verwendung gekühlt (4 °C) aufbewahrt.

Die Analyse hinsichtlich SARS-CoV-2 sowohl der gesammelten Luftproben als auch der Wischproben erfolgte mittels RT-qPCR. Die verwendeten Gerätschaften, Verbrauchsmaterialien und die Auswertesoftware sind im Anhang in Tabelle 21 zusammengefasst.

3.2.4 Mess- und Probenahmeprogramm

Die Mess- und Probenahmekampagne ausgehend vom Großraum München fand in der Zeit vom 30.11.2020 bis 27.01.2021 statt.

Bereits zu Beginn der Messkampagne galt flächendeckend die Verpflichtung zum Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung (MNB) sowohl im Personenfern- als auch im Nahverkehr; gleiches galt für Bahnhöfe und Haltestellen. Seit dem 18.01.2021 ist das Tragen von FFP2- oder gleichwertigen Masken für die Fahrgäste des Personennahverkehrs in Bayern verpflichtend vorgeschrieben. Gleiches gilt für den Aufenthalt auf Bahnhöfen, an Haltestellen und in Einzelhandelsgeschäften.

Um die Konzentration von Viren in der Raumluft der untersuchten Fahrzeuge bzw. in der Luft des Wartebereiches von Gleisanlagen zu erfassen, wurde eine Luftkeimsammlung nach dem Filtrationsprinzip analog [6] durchgeführt. In [6] sind Erfassung, Bestimmung und Zählung luftgetragener Verbreitungseinheiten von Pilzen und aeroben Bakterien beschrieben. Bei der Verwendung von Gelatinefiltern eignet sich die Methodik auch zur Erfassung von luftgetragenen Viren, da die Gelatinefilter auch Viren zurückhalten und Gelatine eine besonders schonende Umgebung für Viruspartikel darstellt, womit der Sammelverlust minimiert wird [23, 24].

Die Luftkeimsammelgeräte mit Filteraufsatz und Gelatinefiltern wurden bei einem Fluss von 50 l/min betrieben. Die Probenahmehöhe orientierte sich an den Gegebenheiten in den jeweiligen Fahrzeugen

und Bahnhöfen. Sie lag zwischen 0,7 m und 1 m. Da aufgrund der geringen Besetzung der Verkehrsmittel und der bereits bei der orientierenden Messfahrt von München Hbf. nach Erfurt Hbf. und zurück am 30.11.2020 geltenden Pflicht zum Tragen einer MNB im öffentlichen Personenverkehr keine hohen Konzentrationen an virushaltigen Aerosolpartikeln mehr zu erwarten waren, wurden Probenvolumina gewählt, die deutlich über denen liegen, die üblicherweise für die Untersuchung von Innenraumluft gesammelt werden. Die Sammeldauer wurde auf mindestens 30 min festgelegt, was einem Luftvolumen von 1.500 l entspricht. Als Filter wurden Pyrogen- und RNase-freie Gelatinefilter (Sartorius GmbH, Göttingen) verwendet. Diese haben sich als besonders schonend für die Sammlung luftgetragener Viren erwiesen [23, 24]. Nach den Probenahmen wurden die beaufschlagten Filter steril verpackt und anschließend im Labor bis zur weiteren Verarbeitung bei -78 °C eingefroren, um keine Nukleinsäuren durch enzymatischen Abbau zu verlieren.

Die registrierenden bzw. direktanzeigenden Messgeräte CP11 und Trolley V2 wurden mit einer Frequenz von 2 Messpunkten/min betrieben. Die Partikelanzahl-Konzentration wird vom Trolley V2 wie folgt angegeben: Die Partikelfraktion PM₁₀ umfasst alle Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner oder gleich 10 µm, die Partikelfraktion PM_{0,5} alle Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner oder gleich 0,5 µm.

Um einen Überblick zu erhalten, inwieweit Oberflächen, die häufig berührt werden oder die in Kontakt mit der Ausatemluft stehen können, mit Viruseinheiten kontaminiert sind, wurden mit den vorbereiteten Swab-Kits stichprobenartig Keimabstriche vorgenommen. Die Swabs wurden den Kits entnommen und mit Zellkulturmedium befeuchtet. Mit den befeuchteten Swabs wurden dann bestimmte Areale der zu beprobenden Oberfläche abgestrichen. Wenn möglich wurde dabei eine Oberfläche von 10 mal 10 cm² dicht kreuzweise beprobt; bei Druckknöpfen (Haltewunsch, Türöffner) wurde eine etwas kleinere Gesamtfläche, das heißt die gesamte Druckknopfoberfläche beprobt. Anschließend wurden die Swab-Spitzen für ca. 1 min in der Zellkulturflüssigkeit der Schraubdeckelröhrchen gedreht, damit sich die abgenommenen Keime in der Flüssigkeit ausreichend suspendieren. Der Abstrich erfolgte analog zu [25]. Abweichend vom Normverfahren wurden die anhaftenden Keime anschließend suspendiert. Die gebrauchten Swabs wurden hygienisch verpackt, im Labor sterilisiert und anschließend entsorgt.

Die Keimsuspensionen wurde nach den Probenahmen im Labor bis zur weiteren Verarbeitung bei -78 °C eingefroren. Da die Baumwollfaserbeschichtung der Swabs unterschiedliche Flüssigkeitsvolumina aufnehmen, ergaben sich unterschiedliche Volumina an Keimsuspensionen. Das für die weitere Bearbeitung benötigte Mindestvolumen von 200 µl wurde bei jeder Probenahme erreicht.

3.2.5 Fahrzeuge

Die Messungen und Probenahmen in Fahrzeugen umfassten Fahrzeuge des Fern-, Regional-, Nah- und innerstädtischen Verkehrs. Auf jeder Messfahrt wurden sowohl physikalisch-chemische Parameter mittels registrierender Messgeräte aufgezeichnet als auch Luft- und Wischproben genommen, die in den mikrobiologischen Laboren der TUM und des IBP ausgewertet wurden.

Oberflächen in Fahrzeugen, die potenziell kontaminiert sein können, umfassten

- Fahrkartenautomaten,
- Entwerter,
- Haltestangen,
- Druckknöpfe zur Signalisierung eines Haltewunschs,
- Druckknöpfe zum Öffnen von Türen,
- Türgriffe und Spiegel in den Zugtoiletten,
- Ober- und Unterseiten von Klappischen an den Rückseiten der Sitzlehnen, sowie
- Fensterscheiben.

3.2.5.1 ICE 3 und ICE 4

Zur Festlegung der Messparameter, zur Überprüfung der Tauglichkeit der ausgewählten Mess- und Probenahmegeräte und zur Etablierung des Extraktions- und PCR-Verfahrens an der TUM erfolgte am 30.11.2020 eine orientierende Messfahrt von München Hbf. nach Erfurt Hbf. und zurück. Die in diesem Rahmen durchgeführten Probenahmen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Es wurden auf jeder Strecke drei unterschiedliche Luftvolumina über die Gelatinefilter gezogen. Die Probenahmen wurden auf jeder Strecke gleichzeitig gestartet. Gezogen wurden 1.500, 3.000 und 6.000 l Innenraumluft. Der Fluss über die Gelatinefilter betrug 50 l/min.

TABELLE 1: ORIENTIERENDE MESSUNG IN FAHRZEUGEN DES FERNVERKEHRS (ICE 3 UND ICE 4)

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Zugnummer	Wagennummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
ICE 4	30.11.2020 8:52 Uhr	ICE 600	412-020-7	1.500	-	-
				3.000	-	-
				6.000	-	-
				-	Türgriff Toilette innen	Metalllegierung
				-	Spiegel in der Toilette	Glas
				-	Fenster am Sitzplatz	Glas
				-	Rückseite Sitz	Kunststoff
				-	Haltegriff Ein-/Ausstieg	Metalllegierung
				-	-	-
ICE 3	30.11.2020 13:47 Uhr	ICE 1005	403-232-2	1.500	-	-
				3.000	-	-
				6.000	-	-
				-	Türgriff Toilette innen	Metalllegierung
				-	Spiegel in der Toilette	Glas
				-	Fenster am Sitzplatz	Glas
				-	Rückseite Sitz	Kunststoff
				-	Haltegriff Ein-/Ausstieg	Metalllegierung
				-	Druckknopf Ein-/Ausstieg	Kunststoff

3.2.5.2 Regionalbahn (Triebzug Talent 2)

Für die Messungen im Regionalverkehr wurde die Strecke München Hbf. – Garmisch-Partenkirchen Bhf. ausgewählt. Auf dieser Strecke verkehren Triebzüge vom Typ Talent 2. Triebzüge dieses Typs sind weit verbreitet und stellen keine regionale süddeutsche Besonderheit dar. Die Messfahrt erfolgte am 21.01.2021 ab 16:32 Uhr. Zu dieser Zeit war der zweite Lockdown bereits in Kraft, was sich in einer stark reduzierten Personenanzahl in den Zügen und der in Bayern geltenden Verpflichtung zum Tragen von FFP2-/KN95-Masken niederschlug. Die Vorgabe wurde von den Fahrgästen in den Zugteilen, in denen die Beprobungen und Messungen stattfanden, weitestgehend eingehalten. Die Details der Messfahrt sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

TABELLE 2: MESSFAHRT IN FAHRZEUGEN DES REGIONALVERKEHRS (TALENT 2)

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Zugnummer	Wagennummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
Talent 2	21.01.2021 16:32 Uhr	RB 6 (5431) RB 60 (5528)	9480 2 443 716-2	3.000	-	-
				-	Druckknopf Türöffner	Kunststoff
				-	Türgriff Toilette innen	Metall- legierung
				-	Fläche Klapptisch	Holzwerkstoff lackiert
	21.01.2021 18:05 Uhr	RB 6 (5426) RB 60 (5527)	9480 2 442 219-8	3.000	-	-
				-	Hal- testange	Metall beschichtet
				-	Sitzlehne Rückseite	Kunststoff
-				Fenster	Glas	

3.2.5.3 S-Bahnen

Im Großraum München kommen S-Bahn-Triebzüge vom Typ ET-423 zum Einsatz. Diese Fahrzeuge werden auch von anderen Verkehrsverbänden (S-Bahn Stuttgart, S-Bahn Frankfurt/Main, S-Bahn Rhein Main, S-Bahn Köln) eingesetzt. Beprobte wurden die modernisierten Fahrzeuge der S-Bahn München auf der Strecke der Linie S3 mit den Endhaltepunkten Holzkirchen und Mammendorf (Tabelle 3). Die Messfahrt fand am 19.01.2021 statt. Die Fahrt von Holzkirchen Bhf. (planmäßige Abfahrt 07:16 Uhr) nach München-Lochhausen deckte den morgendlichen Berufsverkehr ab. Die Rückfahrt von München-Lochhausen nach Holzkirchen Bhf. begann um 8:25 Uhr.

TABELLE 3: MESSFAHRT IN FAHRZEUGEN DER S-BAHN MÜNCHEN (ET-423)

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Linie	Wagennummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
ET-423	19.01.2021 7:16 Uhr	S3	2573	2.749	-	-
				2.750	-	-
				-	Haltestange	Metallierung
	-	Druckknopf Türöffner	Kunststoff			
	19.01.2021 8:25 Uhr	S3	3783	2.729	-	-
				2.735	-	-
-				Haltestange	Metallierung	
-	Druckknopf Türöffner	Kunststoff				

3.2.5.4 U-Bahnen

Die MVG Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG) setzt auf Ihrem Streckennetz derzeit vier unterschiedliche Typen von U-Bahnwagen ein. Für die Messfahrten wurde ein Modell der ältesten und ein Vertreter der modernsten Baureihe beprobt.

Jeder der 194 Doppeltriebwagen vom Typ A (A-Wagen) bietet 290 Plätze (98 Sitzplätze und 192 Stehplätze). Sie wurden von 1970 bis 1984 in Betrieb genommen. Ein Durchgang von einem Zugsegment in ein anderes ist bei diesem Fahrzeugtyp nicht möglich.

Die MVG verfügt über 21 kurzgekuppelte Gliederzüge vom Typ C2 (C2-Zug). Die Fahrzeuge wurden 2016 in Betrieb genommen. Die C2-Züge können 4- bis 6-gliedrig eingesetzt werden. In der Regel werden die C2-Züge 6-gliedrig eingesetzt. Die 6-gliedrigen Züge verfügen über 940 Plätze (720 Stehplätze, 220 Sitzplätze). Der Durchgang durch einen gesamten C2-Zug ist möglich. Der Luftraum ist nicht durch innenliegende Türen segmentiert.

Für die Messfahrten wurde die Linie U6 (A-Wagen) vom Klinikum Großhadern nach Garching Forschungszentrum ausgewählt. Auf dieser Strecke beträgt die Fahrzeit mehr als 30 Minuten, so dass ein Probenahmenvolumen von mindestens 1.500 l gesammelt werden kann (Tabelle 4). Die Fahrt in der Gegenrichtung erfolgte in einem C2-Zug.

TABELLE 4: MESSFAHRT IN U-BAHNWAGEN DER MVG

Fahrzeug	Datum Beginn der Probenahme	Linie	Wagen- nummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
A-Wagen	10.12.2020 8:30 Uhr	U6	7204	1.500	-	-
				-	Haltestange	Metallle- gierung
				-	Türgriff	Metallle- gierung
				-	Fenster	Glas
C2-Wagen	10.12.2020 12:17 Uhr	U6	7713	1.500	-	-
				-	Haltestange	Metallle- gierung
				-	Haltebügel Wagen- mitte	Metallle- gierung
				-	Druckknopf Türe	Kunststoff

3.2.5.5 Straßenbahn

Der Straßenbahnpark der MVG umfasst derzeit sechs Modelle. Beprobte wurde ein fünfteiliges Multigelenkfahrzeug (S1 Variobahn). Dieses Modell bietet 221 Plätze (75 Sitzplätze und 146 Stehplätze). Die Variobahn ist klimatisiert und verfügt über sechs zweiflügelige Schwenkschiebetüren. Die Straßenbahn in München verkehrt ausschließlich oberirdisch.

Die Messfahrt (Tabelle 5) erfolgte auf der Straßenbahnlinie 21 von München St. Veit-Straße nach München Westfriedhof. Wie die Busse der MVG sind auch die Straßenbahnen mit Fahrkartenautomaten und Entwertern ausgestattet. Die Probenahmeeinrichtung war in Wagensegment 4 positioniert. Die Auslastung der Straßenbahn wurde mit maximal 50 % geschätzt.

TABELLE 5: MESSFAHRT IN EINER STRASSENBAHN VOM TYP S1 VARIOBAHN DER MVG

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Linie	Wagen- nummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
Strassen- bahn Typ S1 Variobahn	27.01.2021 14:59 Uhr	Linie 21	2317	1.500	-	-
				-	Haltestange mit Druck- knopf Halte- wunsch	Metalllegie- rung und Kunststoff
				-	Fahrkarten- automat Nr. 1422	Metalllegie- rung, Metall beschichtet, Kunststoff, Glas
				-	Entwerter Nr. 022583	Metall be- schichtet

3.2.5.6 Stadtbusse im Linienverkehr

Die Busflotte der MVG umfasst Standardbusse (Solobus 12 m), Gelenkbusse und Buszüge. Für die Messkampagne wurden ein Standardbus (MAN Lions City) und ein Gelenkbus (Mercedes Citaro G) ausgewählt. Der Standardbus verfügt über 59 Plätze (31 Sitz- und 28 Stehplätze), der Gelenkbus bietet 91 Fahrgästen Platz (41 Sitz- und 50 Stehplätze). Sowohl der Gelenk- als auch der Standardbus sind klimatisiert.

Der Solobus wurde nach Ende der morgendlichen Schicht auf dem Betriebshof beprobt. Ziel der Beprobung war es vor allem, eine mögliche Keimbelastung häufig berührter Oberflächen (Tabelle 6) zu identifizieren und ggf. vorhandene virenhaltige Aerosole zu erfassen.

TABELLE 6: MESSUNG UND PROBENAHME IN EINEM STANDARDBUS DER MVG NACH DEM EINRÜCKEN INS DEPOT

Fahrzeug	Datum Beginn der Probenahme	Linie	Wagen- nummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
MAN Lions City 12 m	10.12.2020 9:48 Uhr	-	4310	1.500	-	-
				-	Haltestange mit Druck- knopf Halte- wunsch	Metall- legierung und Kunststoff
				-	Fahrkarten- automat	Metalllegie- rung, Metall beschichtet, Kunststoff, Glas
				-	Entwerter	Metall beschichtet

Die kombinierte Linie 68/58 (Tabelle 7) wird mit einem Gelenkbus bedient. Die Auslastung auf der Messfahrt betrug max. 50 %. Während der Betriebspause an der Haltestelle Silberhornstraße wurde die Luftkeimsammlung unterbrochen und mit bei der Abfahrt wiederaufgenommen.

TABELLE 7: MESSFAHRT IN EINEM GELENKBUS DER MVG

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Linie	Wagen- nummer	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
Mercedes Benz Citaro G	27.01.2021 15:51 Uhr	Linie 68/58	5354	2.000	-	-
				-	Haltestange mit Druck- knopf Halte- wunsch	Metall- legierung und Kunststoff
				-	Fahrkarten automat Nr. 6366	Metalllegie- rung, Metall beschichtet, Kunststoff, Glas
				-	Entwerter Nr. 034835	Metall beschichtet

3.2.5.7 Fernbus (Flixbus)

Auf der Strecke München ZOB nach Mailand wurde am 18.12.2020 ein Fernbus vom Typ VDL FHD-2 eingesetzt. Dieser Hochdecker-Bus verfügt über eine Klimaanlage und eine Bordtoilette. Auf der Fahrt war der Bus zu 50 % besetzt. Vor Fahrtantritt mussten sich die Fahrgäste einer berührungslosen Messung ihrer Körpertemperatur unterziehen. Im Verlauf der Fahrt wurden zwei Luftproben in unterschiedlichen Zeitfenstern gesammelt. Die Erfassung der physikalisch-chemischen Parameter erfolgte durchgehend. Die Details der Beprobung finden sich in Tabelle 8.

TABELLE 8: MESSFAHRT IN EINEM FERNBUS (VDL FHD-2)

Fahrzeug	Datum Abfahrtszeit	Linie	Kfz- Kennzeichen	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
					Ort	Material
VDL FHD-2	18.12.2020 12:15 Uhr	München ZOB - Mailand	FS-G 480	1.500 (12:30 h)	-	-
				1.500 (13:31 h) ^{*)}	-	-
				-	Klapptisch Rückseite Sitzlehne	Kunststoff
				-	Haltestange	Metall beschichtet
				-	Türgriff Toilette	Kunststoff

^{*)} Aufgrund der Länge der Fahrt konnten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten Luftproben genommen werden.

3.2.6 Stationen und Bahnhöfe

Bei den stationären Einrichtungen wurden drei unterschiedliche ober- und unterirdische Bahnhofstypen untersucht. Auch hier umfasste das Messprogramm physikalisch-chemische Parameter, Luftkeimsammlung und die Beprobung von häufig berührten Oberflächen.

In stationären Einrichtungen wurden ebenfalls

- Fahrkartenautomaten,
- Handläufe von Treppen und Fahrtreppen,
- Druckknöpfe von Liften sowie
- Fahrplanaushänge

als potenziell kontaminiert angesehen und beprobt.

Im Großraum München sind im Wesentlichen folgende vier Bahnhofstypen anzutreffen:

- Kopfbahnhof mit Bahnhofshalle (München Hbf.), überdachten und nicht überdachten Bahnsteigsbereichen.
- geschlossener Tunnelbahnhof mit zentralem Bahnsteig und zwei Gleisen (U-Bahnhof München Odeonsplatz U3/U6).
- geschlossener Tunnelbahnhof mit einem zentralen Bahnsteig, zwei Gleisen und zwei weiteren außenliegenden Bahnsteigen (S-Bahnhöfe München Hbf. und München Marienplatz).
- überirdische Durchgangsbahnhöfe mit teilweise überdachten Bahnsteigen.

Für die Beprobung wurden die drei Bahnhofstypen ausgewählt, bei denen mit einer eingeschränkten Belüftung zu rechnen ist: die Haupthalle im Kopfbahnhof München Hbf. und zwei unterschiedliche unterirdische Bahnhöfe des U- und S-Bahnnetzes.

3.2.6.1 Hauptbahnhof München, Bahnsteig oberirdisch im Bereich der Haupthalle

Für die Beprobung wurde der in der Haupthalle befindliche Bahnsteigsbereich der Gleise 16/17 ausgewählt. Während der Probenahme trafen auf diesen Gleisen Pendlerzüge aus Augsburg und Ingolstadt ein und fuhren auch wieder ab. Der Standort für die Positionierung der Probenahmeeinrichtung wurde so gewählt, dass möglichst viele Fahrgäste diese Position passieren mussten. Ergänzt wurde die Luftkeimsammlung durch Wischproben an einem Fahrkartenautomaten in der Nähe des Bahnsteiges (Tabelle 9).

TABELLE 9: BEPROBUNG HAUPTBAHNHOF MÜNCHEN

Ort	Datum Beginn der Probenahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
Haupthalle	26.01.2021 07:39 Uhr	16/17	2.000	-	-
		Vor Gleis 16/17	-	Fahrkarten- automat Nr. B88455	Metalllegierung, Metall beschichtet, Kunststoff, Glas

3.2.6.2 S-Bahnhof München Hauptbahnhof, unterirdisch

Bei der S-Bahnhaltestelle München Hbf. handelt es sich um einen geschlossenen Tunnelbahnhof mit einem zentralen Bahnsteig zwischen den Gleisen und zwei außenliegenden Bahnsteigen (Tabelle 10). Die Luftkeimsammlung erfolgte mittig auf dem zentralen Bahnsteig.

In den unterirdischen Münchner U- und S-Bahnhöfen befinden sich die Fahrkartenautomaten in einem Zwischengeschoss (Ebene 1) oberhalb der Bahnsteigebene (Ebene 2).

TABELLE 10: BEPROBUNG S-BAHNHOF MÜNCHEN HAUPTBAHNHOF TIEF

Ort	Datum Beginn der Probe- nahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
München Hbf.	26.01.2021 08:34 Uhr	Ebene 1	-	Fahrkartenautomat Nr. B88475	Metalllegierung, Metall beschichtet, Kunststoff, Glas
		Ebene 2	2.000	-	-
			-	Handlauf Treppe 4	Metalllegierung
			-	Handlauf Fahrtreppe HF208	Kunststoff
			-	Fahrplanaushang	Glas oder Kunststoff

3.2.6.3 U-Bahnhof München Odeonsplatz, unterirdisch

Am U-Bahnhof München Odeonsplatz gehört zu den am stärksten frequentierten U-Bahnhöfen in München. Hier kreuzen die Linien U3/U6 die Linien U4/U5. Beide Bahnsteige sind Zentralbahnsteige mit außenliegenden Gleisen. Die Probenahme erfolgte am Bahnsteig der Linien U3/U6 (Tabelle 11). Der Fahrkartenautomat befindet sich auch hier in einem Zwischengeschoss oberhalb der Bahnsteigebene.

TABELLE 11: BEPROBUNG U-BAHNHOF MÜNCHEN ODEONSPLATZ

Ort	Datum Beginn der Probe- nahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
U-Bahnhof	10.12.2021 10:56 Uhr	Ebene 1	-	Fahrkartenautomat	Metalllegierung, Glas, Kunststoff
		Bahn- steig U3/U6	1.500	-	-
			-	Handlauf Fahrtreppe	Kunststoff
			-	Druckknopf Lift	Metalllegierung

3.2.6.4 U-Bahnhof München Am Hart, unterirdisch

Der U-Bahnhof München Am Hart verfügt ebenfalls über einen Zentralbahnsteig mit außenliegenden Gleisen. An diesem U-Bahnhof wurden ausschließlich Wischproben von der Oberfläche eines Fahrkartenautomaten und vom Handlauf einer Fahrtreppe im Zwischengeschoss (Tabelle 12) zwischen Gleisebene und Oberfläche genommen.

TABELLE 12: BEPROBUNG U-BAHNHOF MÜNCHEN AM HART

Ort	Datum der Probenahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
Zwischengeschoss	10.12.2020	- *)	-	Fahrkartenautomat Nr. 0576	Metalllegierung, Glas, Kunststoff
				Handlauf Fahrtreppe	Kunststoff

*) Die Beprobung erfolgte im Zugangsbereich oberhalb des Bahnsteigs

3.2.6.5 S-Bahnhof München-Lochhausen, oberirdisch

Der S-Bahnhof München-Lochhausen ist ein oberirdischer Bahnhof mit teilweise überdachtem Bahnsteig. Hier wurden Wischproben von einem Fahrkartenautomaten (Tabelle 13) genommen.

TABELLE 13: BEPROBUNG S-BAHNHOF MÜNCHEN LOCHHAUSEN

Ort	Datum der Probenahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
Bahnsteig	19.01.2021	1/2	-	Fahrkartenautomat Nr. B85158	Metalllegierung, Glas, Kunststoff

3.2.6.6 S-Bahn- und Regionalverkehrsbahnhof Holzkirchen, oberirdisch

Der Bahnhof Holzkirchen verfügt über fünf oberirdische Gleise und teilweise überdachte Bahnsteige. Hier wurden Wischproben von Fahrkartenautomaten (Tabelle 14) an Gleis 1 genommen.

TABELLE 14: BEPROBUNG BAHNHOF HOLZKIRCHEN

Ort	Datum der Probenahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
Bahnsteig	19.01.2021	1	-	Fahrkartenautomat Nr. 52001 Nr. B85589	Metalllegierung, Glas, Kunststoff

3.2.6.7 Hauptbahnhof Erfurt

Im Rahmen der orientierenden Messungen am 30.11.2020 wurde am Hauptbahnhof in Erfurt eine Wischprobe von einem Entwerter genommen (Tabelle 15).

TABELLE 15: BEPROBUNG HAUPTBAHNHOF ERFURT

Ort	Datum der Probenahme	Gleis	Volumen der Luftprobe [l]	Wischproben	
				Ort	Material
Bahnsteig	30.11.2020	9/10	-	Entwerter	Metall beschichtet

3.2.7 Ergebnisse physikalisch-chemische Parameter

3.2.7.1 ICE

Der Wagen, in dem die Probenahme erfolgte, war am 30.11.2020 nur sehr schwach besetzt. Die Personenanzahl schwankte auf der Fahrt nach Erfurt Hbf. zwischen 9 und 15 Personen. Auf der Rückfahrt nach München Hbf. befanden sich inklusive der Probenehmer maximal 20 Personen im Wagen. In AP 2 (Teil C) wurde bereits erläutert, dass die Lüftung im ICE bedarfsgeführt ist mit einem Maximalwert von 1.580 ppm CO₂. Bei einer so geringen Belegung wie am 30.11.2020 greift die Regelung noch nicht, d. h. die Lüftung läuft im Grundlastbetrieb. Der Anstieg der CO₂-Konzentration ab 10:50 Uhr war dem Schließen der Tunnelklappen geschuldet (Abbildung 17 links). Bei der Einfahrt in einen Tunnel werden die Lüftungsklappen geschlossen, um einen Druckstoß im Wageninneren zu vermeiden. Damit steigt zwangsläufig auch die CO₂-Konzentration im Wagen an. Auf der Rückfahrt ab 14:04 Uhr war dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt (Abbildung 17 rechts). Die Aerosolpartikelanzahl-Konzentration folgte nicht der CO₂-Konzentration. Die Aerosolpartikel-Fraktion mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner oder gleich 0,5 µm überwog mit einem Anteil von 85,5 % bis 86,2 %. Aerosolpartikel mit diesem aerodynamischen Durchmesser sind alveolengängig, sie werden im Nasen-/Rachenraum bzw. in den Bronchien nicht zurückgehalten, sondern können bis in die Lungenbläschen (Alveolen) gelangen. Der aerodynamische Durchmesser alleine lässt aber keine Aussage über ihre chemische Zusammensetzung bzw. die Virenanzahl zu, die ein Aerosolpartikel enthalten kann. Wirkt auf Aerosolpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 0,4 µm (eine Dichte von 1 g/cm³ und eine Kugelform angenommen) in ruhender Luft ausschließlich die Schwerkraft ein, benötigen sie 39 h, um 1 m abzusinken [26]. D. h., je kleiner Aerosolpartikel sind, umso länger können sie schwebend in der Luft verbleiben.

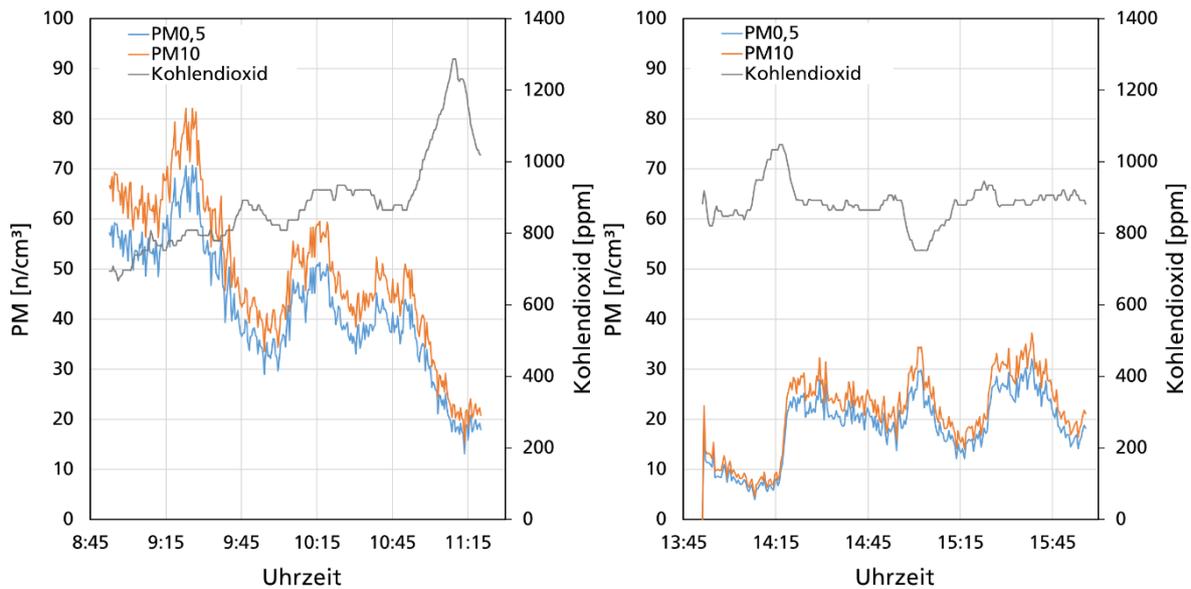


Abbildung 17: Verlauf der Partikelanzahl-Konzentrationen und der CO₂-Konzentrationen. links: Fahrt im ICE 4 München Hbf. – Erfurt Hbf., rechts Fahrt im ICE 3 Erfurt Hbf. – München Hbf.

3.2.7.2 Regionalzug

Temperatur und relative Luftfeuchte variierten während Hin- und Rückfahrt nur geringfügig (Abbildung 18). Auf der Hinfahrt wurde der Zug um 17:56 Uhr verlassen, was am schnellen Absinken der Temperatur (Abbildung 18 links) zu erkennen ist. Die relative Luftfeuchte im Fahrzeug betrug im Schnitt ca. 21,6 % r. F. Die Lufttemperatur lag mit Werten zwischen 20,9 °C und 22,3 °C im Komfortbereich.

Auf der Rückfahrt war die relative Luftfeuchte mit durchschnittlich 23,7 % geringfügig höher. Die Lufttemperatur bewegte sich zwischen 20,4 °C und 22,3 °C. Die relative Luftfeuchte lag bei beiden Fahrten unterhalb des Komfortbereichs, die Temperatur im Komfortbereich.

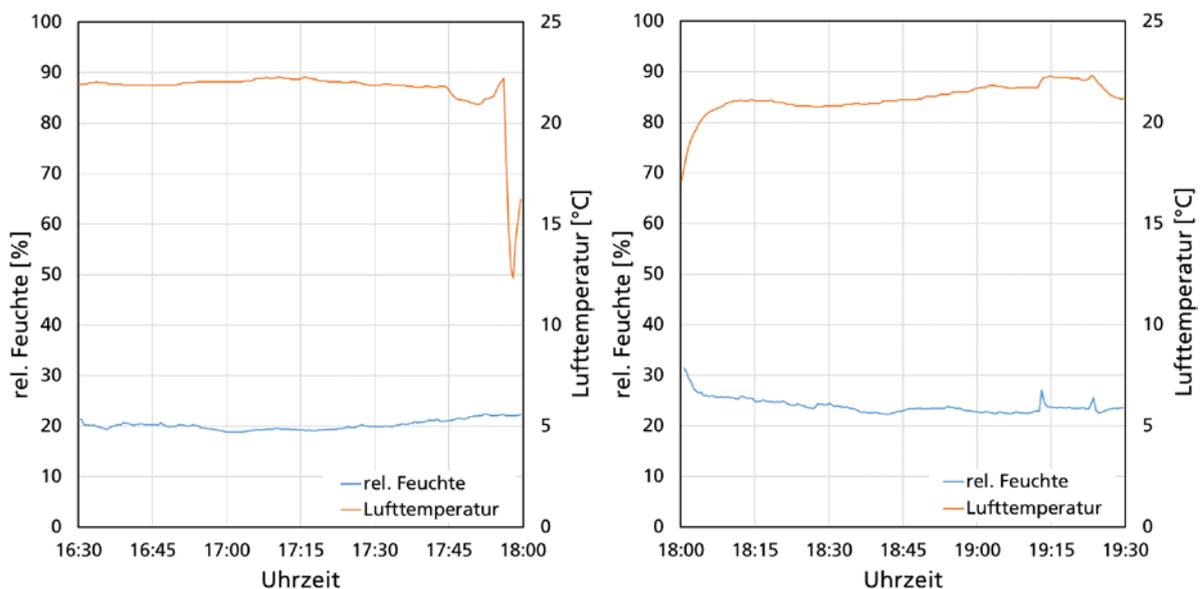


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte in einer Regionalbahn (Talent 2). links: München Hbf. – Garmisch-Partenkirchen Bhf., rechts Garmisch-Partenkirchen Bhf. – München Hbf.

Die Triebzüge vom Typ Talent 2 verfügen über keine drehzahlgeregelte oder bedarfsgeführte Lüftung. Die CO₂-Konzentrationen lagen auf der Hinfahrt zwischen 611 ppm und 808 ppm, auf der Rückfahrt zwischen 654 ppm und 752 ppm (Abbildung 19). Die CO₂-Konzentration ist damit als hygienisch akzeptabel anzusehen. Den Verlauf der CO₂-Konzentration spiegelte auch hier die Partikelanzahl-Konzentration nicht wider.

Der Anstieg der Partikelanzahl-Konzentration zwischen 17:13 Uhr und 17:38 Uhr erfolgte auf der Strecke ab Weilheim Bahnhof und erreichte in Eschenlohe wieder das Ausgangsniveau. Auf der Rückfahrt stieg die Partikelanzahl-Konzentration ab dem Haltepunkt Huglfing an und sank vor Erreichen des Bahnhofs Pasing wieder auf das Ausgangsniveau ab. Auch bei diesen Messfahrten stellten Partikel der Größenklasse PM_{0,5} die größte Fraktion dar (Hinfahrt 85,9 % - 86,3 %, Rückfahrt 86,0 % - 86,4 %).

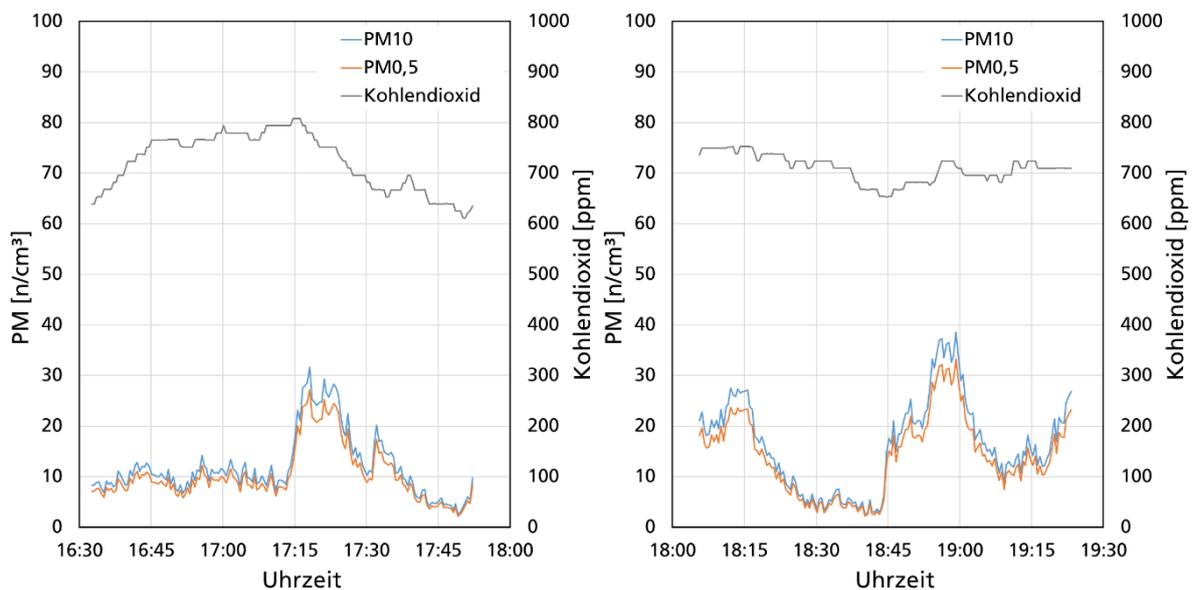


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und der CO₂-Konzentration.
links: München Hbf. – Garmisch-Partenkirchen Bhf., rechts Garmisch-Partenkirchen Bhf. – München Hbf.

3.2.7.3 S-Bahnen

Charakteristisch für die S-Bahn in München ist die sog. Stammstrecke, ein unterirdischer Streckenabschnitt zwischen München Ostbahnhof und München Hbf. Alle anderen Streckenabschnitte der Linie S3 verlaufen oberirdisch. Die unterirdische Stammstrecke wurde bei der Hinfahrt zwischen 7:49 Uhr und 7:59 Uhr und auf der Rückfahrt zwischen 8:41 Uhr und 8:54 Uhr passiert. Während bei der Hinfahrt zwischen 7:49 Uhr und 7:59 Uhr der Anstieg der Aerosolpartikelanzahl-Konzentration nicht exakt in dieses Zeitfenster fiel, korrelierte auf der Rückfahrt der Anstieg der Aerosolpartikelanzahl-Konzentration mit der Einfahrt in die Stammstrecke (Abbildung 21). Auf beiden Fahrten stieg die relative Luftfeuchte fast zeitgleich mit der Partikelanzahl-Konzentration an (Abbildung 20).

Die maximalen CO₂-Konzentrationen auf beiden Fahrten lagen unter 1.000 ppm und sind somit als hygienisch unbedenklich einzustufen. Die Lufttemperaturen liegen unterhalb des Komfortbereichs. Der Abfall der Lufttemperatur um 8:19 Uhr bzw. 9:27 Uhr wurde jeweils beim Verlassen des Zuges aufgezeichnet.

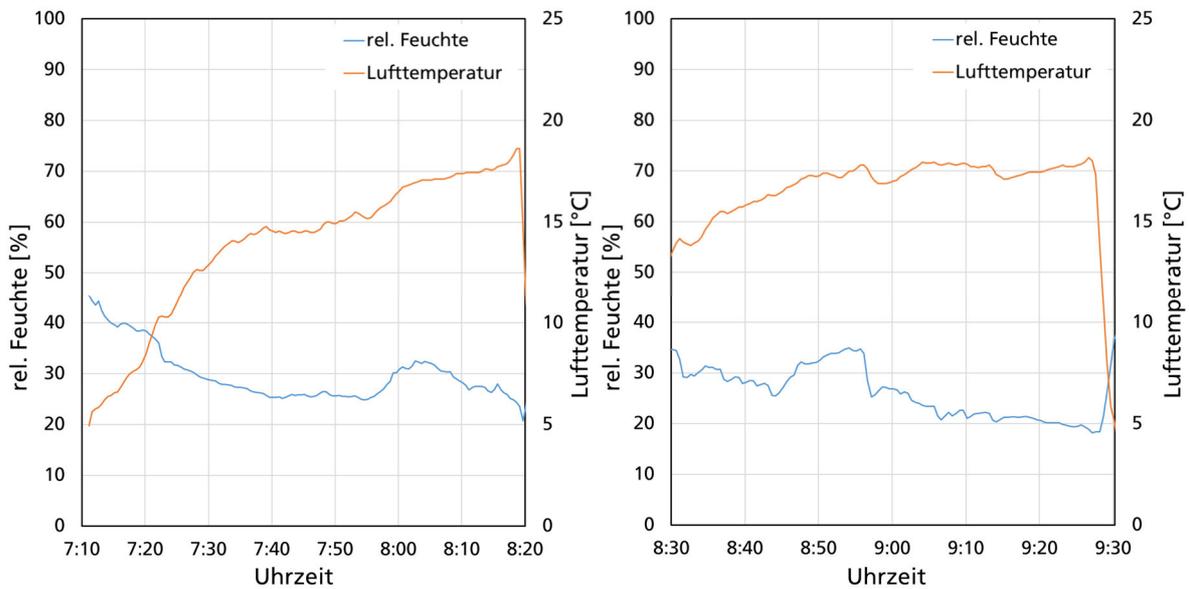


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte. links: Holzkirchen Bhf. - München Pasing Bhf., rechts München Lochhausen - Holzkirchen Bf.

Der $PM_{0,5}$ -Anteil an der Aerosolpartikelanzahl-Konzentration schwankte bei diesen Fahrten stärker als im Regional- oder Fernverkehr, nämlich zwischen 83,1 % und 86,3 %. Die typische Partikelgröße wies ebenfalls deutlichere Schwankungen auf (0,36 μm - 0,63 μm).

Auf der Hinfahrt stieg die CO_2 -Konzentration von 566 ppm auf 752 ppm an (Abbildung 21 links). Die Messung auf der Rückfahrt wurde um 8:33 Uhr bei der Ausfahrt aus München Pasing Bhf. gestartet und nach der Einfahrt in die Endstation Holzkirchen Bhf. (9:27 Uhr) beendet (Abbildung 21 rechts).

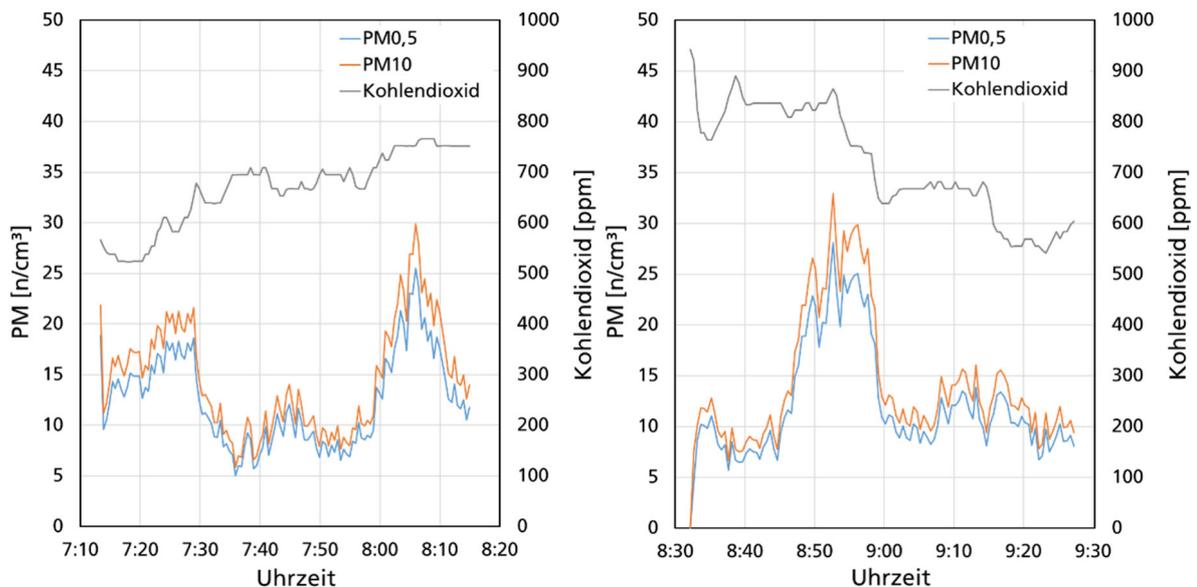


Abbildung 21: Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO_2 -Konzentration. links: Holzkirchen Bhf. - München Pasing Bhf., rechts München Lochhausen - Holzkirchen Bhf.

3.2.7.4 U-Bahnen

Die Linie U6 verkehrt sowohl ober- als auch unterirdisch (A-Wagen: 8:59 Uhr - 9:10 Uhr, C2-Wagen 12:11 Uhr - 12:21 Uhr). Auf dieser Linie werden Wagen unterschiedlichen Typs eingesetzt. Im vorliegenden erfolgte die Hinfahrt mit einem A-Wagen älterer Bauart, die Messfahrt in der Gegenrichtung mit einem modernen C2-Wagen. Die Lufttemperatur lag in beiden Fahrzeugen durchgehend unter 20 °C, die relative Luftfeuchte betrug max. 40 % bzw. 37 %.

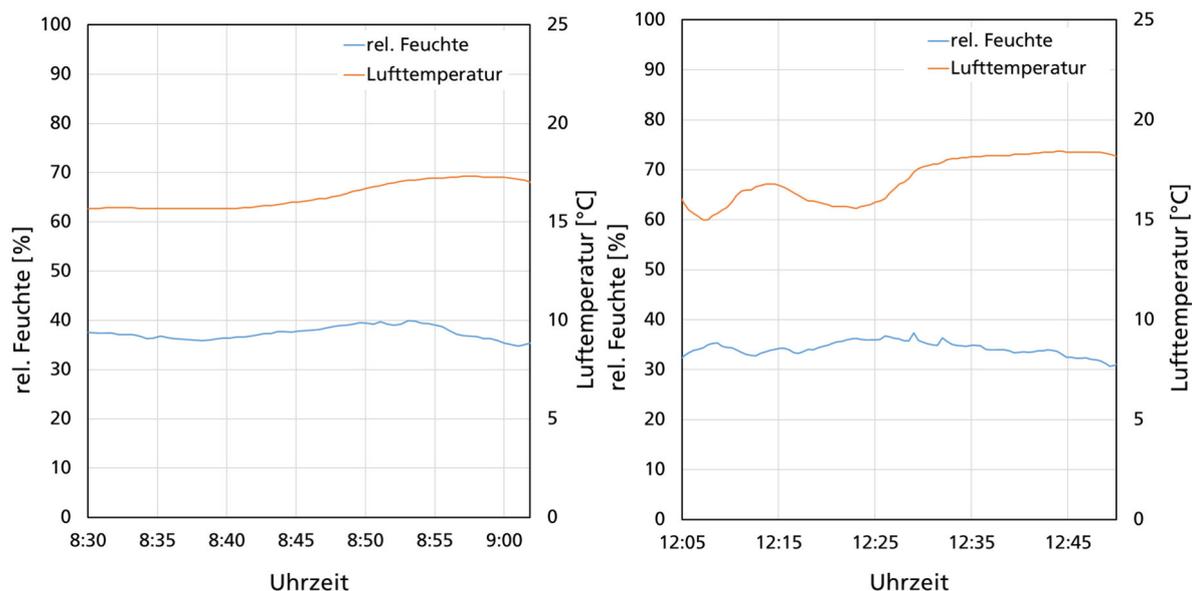


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte in zwei Zügen der U-Bahnlinie U6. links: A-Wagen von Klinikum Großhadern nach Garching Forschungszentrum, rechts: C2-Wagen von Garching Forschungszentrum nach Klinikum Großhadern.

Im A-Wagen erreichte die CO₂-Konzentration 1.061 ppm (Abbildung 23 links), im C2-Wagen 921 ppm (Abbildung 23 rechts). Damit wurde der hygienisch unbedenkliche Bereich im A-Wagen für ca. 8 Minuten (8:50 Uhr bis 8:58 Uhr) überschritten. CO₂- und Aerosolpartikelanzahl-Konzentrationen zeigten im A-Wagen einen gleichgerichteten aber zeitversetzten Verlauf. Ab ca. 12:27 Uhr zeigt sich dieses Verhalten auch im C2-Wagen.

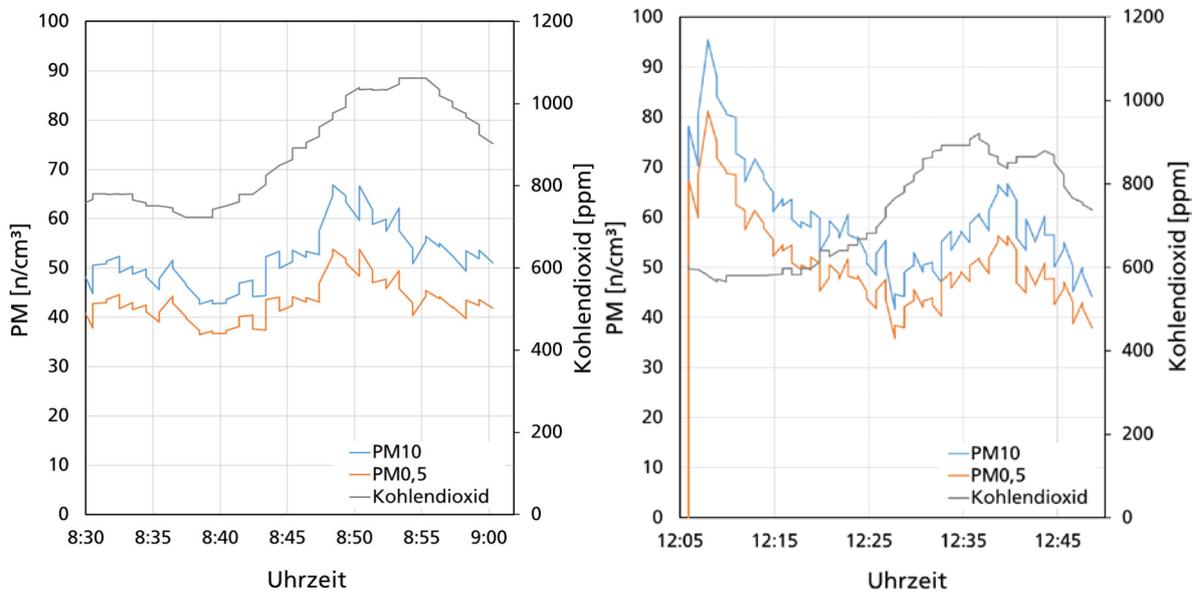


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO₂-Konzentration. links: A-Wagen von Klinikum Großhadern nach Garching Forschungszentrum, rechts: C2-Wagen von Garching Forschungszentrum nach Klinikum Großhadern.

3.2.7.5 Straßenbahn

Die Straßenbahn-Linie 21 verkehrt von München St. Veitstraße nach München Westfriedhof. Sie war während der Mess- und Probenahmefahrt zu max. 50 % ausgelastet. Die höchste Fahrgastanzahl befand sich zwischen 15:11 Uhr und 15:18 Uhr im Fahrzeug. Der Anstieg von Temperatur und CO₂-Konzentration am Ende der Fahrt könnte auf eine verspätete Ankunft an den Haltestellen München Hbf. und München Hbf. Nord und der Ansammlung an Personen vor den Türen geschuldet sein. Während der Fahrt betrug die höchste gemessene CO₂-Konzentration 775 ppm (Abbildung 24, rechts); sie ist damit als hygienisch unbedenklich einzustufen. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen 33 % und 42 %, die Lufttemperatur lag überwiegend unter 16 °C (Abbildung 24, links).

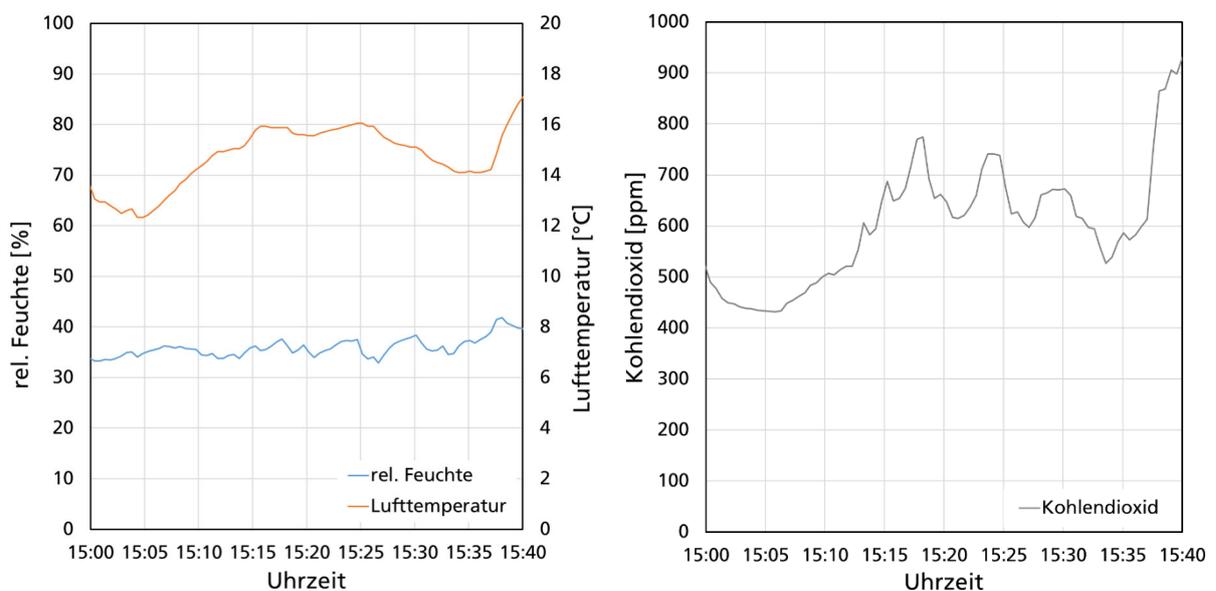


Abbildung 24: Beprobung einer Straßenbahn der Linie 21. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Verlauf der CO₂-Konzentration.

3.2.7.6 Stadtbusse

Während der Beprobung der Oberflächen durch zwei Personen im geschlossenen Bus mit ausgeschalteter Lüftung und Klimatisierung sank die relative Luftfeuchte von 60 % auf 43 % r. F. Die Lufttemperatur stieg im gleichen Zeitraum von 7,5 °C auf 13,6 °C an. Dies war durch die Anwesenheit der beiden Personen und die Abwärme der Mess- und Probenahmegeräte bedingt. Bei Anwesenheit von zwei Personen in einem nicht belüfteten Bus führte auch bei moderater körperlicher Aktivität zu einem Anstieg der CO₂-Konzentration von 668 ppm auf 991 ppm innerhalb von 29 Minuten.

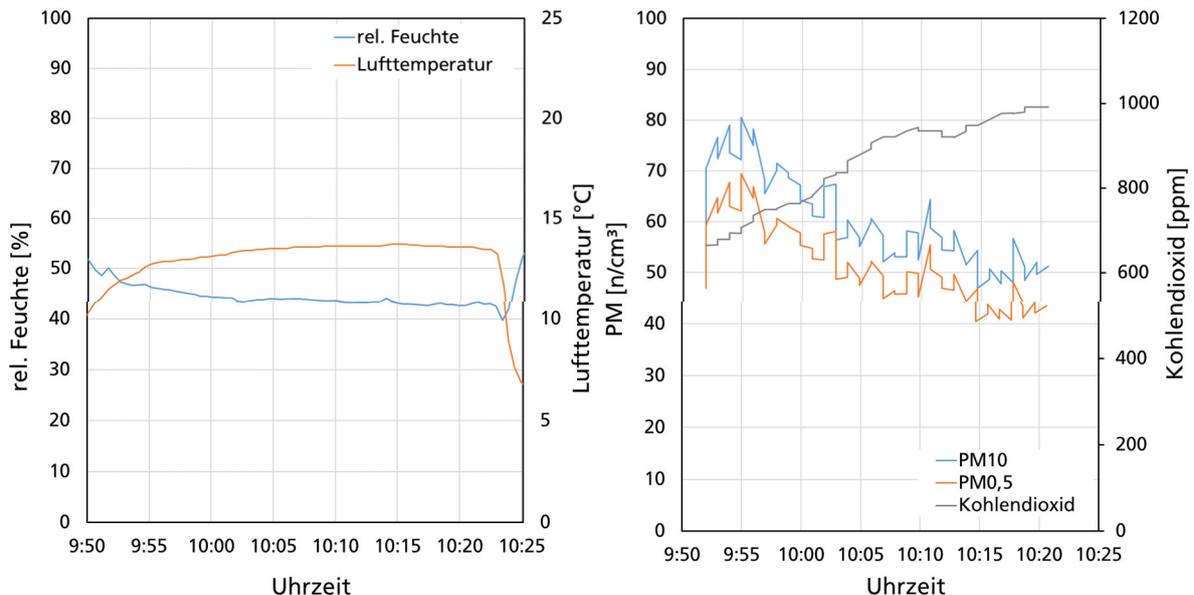


Abbildung 25: Beprobung eines 12 m Standardbusses nach dem Einrücken zum Schichtende. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO₂-Konzentration.

Der beprobte Gelenkbus der Linie 68/58 war während der Fahrt zu maximal 50 % besetzt. Die intensivste Nutzung erfolgte im Zeitfenster von 16:30 Uhr bis 16:40 Uhr. Die Auslastung betrug an der Haltestelle Goetheplatz (16:00 Uhr) ca. 5 % und stieg an der Haltestelle Kapuzinerplatz (16:01 Uhr) auf ca. 20 % an. Ab 16:09 Uhr stand der Bus mit geöffneten Türen an der Haltestelle Silberhornstraße. Die CO₂-Konzentration sank innerhalb kurzer Zeit auf das Niveau der Außenluft. Die Lufttemperatur sank dabei auf ca. 10 °C (Abbildung 26 rechts). Die CO₂-Konzentration lag durchgehend unter 1.000 ppm und ist damit als hygienisch unbedenklich einzustufen. Die Lufttemperatur lag unterhalb des Komfortbereichs. Die niedrige Lufttemperatur und die hohe relative Luftfeuchte zwischen 15:50 Uhr und 15:55 Uhr war durch die geöffneten Türen an der Endhaltestelle bedingt.

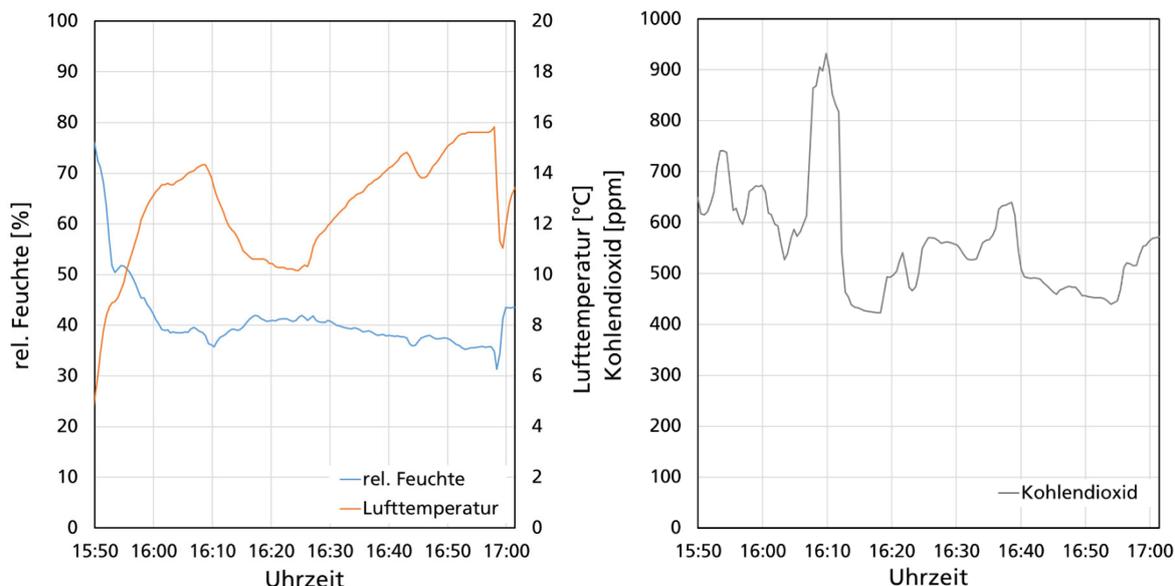


Abbildung 26: Beprobung eines Gelenkbusses der Linie 68/58 auf der Fahrt von München Hbf. Süd – München Silberhornstraße (als Linie 68) – München Universität (als Linie 58). links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration. Von 16:09 Uhr bis 16:23 Uhr stand der Bus mit geöffneten Türen an der Haltestelle Silberhornstraße.

3.2.7.7 Fernbus – Flixbus

Die Beprobung des Fernbusses fand am 18.12.2020 auf der Strecke von München ZOB nach Lindau Reutin statt. Der Busanbieter stellte nach diesem Tag seinen Linienbetrieb ein. Vor der Abfahrt stehen die Fernbusse im Zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) in München zum Boarding. Die Durchlüftung dieser Ebene des ZOB ist eingeschränkt.

Die Lufttemperatur lag bereits kurz nach der Abfahrt im komfortablen Bereich zwischen 20 °C und 25 °C (Abbildung 27 links). Die relative Luftfeuchte betrug durchschnittlich 33,6 % (29,6 % - 40,4 %). Die Abfahrt erfolgte um 12:17 Uhr. Die maximalen CO₂-Konzentrationen betragen vor der Fahrt 1.481 ppm und während der Fahrt 1.355 ppm (Abbildung 27 rechts). Sie liegen damit im hygienisch bedenklichen Bereich. Während der gesamten Fahrt blieben die Türen geschlossen. Die Schwankungen der CO₂-Konzentration lassen sich also nicht mit dem Zustieg von Fahrgästen oder dem Öffnen und Schließen von Türen erklären. Es ist anzunehmen, dass sie von der Einstellung der Klimaanlage im Bus oder durch Eingriffe des Fahrers ausgelöst wurden. Die Fahrgäste bewegten sich mit wenigen Ausnahmen (Gang zur Toilette, Wechsel der Gelatinefilter und Probenahme) kaum im Bus.

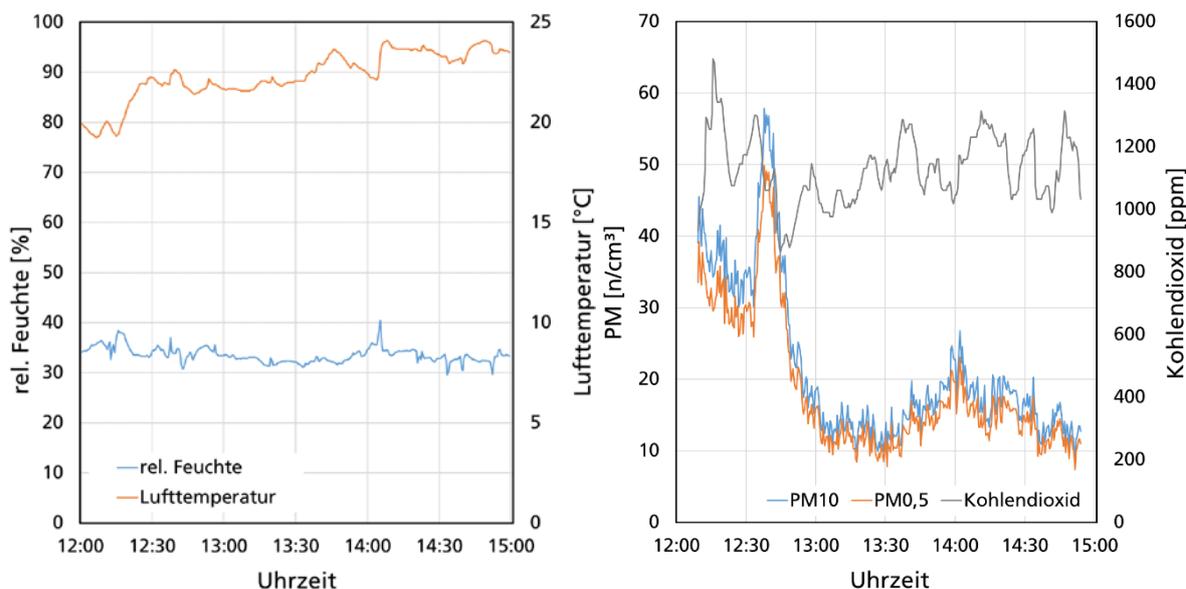


Abbildung 27: Beprobung eines Fernbusses auf der Strecke von München ZOB nach Lindau Reutin. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl-Konzentration und der CO₂-Konzentration.

3.2.7.8 Hauptbahnhof München, DB Bahnsteig oberirdisch im Bereich der Haupthalle

Während der Probenahme betrug die Lufttemperatur im Bereich der Bahnhofshalle zwischen 1 °C und 2 °C. Die relative Luftfeuchte lag zwischen 58 % und 63 % (Abbildung 28 links), die CO₂-Konzentration mit im Durchschnitt 434 ppm im Bereich der Außenluft (Abbildung 28 rechts). Die ankommenden und abfahrenden Pendlerzüge waren mäßig besetzt.

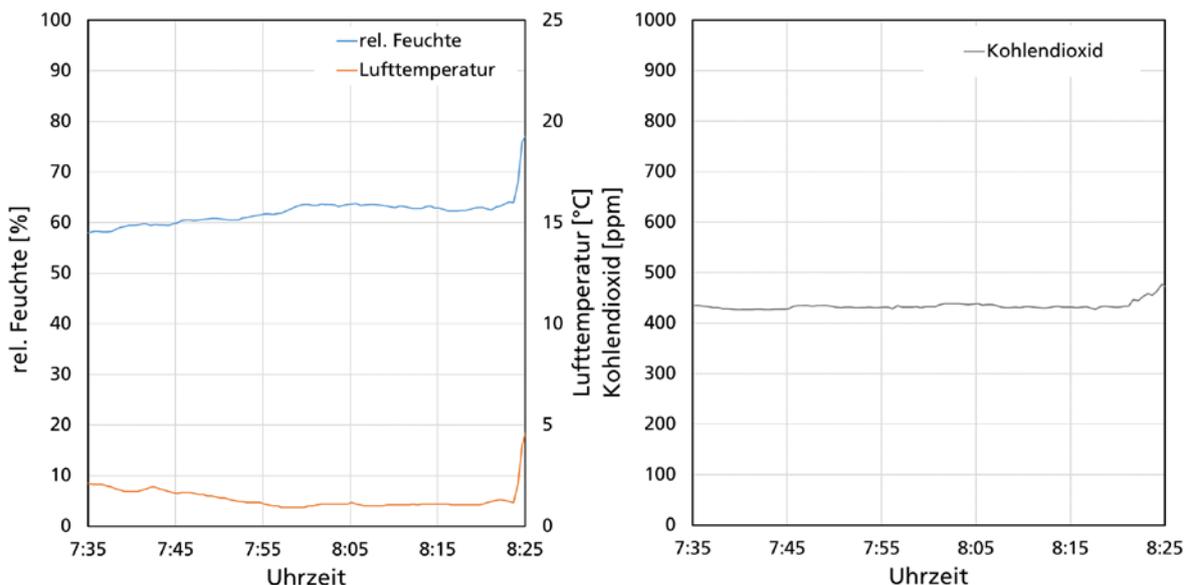


Abbildung 28: München Hauptbahnhof Bahnsteig zwischen Gleis 16 und Gleis 17. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration.

3.2.7.9 S-Bahnhof München Hauptbahnhof, unterirdisch

Die Lufttemperatur auf dem Bahnsteig betrug während der Probenahme zwischen 9 °C und 10 °C. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen 57 % und 63 % (Abbildung 29 links). Die CO₂-Konzentration lag über der in der Haupthalle zwischen 460 ppm und 587 ppm (Abbildung 29 rechts).

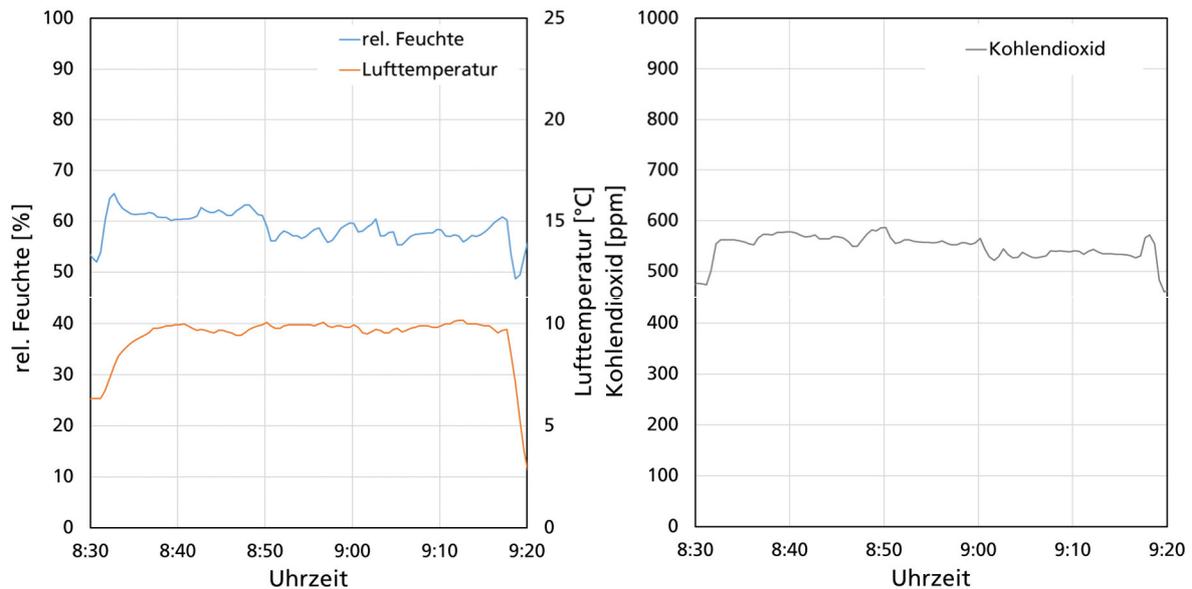


Abbildung 29: S-Bahnhof München Hauptbahnhof. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration.

3.2.7.10 München Odeonsplatz: U-Bahnsteig unterirdisch

Die relative Luftfeuchte lag während der Probenahme zwischen 30,7 % und 35,5 %. Die Lufttemperatur betrug zwischen 17,4 °C und 18,8 °C (Abbildung 30 links). Der Mittelwert der CO₂-Konzentration lag über die Dauer der Luftkeimsammlung bei 551 ppm mit einer Schwankung von 542 ppm bis 562 ppm (Abbildung 30 rechts). Die PM₁₀ Partikelanzahl-Konzentration zeigte einen der CO₂-Konzentration ähnlichen Verlauf; sie sank im Verlauf der Probenahme von 74 n/cm³ auf 61 n/cm³. Die kleinste Partikelfraktion PM_{0,5} trug zwischen 80,3 % und 84,4 % zur Gesamtpartikelanzahl-Konzentration bei. Während der Probenahme fuhren mehrfach auf beiden Gleisen U-Bahnen fast gleichzeitig oder nur mit einem geringen Zeitversatz ein und aus. Der Bahnsteig war während der Messungen sowohl durch zu- und aussteigenden als auch durch umsteigende Fahrgäste verhältnismäßig stark frequentiert.

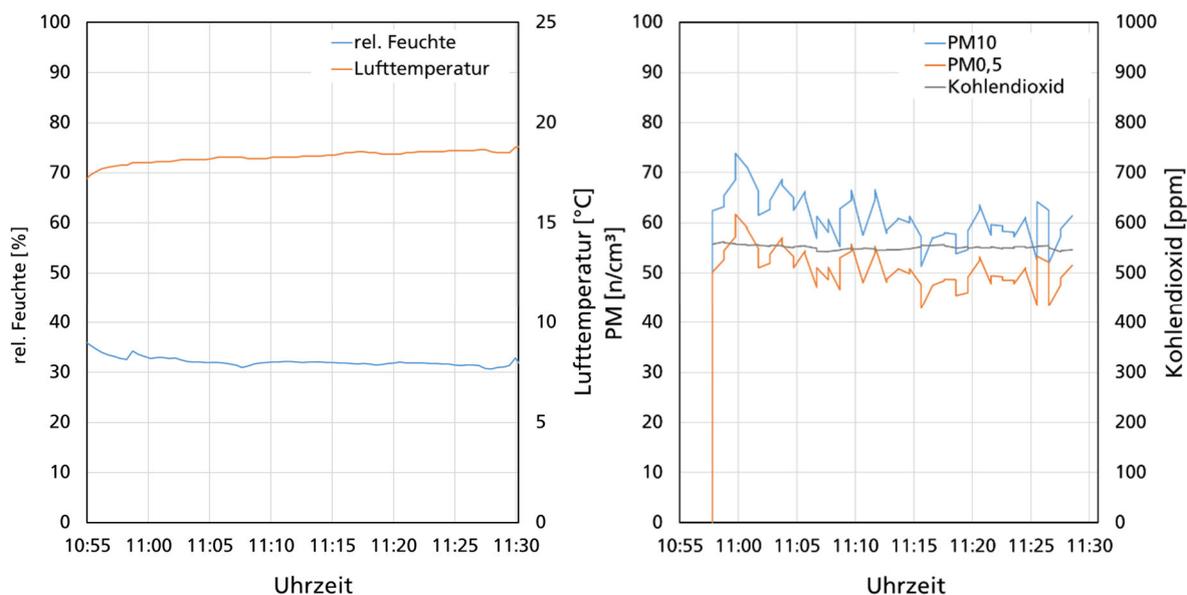


Abbildung 30: U-Bahnhof München Odeonsplatz, U-Bahngeschoss U3/U6. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO₂-Konzentration.

In Tunnelbahnhöfen stellen sich erwartungsgemäß höhere CO₂-Konzentrationen ein als in oberirdischen. Die CO₂-Konzentrationen lagen aber auch in den beiden beprobten Tunnelbahnhöfen durchgehend im hygienisch unbedenklichen Bereich kleiner 1.000 ppm.

3.3 Molekularbiologische und mikrobiologische Untersuchungen an der TU München

3.3.1 Einleitung

Virusisolate aus Mensch und Umwelt können nur indirekt nachgewiesen werden, da einerseits die Partikelgröße konventionelle Mikroskopie-Methoden nicht zulässt und andererseits die Virus-Wirt-Abhängigkeit eine direkte „Viruszucht“ ausschließt. Über virale Genomisolation und anschließender quantitativer Echtzeit PCR kann mithilfe eines Fluoreszenzfarbstoffes proportional auf die Menge an Spezies-spezifischem Virus-Genomen zurückgeschlossen werden. Diese Methode lässt jedoch keine Rückschlüsse auf infektiöse Partikel zu. Um infektiöse Viren nachzuweisen, können Säugerzellen (in der Regel human) gezüchtet werden und mit Isolaten inokuliert werden. Oft sind mehrere Passagen nötig, um eine ausreichende Viruslast zu kultivieren, um daraufhin molekularbiologische Nachweisverfahren anzuwenden. Die indirekte Immunfluoreszenz kann hier durch spezifische Markierung von Virusproteinen den direkten Nachweis intakter und infektiöser Viren liefern.

Zielsetzung der molekularbiologischen und mikrobiologischen Untersuchungen waren wie folgt:

1. Nachweis von Humanen Adenoviren (HAdV), welche unter anderem als Positivkontrolle der Probenahme dienen.
- Direkte Erfassung von genetischem Material aus den Isolaten über quantitative Echtzeit PCR.

- Inokulation und Passage von humanen Zellen mit den Isolaten und anschließende Analyse von viraler Genom-Neubildung über quantitative Echtzeit PCR sowie der Bildung infektiöser Viruspartikel über indirekte Immunfluoreszenz.
2. Nachweis von SARS-CoV-2, um den Transmissionsverlauf und die Transmissionsgefahr nachvollziehen zu können.
- Direkte Erfassung von genetischem Material aus den Isolaten über quantitative Echtzeit PCR.
 - Bei Positivbefunden, Inokulation von Säugerzellen mit den Isolaten und anschließende Analyse von viraler Genom-Neubildung über quantitative Echtzeit PCR (wurde aufgrund ausschließlich negativer Ergebnisse für SARS-CoV-2 nicht durchgeführt).

3.3.2 Materialien und Methoden

3.3.2.1 Kultur von Säugerzellen

Alle Arbeiten mit Zellen wurden steril unter einer mit Ethanol gereinigten Sicherheitswerkbank durchgeführt. Die adhärennten Säugerzellen wurden als Monoschichten auf Polystyrol-Zellkulturschalen (6-Well- und 150 mm-Gewebekulturschalen) im Wachstumsmedium Dulbeccos Modified Eagle-Medium (DMEM) kultiviert, welches mit 10 % fötalem Rinderserum (FBS) und 1 % Penicillin-Streptomycin-Lösung (10.000 U/ml Penicillin und 10 mg/ml Streptomycin, steril-filtriert) supplementiert wurde. Die Zellen wurden bei 37 °C in 5 % CO₂-Atmosphäre inkubiert. Zur weiteren Kultivierung oder für Experimente wurden konfluente Zellen zuerst mit PBS (Phosphatpuffer) gewaschen und dann mit Trypsin-EDTA von der Zellkulturschale gelöst. Nach 3-5 min Inkubation bei 37 °C wurde die Trypsinreaktion durch Zugabe von DMEM abgestoppt. Die Zellen wurden in einem 50 ml Falken überführt, 3 min bei 2.000 U/min zentrifugiert und das Pellet in einer entsprechenden Menge DMEM resuspendiert. Zur Kultivierung wurden die Zellen im 1:5 - 1:20 Split auf die Platte zurückgegeben. Für Experimente wurde die Zellzahl bestimmt und die geeignete Menge für den Folgetag ausgesät.

3.3.2.2 Bestimmung der Zellzahl und aussähen

Wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, wurden die Zellen trypsiniert, zentrifugiert und das Pellet in frischem Medium resuspendiert. 10 µl Zellsuspension wurden in eine Neubauer-Zellzählkammer pipettiert. Die Zellzahl wurde unter einem Lichtmikroskop ermittelt.

Die Gesamtzellzahl wurde wie folgt bestimmt:

$$\frac{n}{V} = n_c * d_f * 10^4 \quad (1)$$

mit
n Zellzahl
V Volumen in ml
n_c gezählte Zellen
d_f Verdünnungsfaktor, hier 2

Die Zellen wurden pro 6-Well zu 1 x 10⁶ Zellen ausgesät. Diese wurden dann bis zum Folgetag etwa 24 Stunden bei 37 °C und 5 % CO₂ inkubiert, woraufhin die Virusinfektion beziehungsweise Inokulation folgte (siehe Abschnitt 3.3.2.5).

3.3.2.3 Zellernten

72 Stunden nach der Inokulation mit Probenmaterial sowie Positiv- und Negativkontrollen (siehe Abschnitt 3.3.2.5) wurden die Zellen mit einer Pipette vom Boden des Wells abgewaschen und von der Schale in ein 2 ml Gefäße überführt. Je nach experimentellem Schritt, wurden die Zellen aufgebrochen (siehe Abschnitt 3.3.2.4) oder zur DNA-Extraktion weiterverarbeitet (siehe Abschnitt 3.3.2.6). Für indirekte Immunfluoreszenz (siehe Abschnitt 3.3.2.9) wurden Zellen mit eisgekühltem Methanol (absolut) fixiert, bei -20 °C für 15 min inkubiert und anschließend bei Raumtemperatur (RT) luftgetrocknet.

3.3.2.4 Zellaufschluss mit flüssigem Stickstoff

Die geernteten Zellen (siehe Abschnitt 3.3.2.3) wurden im 2 ml Gefäß in 500 ml DMEM resuspendiert und direkt in flüssigem Stickstoff schockgefroren. Nachdem die Probe vollständig ausgehärtet war, wurde diese in ein 37 °C warmes Wasserbad gestellt und mehrere Minuten aufgetaut. Dieser freeze-and-thaw (Einfrieren-Auftauen) Zyklus wurde zwei weitere Male wiederholt. Zuletzt wurden die aufgebrochenen Zellen bei maximaler U/min pelletiert und der klare Überstand für weitere Infektionsexperimente (siehe Abschnitt 3.3.2.5) verwendet.

3.3.2.5 Virusinfektion und Probeninokulation

Alle Proben wurden vor der Inokulation mit 0,22 µm Filter steril-filtriert, um bakterielle Kontaminationen zu eliminieren. Nachdem die ausgesäten Zellen (siehe Abschnitt 3.3.2.2) eine Konfluenz von 80 %-90 % erreicht hatten, wurden diese mit entsprechendem Probenmaterial oder Positiv- und Negativkontrollen inokuliert. Das Wachstumsmedium wurde von den Zellen entfernt und mit un-supplementiertem DMEM ersetzt. Die Umweltprobe oder das aufgeschlossene Isolat (siehe Abschnitt 3.3.2.4) wurde auf die Zellen pipettiert, so dass der Inokulations- und Infektionsansatz einem Endvolumen von 500 µl/Well entsprach. Das HAdV5 Wildtyp wurde als Positivkontrolle verwendet, welches mit DMEM auf die entsprechende End-MOI (Multiplicity of Infection, Infektionsfaktor) von 0,5 verdünnt und den Zellen zugesetzt wurde.

Die für die gewünschte MOI benötigte Virusmenge wurde wie folgt bestimmt:

$$\text{Volumen Virus-Stammlösung (}\mu\text{l)} = (\text{MOI} \times \text{Gesamtzellzahl}) / \text{Virustiter (ffu}/\mu\text{l)}$$

Die Zellen wurden bis zur nächsten Infektionspassage für 72 Stunden inkubiert und anschließend geerntet (siehe Abschnitt 3.3.2.3). Für die indirekte Immunfluoreszenz (siehe Abschnitt 3.3.2.9) wurde das Infektionsmedium nach 1 Stunde entfernt und mit 2 ml Wachstumsmedium ersetzt. Die Zellen wurden bis zur Bildgebung für 48 Stunden inkubiert.

3.3.2.6 Virale DNA-Extraktion

Phenol-Chloroform-Extraktion

200 µl der Umweltprobe wurden für 1 Stunde bei 37 °C mit 7 µl RNase (10 mg/ml) auf dem Thermoblock verdaut. Danach wurden zu diesem Ansatz 7 µl Proteinase K (10 mg/ml) und 10 µl 10 % SDS hinzugegeben und über Nacht bei 37 °C inkubiert. Am Folgetag wurde der Verdau 2 Stunden bei 50 °C abgeschlossen. Die Extraktion erfolgte mit 200 µl Phenol-Chloroform, welches auf die Probe pipettiert wurde. Der Ansatz wurde gevortext und anschließend 5 min bei 10 °C und 14.800 U/min zentrifugiert. Die obere, wässrige Phase wurde in ein neues 1,5 ml Gefäß überführt und der restliche Ansatz mit 200 µl 10 mM Tris wie oben beschrieben mittels vortexen und zentrifugieren re-extrahiert. Die obere Phase wurde zum 1,5 ml Gefäß hinzugegeben. Diese Lösung wurde erneut mit 300 µl Chloroform extrahiert, gevortext und unter den oben genannten Bedingungen zentrifugiert. Die obere, wässrige Phase wurde in

ein frisches 1,5 ml Gefäß überführt und die virale DNA wurde mit 0,1 Vol 5 M Natriumazetat und 1 Vol 2-Propanol sowie mehrfachen Invertieren des Gefäßes gefällt. Die DNA wurde für 10 min bei 10 °C und 14.800 U/min pelletiert, mit 1 ml 75 % Ethanol gewaschen und der resultierende Niederschlag luftgetrocknet. Die DNA wurde in 10 mM Tris gelöst und für weitere Experimente bei 4 °C gelagert.

QIAamp DNA Blood Mini Kit Extraktion

Um eine schnellere und reinere DNA-Isolierung zu erzielen, wurde das QIAamp DNA Blood Mini Kit von Qiagen zur viralen DNA-Extraktion verwendet. 200 µl Proben, die entweder direkt aus der Umweltprobe stammten oder aus einer Infektionspassage geerntet wurde (siehe Abschnitte 3.3.2.3 und 3.3.2.4), wurden nach Angaben des Herstellers mithilfe der gestellten Puffer und des Säulenmaterials aufgearbeitet. In Kürze: die Probe wurde lysiert, mit Proteinase K verdaut und auf eine Silica-Gel Säule pipettiert. Unspezifische Partikel wurden mit zentrifugieren der Säule ausgewaschen während virale DNA an das Säulenmaterial spezifisch bindet. Nach mehrfachem Waschen wurde die virale DNA mit 50 µl AE Elutionspuffer des Herstellers von der Säule gelöst und mit zentrifugieren in einem 1,5 ml Gefäß aufgefangen, die DNA für weitere Experimente bei 4 °C gelagert.

3.3.2.7 RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit und quantitative RT-PCR

Zur Extraktion von SARS-CoV-2 RNA wurde das RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder® verwendet. Zuerst wurden 50 µl der Probe für 10 min bei 99 °C erhitzt und anschließend mithilfe des Kits nach Herstellerangaben aufgearbeitet. Sowohl Positiv- und Negativkontrollen als auch weitere RT-PCR-Komponenten wurden vom Kit gestellt und für die PCR Analyse verwendet. Die Isolate wurden in einem Gesamtvolumen von 10 µl auf eine 96-Well-Platte geladen und im QuantStudio™ 5 (ThermoFisher) analysiert. Sowohl das SARS-CoV-2 N- (Nukleoprotein) als auch das RdRp- (RNA-dependent RNA polymerase; RNA-abhängige RNA Polymerase) Gen wurden hier amplifiziert. Die resultierenden mittleren Ct-Werte (durchschnittlicher Schwellenzyklus) des N-Gens wurden zur Bestimmung positiver und negativer Treffer verwendet.

Es wurde folgendes Programm zur Amplifikation verwendet:

10 min 50 °C
1 min 95 °C, gefolgt von 45 Zyklen
10 s bei 95 °C,
1 min bei 60 °C

3.3.2.8 Quantitative RT-PCR für HAdV

Für die RT-PCR-Analyse wurde die isolierte adenovirale DNA (siehe Abschnitt 3.3.2.6) ohne Nachverdünnung aufgetragen. Für den Nachweis von HAdV DNA wurden pro Probe 5 µl LightCycler® 480 SYBR Green I Master (Roche) mit jeweils 0,5 µl Vorwärts- (fwd) und Rückwärts- (rev) Primern (30 pmol/µl) vermengt. Das Reaktionsgemisch wurde in 96-Well-Platten pipettiert und mit jeweils 4 µl isolierter viraler DNA beladen, wobei jede Probe in Triplikaten geladen wurde. Die vorhergesehene Abdichtung wurde auf die Platte geklebt, kurz runterzentrifugiert und anschließend im LightCycler® 480 Instrument II (Roche) analysiert.

Es wurde folgendes Programm zur adenoviralen DNA-Amplifikation verwendet:

10 min bei 95 °C, gefolgt von 40 Zyklen
30 s bei 95 °C,
30 s bei 62 °C und
30 s bei 72 °C

Die resultierenden Cp-Werte (durchschnittlicher Schwellenzyklus) wurden zur Bestimmung positiver und negativer Treffer verwendet. Als Positivkontrolle diente entweder genomische HAdV-Bacmid DNA oder DNA-Isolat aus HAdV-C5 infizierten Zellen und als Negativkontrolle wurde, je nach Extraktionsverfahren, 10 mM Tris (siehe Abschnitt 0) oder QIAamp AE Elutionspuffer (siehe Abschnitt 0) verwendet.

3.3.2.9 Indirekte Immunfluoreszenz

Die Zellen wurden auf 6-Well Platten konfluent gezüchtet (siehe Abschnitte 3.3.2.1 und 3.3.2.2) und inokuliert (siehe Abschnitt 3.3.2.5). Nach 48 Stunden wurden die Zellen geerntet (siehe Abschnitt 3.3.2.3), indem das Kulturmedium abgenommen wurde und der Zellrasen mit eisgekühltem Methanol (absolut) fixiert und permeabilisiert wurde. Die Zellen wurden für 15 min bei -20 °C inkubiert und anschließend bei RT luftgetrocknet. Unspezifische Antikörperbindungen wurden blockiert, indem die Zellen mit 500 µl 1x TBS-BG auf einem Schüttler bei 4 °C für 1 Stunde inkubiert wurden. Der Primärantikörper (HAdV Hexon) wurde in 1x PBS-T 1:2000 verdünnt. Jedes Well wurde mit 500 µl Hexonantikörper bedeckt und die Platten wurden 4 Stunden oder über Nacht auf einem Schüttler bei 4°C inkubiert. Anschließend wurden die Zellen dreimal mit PBS-T auf einem Schüttler bei RT gewaschen und daraufhin im Sekundärantikörper (Alexa-488), welcher 1:100 in PBS-T verdünnt wurde, inkubiert. Die Waschschritte wurden wiederholt und die Zellen zuletzt in PBS-T gelagert. Die Immunfluoreszenz-Bildgebung wurde an einem Mikroskop in 10- bis 40-facher Vergrößerung im Hellfeld und 488 nm Lichtkanal gemacht.

3.3.2.10 Beobachtung des zytopathischen Effekts (CPE)

Die Zellen wurden 80 % - 90 % konfluent gezüchtet (siehe Abschnitt 3.3.2.2) und für 72 Stunden inokuliert (siehe Abschnitt 3.3.2.5). Unter einem Lichtmikroskop mit 10-facher Vergrößerung wurden die Zellen über den Infektionsverlauf hinweg beobachtet und nach 72 Stunden zur Analyse des CPE verwendet. Die Proben wurden insgesamt zweimal geerntet/passagiert (siehe Abschnitt 3.3.2.3), aufgebrochen (siehe Abschnitt 3.3.2.4) und entsprechend dreimal infiziert (siehe Abschnitt 3.3.2.5), solange kein CPE beobachtet wurde.

3.3.3 Virennachweis

3.3.3.1 Quantitative Bestimmung von HAdV DNA in Umweltproben

Da HAdV Serotypen vielfältig in Umweltproben nachweisbar sind [27], wurden in dieser Studie Umweltproben auf die Anwesenheit von HAdV getestet. Es wurde erwartet, dass HAdV-DNA als interne Kontrolle dieser Studie nachzuweisen sei, um Aussagen über die Beprobungsorte sowie der Probenahme und -aufarbeitung machen zu können, um letztendlich eine Einschätzung zur SARS-CoV-2-Belastung in der Umwelt zu machen. Ebenso kann die Detektion von HAdV-DNA Aufschlüsse zur SARS-CoV-2-Detektionsmethode und der -schwelle geben. Dementsprechend wurde in einem ersten Schritt virale DNA isoliert und auf Anwesenheit von HAdV-DNA mithilfe von universell-funktionierenden HAdV-Primern getestet.

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der ersten quantitativen RT-PCR, welche auf die ersten Proben der Reihe E3452 angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind relativ zum DNA-Lösungsmittel, 10 mM Tris, welches ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 31, Negativ) fungierte. Die Positivkontrolle (Abbildung 31, Positiv) bestand aus HAdV-5 Plasmid-DNA in einer Endkonzentration von 50 fg/µl. Zu sehen ist, dass die Probe E3452-99 gering auf HAdV-DNA positiv getestet wurde. Alle anderen Proben zeigten

falsch-positives Hintergrundrauschen, da ebenfalls die Negativkontrolle geringfügig in der Reaktion angeschlagen hat. Im Vergleich dazu war das Signal der Positivkontrolle mehr als das 150-fache höher als der Wert der Probe E3452-99 (Abbildung 31).

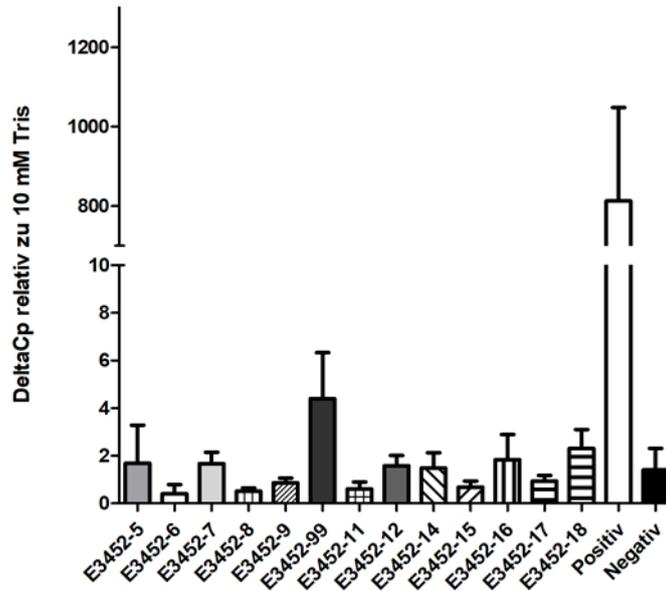


Abbildung 31: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben. Geringe Mengen an HAdV - DNA ist nachweisbar in Probe E3452-99. Alle weiteren Proben sind vergleichbar mit der Negativkontrolle. HAdV5 Wildtyp DNA wurde als Positivkontrolle verwendet (Endkonzentration 50 fg/μl) und 10 mM Tris als Negativkontrolle. Werte in delta Cp relativ zu 10 mM Tris. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

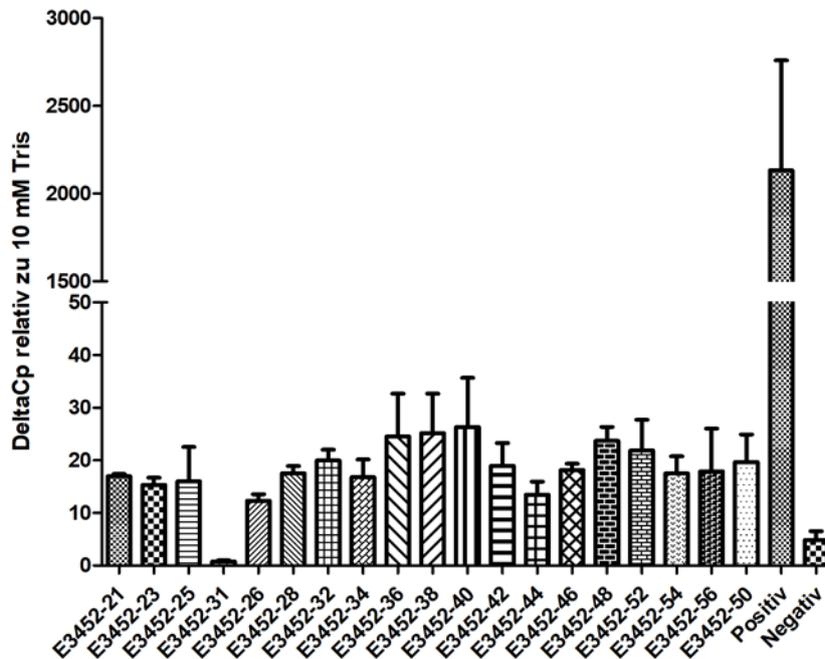


Abbildung 32: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben. Geringe Mengen an HAdV DNA ist nachweisbar. HAdV5 Wildtyp DNA wurde als Positivkontrolle verwendet (Endkonzentration 50 fg/μl) und 10 mM Tris als Negativkontrolle. Werte in delta Cp relativ zu 10 mM Tris. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der zweiten quantitativen RT-PCR, welche auf die Proben der Reihe E3452 angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind relativ zum DNA-Lösungsmittel, 10 mM Tris, welches ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 32, Negativ) fungierte. Die Positivkontrolle (Abbildung 32, Positiv) bestand aus HAdV-5 Plasmid-DNA in einer Endkonzentration von 50 fg/μl. Zu sehen ist, dass alle Proben außer E3452-31 geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden. Der Wert der Negativkontrolle liegt hierbei um 2 - 4-fache niedriger. Falsch-positives Hintergrundrauschen kann nicht eindeutig ausgeschlossen werden, da die geringe DNA-Konzentration der Positivkontrolle ein etwa 2.000-fach höheres Signal ergab (Abbildung 32).

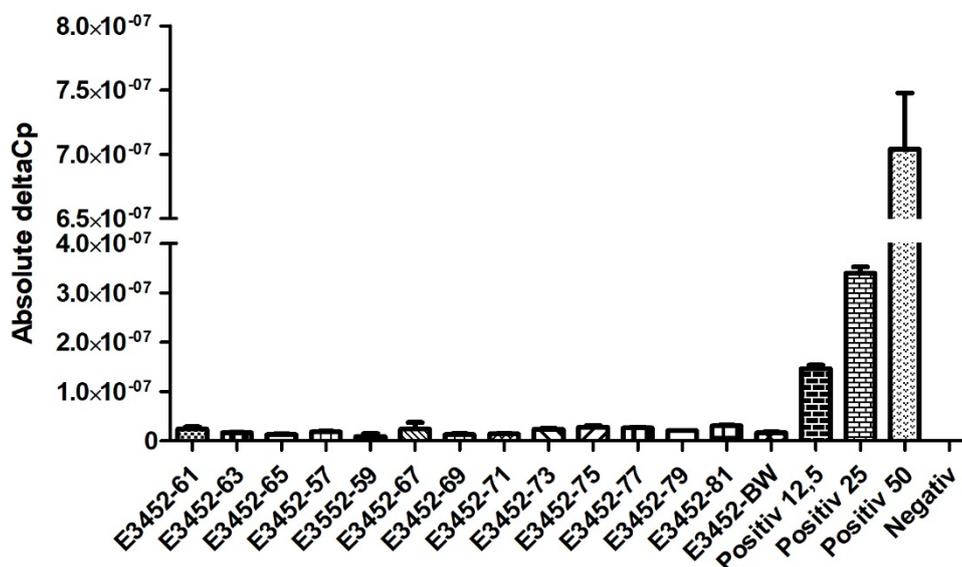


Abbildung 33: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben. Geringe Mengen an HAdV DNA ist nachweisbar. HAdV5 Wildtyp DNA wurde als Positivkontrolle verwendet (Endkonzentration 12,5, 25 und 50; Konzentration in fg/μl). Der AE Puffer wurde als Negativkontrolle verwendet. Werte als absolute delta Cp-Werte. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der dritten quantitativen RT-PCR, welche auf weitere Proben der Reihe E3452 (Abbildung 33, BW1) angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind absolute delta Cp-Werte, resultierend aus dem reinen, nicht-kontaminiertem AE Puffer des QIAamp Kits. AE fungierte ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 33, Negativ). Die Positivkontrolle (Abbildung 33, Positiv) bestand aus HAdV-5 Plasmid-DNA in einer Endkonzentration von 12,5, 25 und 50 fg/μl. Zu sehen ist, dass alle Proben geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden, wobei hier ebenfalls der Blindwert (BW) anschluss, sodass falsch-positive Ergebnisse nicht auszuschließen sind. Der Wert der Negativkontrolle liegt hierbei bei null. Ebenso kann falsch-positives Hintergrundrauschen nicht ausgeschlossen werden, da trotz der geringen DNA-Konzentrationen der Positivkontrollen, deren Werte etwa 1.000- bis 7.000-fach höher liegen (Abbildung 33).

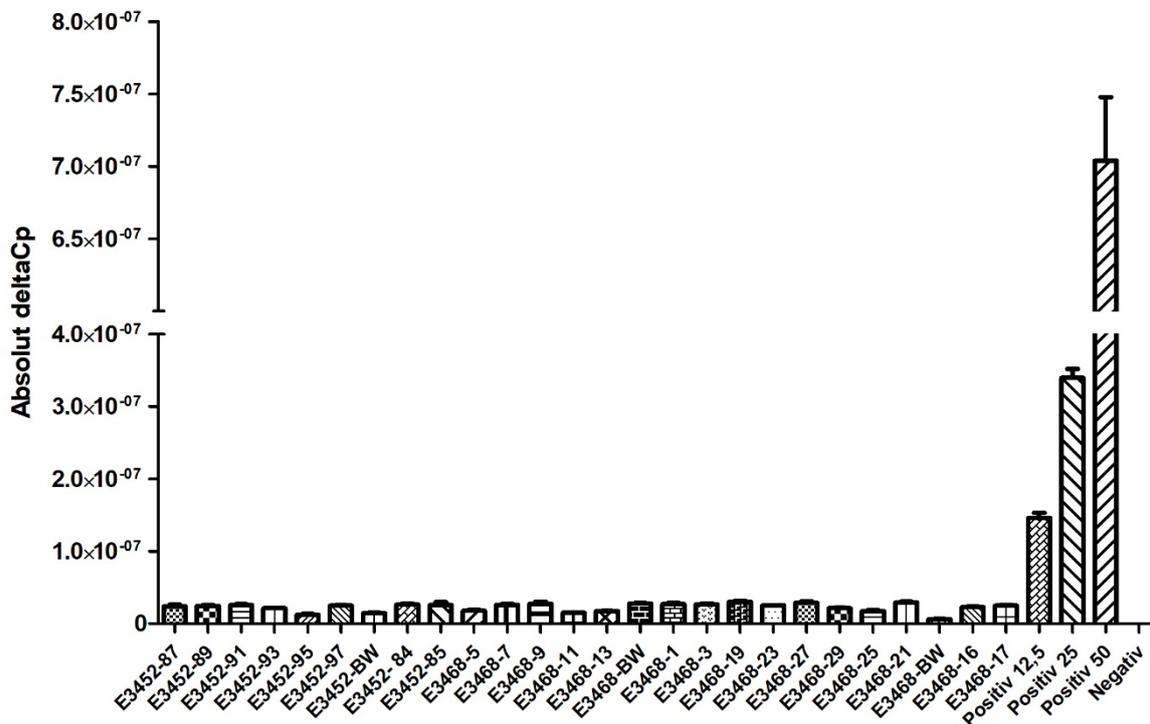


Abbildung 34: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben. Geringe Mengen an HAdV DNA sind nachweisbar. HAdV5 Wildtyp DNA wurde als Positivkontrolle verwendet (Endkonzentration 12,5, 25 und 50; Konzentration in fg/ μ l). Der AE Puffer wurde als Negativkontrolle verwendet. Werte als absolute delta Cp Werte. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der vierten quantitativen RT-PCR, welche auf die letzten Proben der Reihe E3452 und auf die Reihe E3468 angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind absolute delta Cp-Werte, resultierend aus dem reinen, nicht-kontaminierten AE Puffer des QIAamp Kits. AE fungierte ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 34, Negativ). Die Positivkontrolle (Abbildung 34, Positiv) bestand aus HAdV-5 Plasmid-DNA in einer Endkonzentration von 12,5 fg/ μ l, 25 fg/ μ l und 50 fg/ μ l. Zu sehen ist, dass alle Proben geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden, wobei hier ebenfalls der Blindwert (BW) geringfügig anschluss, sodass falsch-positive Ergebnisse nicht auszuschließen sind. Der Wert der Negativkontrolle liegt hierbei bei null. Ebenso kann falsch-positives Hintergrundrauschen nicht ausgeschlossen werden, da trotz der geringen DNA-Konzentrationen der Positivkontrollen, deren Werte etwa 1.000- bis 7.000-fach höher liegen (Abbildung 34).

3.3.3.2 Quantitative Bestimmung von SARS-CoV-2

Um eine Einschätzung zur SARS-CoV-2 Belastung an den beprobten Orten zu machen, wurde auf die Anwesenheit von SARS-CoV-2 genomischer RNA gemacht. Mithilfe des RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kits von PathoFinder® kann in kleinsten Probenmengen SARS-CoV-2 spezifisch nachgewiesen werden. Im Folgendem werden die Ergebnisse der quantitativen SARS-CoV-2 RT-PCR aufgezeigt.

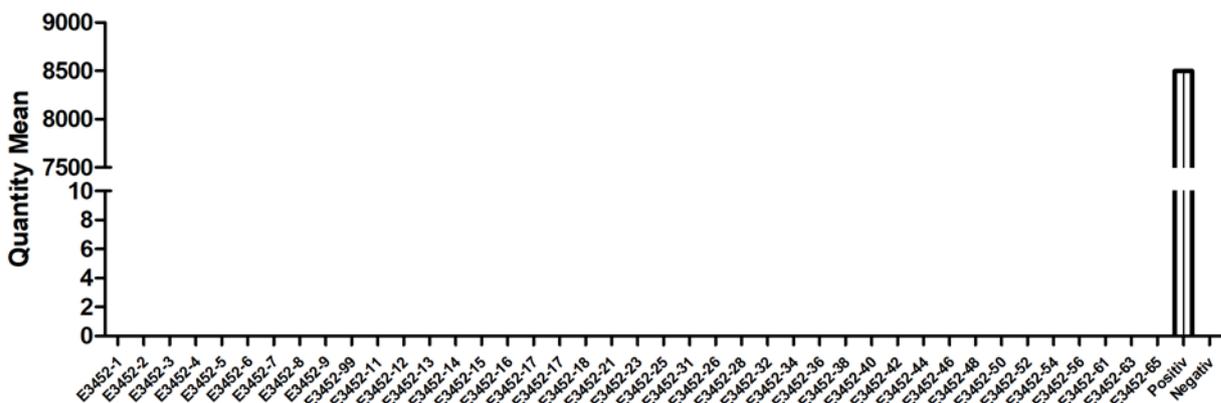


Abbildung 35: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben der Reihe E3452. Kein genetisches Material des SARS-CoV-2 war nachweisbar. Die SARS-CoV-2 Positiv- und Negativkontrolle stammte aus dem RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder® Werte als mittlere Ct-Werte (Quantity Mean) des N-Gen. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der quantitativen RT-PCR gegen SARS-CoV-2. Es wurden die Proben der Reihe E3452 aufgetragen. Die erhaltenen Werte sind mittlere Ct-Werte (Quantity Mean) für das SARS-CoV-2-Kontrollgen N. Positiv- und Negativkontrolle (Abbildung 35, Positiv und Negativ) stammen vom RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder®. Alle Proben waren negativ für SARS-CoV-2-Genome. Die Proben, die während der RT-PCR für das N-Gen leicht positiv anschlugen, wurden nach einem zweiten Lauf RT-PCR als falsch-positiv identifiziert und somit als absolut negativ für SARS-CoV-2 bestimmt (Abbildung 35).

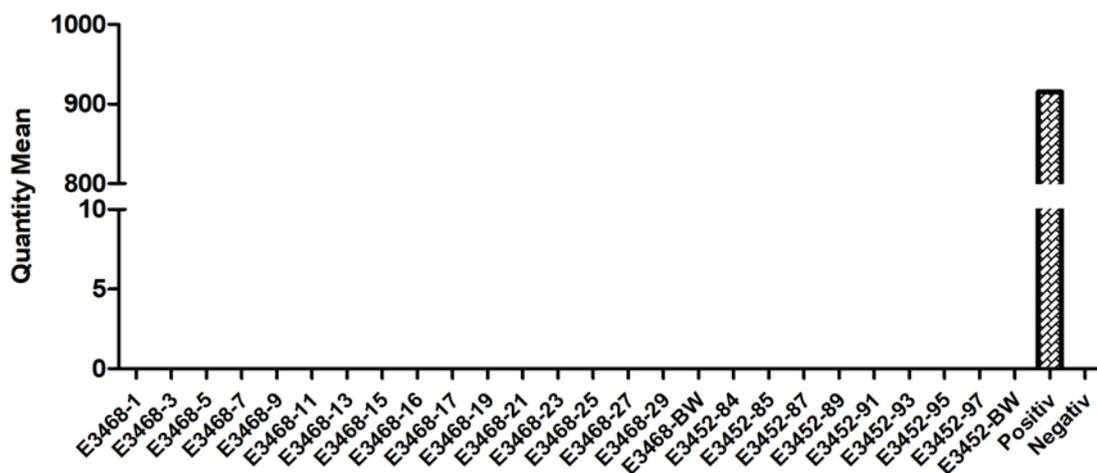


Abbildung 36: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben der Reihe E3452 und E3468. Kein genetisches Material des SARS-CoV-2 war nachweisbar. Die SARS-CoV-2 Positiv- und Negativkontrolle stammte aus dem RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder® Werte als mittlere Ct-Werte (Quantity Mean) des N-Gen. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der zweiten quantitativen RT-PCR gegen SARS-CoV-2. Es wurden die Proben der Reihen E3468- und E3452- aufgetragen. Die erhaltenen Werte sind mittlere Ct-Werte (Quantity Mean) für das SARS-CoV-2-Kontrollgen N. Positiv- und Negativkontrolle (Abbildung 36, Positiv und Negativ) stammen vom RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder®. Alle

Proben waren negativ für SARS-CoV-2-Genome. Die Proben, die während der RT-PCR für das N-Gen leicht positiv anschlagen, wurden nach einem zweiten Lauf RT-PCR als falsch-positiv identifiziert und somit als absolut negativ für SARS-CoV-2 bestimmt (Abbildung 36).

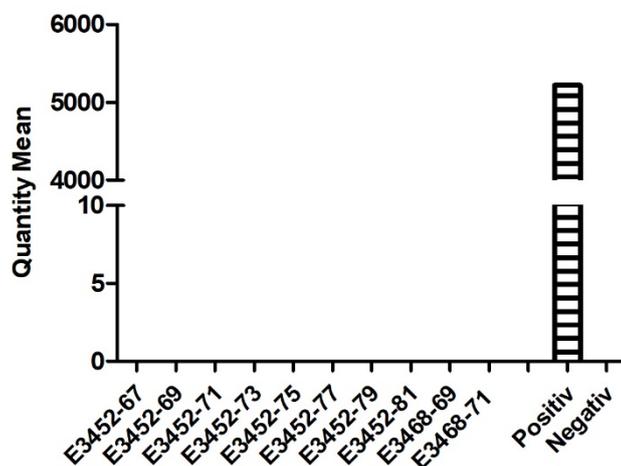


Abbildung 37: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben E3452- und E3468. Kein genetisches Material des SARS-CoV-2 war nachweisbar. Die SARS-CoV-2 Positiv- und Negativkontrolle stammte aus dem RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder® Werte als mittlere Ct-Werte des N-Gen (Quantity Mean). Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse der dritten quantitativen RT-PCR gegen SARS-CoV-2. Es wurden die Proben der Reihe E3452 und E3468 aufgetragen. Die erhaltenen Werte sind mittlere Ct-Werte (Quantity Mean) für das SARS-CoV-2 Kontrollgen N. Positiv- und Negativkontrolle (Abbildung 37, Positiv und Negativ) stammen vom RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit von PathoFinder®. Alle Proben waren negativ für SARS-CoV-2-Genome. Die Proben, die während der RT-PCR für das N-Gen leicht positiv anschlagen, wurden nach einem zweiten Lauf RT-PCR als falsch-positiv identifiziert und somit als absolut negativ für SARS-CoV-2 bestimmt. SARS-CoV-2-Genome konnten in keiner der Proben (Abbildung 37) nachgewiesen werden.

3.3.3.3 Nachweis der Vermehrungsfähigkeit der beprobten Viruspartikel

Nachweis von HAdV DNA aus Umweltproben nach Zellkultur-Inokulation

Da HAdV Serotypen vielfältig in Umweltproben nachweisbar sind [27], wurden neben der Untersuchung auf genetisches Material ebenso auf die Anwesenheit infektiöser HAdV getestet. Es wurde erwartet, dass infektiöse HAdV Partikel als interne Kontrolle dieser Studie nachzuweisen sind, um Aussagen über die Beprobungsorte sowie der Probenahme und -aufarbeitung machen zu können, um letztendlich eine Einschätzung zur SARS-CoV-2-Belastung und Infektionspotential in der Umwelt zu machen. Ebenso kann die Detektion von infektiösen HAdV Aufschlüsse zur SARS-CoV-2-Detektionsmethode und der -schwelle geben. Dementsprechend wurde nach Inokulation humaner HEK293 Zellen und nach zwei Passagen virale DNA isoliert und auf Anwesenheit von HAdV-DNA mithilfe von universellen HAdV-Primern getestet.

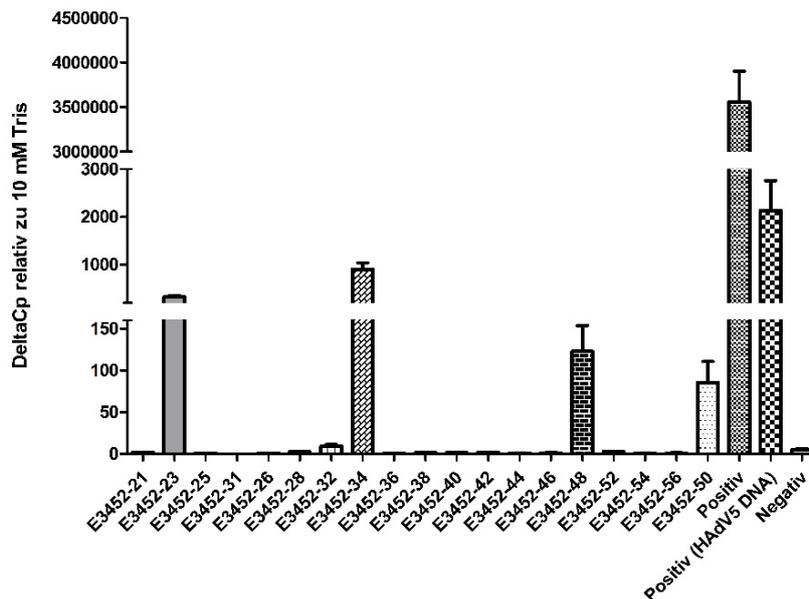


Abbildung 38: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation. Geringe Mengen an HAdV DNA ist nachweisbar. Die DNA des HAdV5 Wildtyp Virus (MOI 0,5) wurde als Positivkontrolle isoliert sowie HAdV5 Wildtyp DNA als vergleichbare Positivkontrolle verwendet (Endkonzentration 50 fg/ μ l). 10 mM Tris wurde als Negativkontrolle verwendet. Werte in delta Cp relativ zu 10 mM Tris. Positiv: positiv Kontrolle; Positiv (HAdV5 DNA): positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der quantitativen RT-PCR nach zwei Zellkulturpassagen, welche auf die ersten Proben der Reihe E3452 angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind delta Cp-Werte relativ zu 10 mM Tris. 10 mM Tris fungierte ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 38, Negativ). Die Positivkontrolle (Abbildung 38, Positiv und HAdV5 DNA) bestand entsprechend aus HAdV-5 Wildtyp infiziert mit einer MOI = 0,5 und HAdV5 DNA in einer Endkonzentration von 50 fg/ μ l. Zu sehen ist, dass die Proben E3452-23, -34, -48 und -50 geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden. Der Wert der Negativkontrolle liegt hier bei annähernd null. Falsch-positives Hintergrundrauschen kann nicht ausgeschlossen werden, da trotz der geringen DNA-Konzentrationen der Positivkontrolle, dessen Werte etwa um das $3,5 \times 10^2$ - 10^3 -fache höher liegen (Abbildung 38). Potentiell HAdV-positiv sind Proben E3452-23, -34, -48 sowie -50 und müssen mit indirekter Immunfluoreszenz weiter analysiert werden, um echt-positive Proben zu identifizieren.

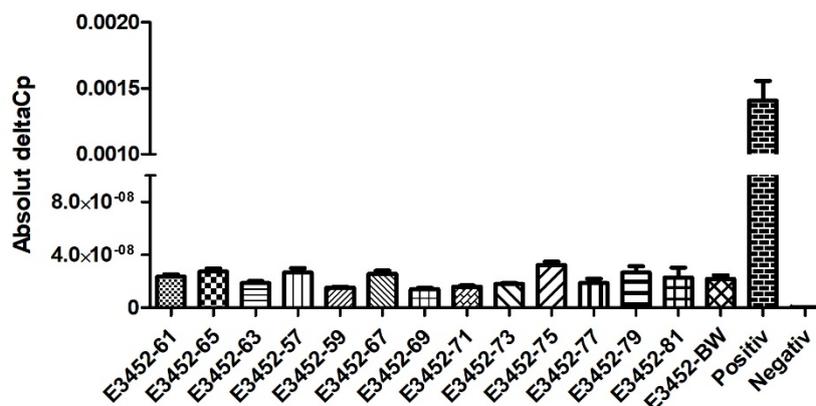


Abbildung 39: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation. Geringe Mengen an HAdV DNA sind nachweisbar. Die DNA des HAdV5 Wildtyp Virus (MOI 0,5) wurde als Positivkontrolle isoliert. Der AE Puffer wurde als Negativkontrolle verwendet. Werte als absolute delta Cp-Werte. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der quantitativen RT-PCR nach zwei Zellkulturpassagen, welche auf die Proben der Reihe E3452 angewandt wurden. Die erhaltenen Werte sind absolute delta Cp-Werte, resultierend aus dem AE Puffer des QIAamp Kits. AE fungierte ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 39, Negativ). Die Positivkontrolle (Abbildung 39, Positiv) bestand aus HAdV5 Wildtyp infiziert mit einer MOI = 0,5. Zu sehen ist, dass alle Proben geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden, wobei hier ebenfalls der Blindwert (BW) geringfügig anschluss, so dass falsch-positive Ergebnisse nicht auszuschließen sind. Der Wert der Negativkontrolle liegt hier bei null. Falsch-positives Hintergrundrauschen kann ebenso nicht ausgeschlossen werden, da trotz der geringen DNA-Konzentrationen der Positivkontrolle, dessen Werte etwa um das 1×10^5 -fache höher liegen (Abbildung 39). Eine eindeutig HAdV-positive Probe kann nicht identifiziert werden.

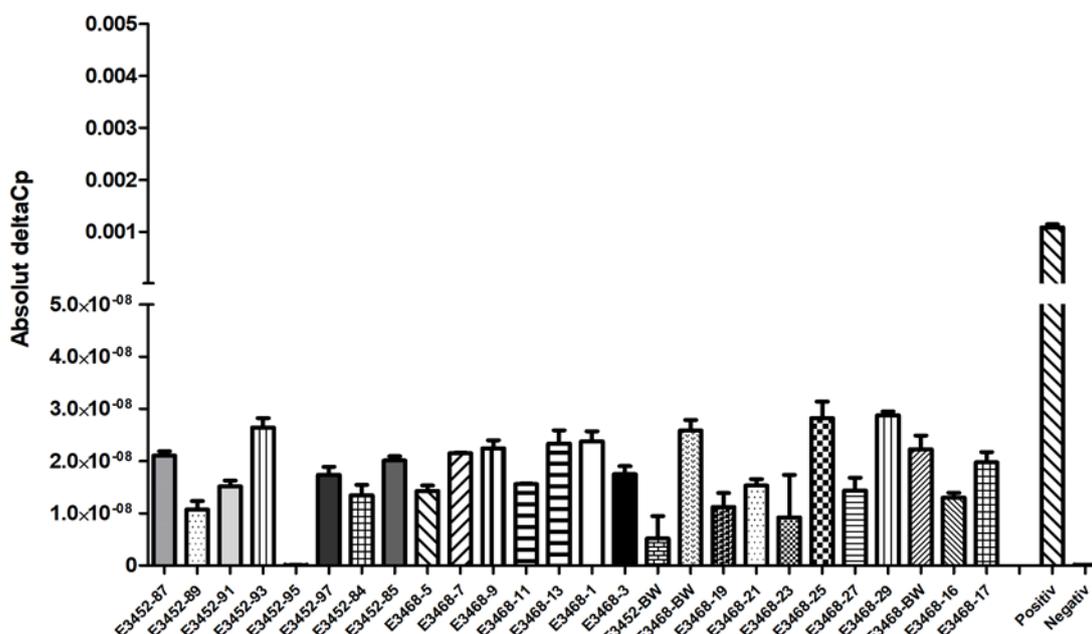


Abbildung 40: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation. Geringe Mengen an HAdV DNA sind nachweisbar. Die DNA des HAdV5 Wildtyp Virus (MOI 0,5) wurde als Positivkontrolle isoliert. Der AE Puffer wurde als Negativkontrolle verwendet. Werte als absolute delta Cp-Werte. Positiv: positiv Kontrolle; Negativ: negativ Kontrolle.

Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse der quantitativen RT-PCR nach zwei Zellkulturpassagen, welche auf die Proben der Reihen E3452 und E3468 angewandt wurde. Die erhaltenen Werte sind absolute delta Cp-Werte, resultierend aus dem AE Puffer des QIAamp Kits. AE fungierte ebenfalls als Negativkontrolle (Abbildung 40, Negativ). Die Positivkontrolle (Abbildung 40, Positiv) bestand aus HAdV5 Wildtyp infiziert mit einer MOI = 0,5. Zu sehen ist, dass alle Proben geringfügig auf HAdV-DNA positiv getestet wurden, wobei hier ebenfalls der Blindwert (BW) geringfügig anschluss, so dass falsch-positive Ergebnisse nicht auszuschließen sind. Der Wert der Negativkontrolle liegt hier bei null. Falsch-positiver Hintergrund kann ebenso nicht ausgeschlossen werden, da trotz der geringen DNA-Konzentrationen der Positivkontrolle, dessen Werte etwa um das $5-6 \times 10^5$ -fache höher liegen (Abbildung 40). Eine eindeutig HAdV-positive Probe kann nicht identifiziert werden.

Nachweis der infektiösen HAdV-Partikel durch indirekte Immunfluoreszenz

Zum Nachweis infektiöser HAdV wurden humane HEK293 Zellen mit den entsprechenden Proben inokuliert. Nach zwei Passagen wurden die potentiell infektiösen Proben geerntet und zur indirekten Immunfluoreszenz-Analyse aufgearbeitet. Die Bildgebung erfolgte nach 48 Stunden, indem das HAdV Hexonprotein markiert wurde. Folgende Abbildungen zeigen die Markierungsergebnisse jener Proben, die aus der gesamten Probenmenge als HAdV-positiv identifiziert wurden (Abbildung 41 und Abbildung 42).

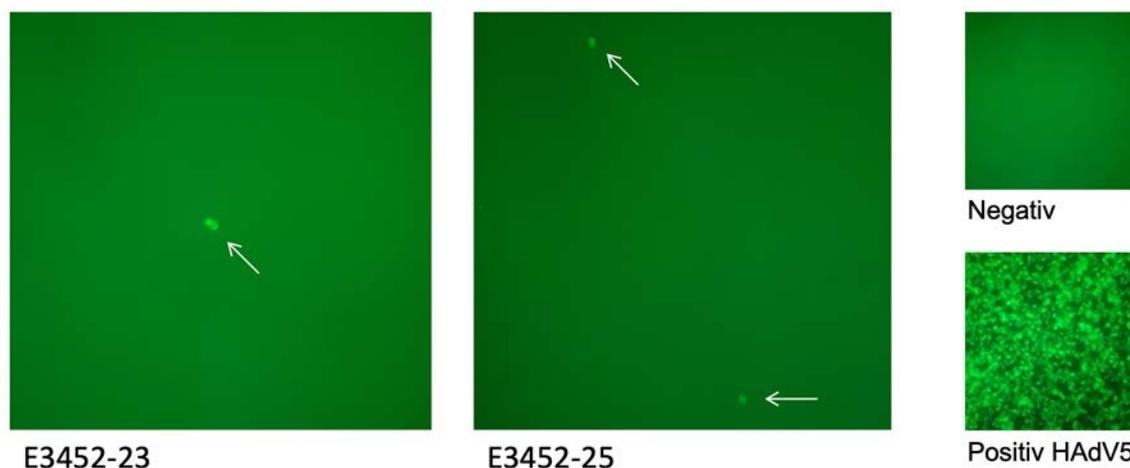


Abbildung 41: Indirekte Immunfluoreszenz gegen das HAdV Hexonprotein aus Proben E3452-23 und E3452-25 in humanen HEK293 Zellen. Weiße Pfeile zeigen auf HAdV-infizierte Zellen, welche positiv für das HAdV Hexonprotein sind und im Lichtkanal bei 488 nm hellgrün leuchten. Die nicht-infizierte Negativkontrolle (Negativ) zeigt keine positiven Zellen. Die Positivkontrolle (Positiv HAdV) wurde mit HAdV5 Wildtyp infiziert (MOI = 0,5) und zeigt eine flächendeckende Infektion, sichtbar anhand der hellgrünen Zellen. Objektiv mit 10-facher Vergrößerung. Bilder zeigen einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Zellkulturgefäß.

Abbildung 41 zeigt die indirekte Immunfluoreszenz-Markierung gegen das HAdV Hexonprotein aus den Proben MS4 und MS6 in humanen HEK293 Zellen. Weiße Pfeile zeigen auf HAdV-infizierte Zellen, welche positiv für das HAdV Hexonprotein sind und im Lichtkanal bei 488 nm hellgrün leuchten (Abbildung 41, E3452-23 und E3452.25). Die nicht-infizierte Negativkontrolle (Negativ) zeigt keine positiven Zellen (Abbildung 41, Negativ). Die Positivkontrolle (Positiv HAdV5) wurde mit HAdV5 Wildtyp infiziert (MOI = 0,5) und zeigt eine flächendeckende Infektion, sichtbar anhand der hellgrünen Zellen (Abbildung 41, Positiv HAdV5). Die Kontrollen zeigen einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Zellkulturgefäß. Positive HAdV Zellen der Probe E3452-23 waren in drei Bildausschnitten im gesamten 6-Well Gefäß zu sehen. In der Probe E3452-25 waren fünf Bildausschnitte mit HAdV-positiven Zellen im gesamten 6-Well Gefäß zu finden (Abbildung 41).

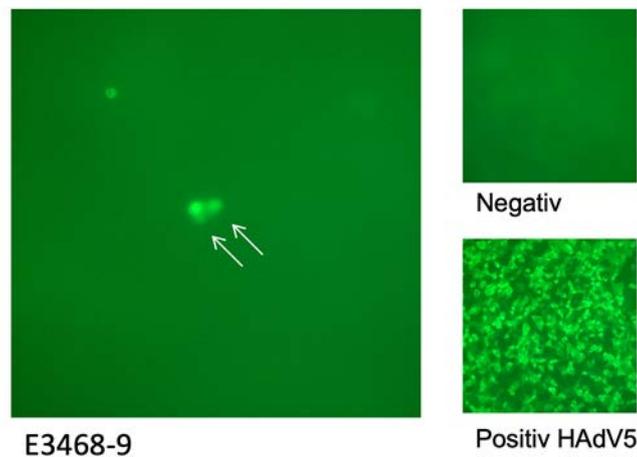


Abbildung 42: Indirekte Immunfluoreszenz gegen das HAdV Hexonprotein aus der Probe E3468-9 in humanen HEK293 Zellen. Weiße Pfeile zeigen auf HAdV-infizierte Zellen, welche positiv für das HAdV Hexonprotein sind und im Lichtkanal bei 488 nm hellgrün leuchten. Die nicht-infizierte Negativkontrolle (Negativ) zeigt keine positiven Zellen. Die Positivkontrolle (Positiv HAdV) wurde mit HAdV5 Wildtyp infiziert (MOI = 0,5) und zeigt eine flächendeckende Infektion, sichtbar anhand der hellgrünen Zellen. Objektiv mit 10-facher Vergrößerung. Die Kontrollen zeigen einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Zellkulturgefäß.

Abbildung 42 zeigt die indirekte Immunfluoreszenz-Markierung gegen das HAdV Hexonprotein aus der Probe E3468-9 in humanen HEK293 Zellen. Weiße Pfeile zeigen auf HAdV-infizierte Zellen, welche positiv für das HAdV Hexonprotein sind und im Lichtkanal bei 488 nm hellgrün leuchten (Abbildung 42, E3468-9). Die nicht-infizierte Negativkontrolle (Negativ) zeigt keine positiven Zellen (Abbildung 42, Negativ). Die Positivkontrolle (Positiv HAdV5) wurde mit HAdV5 Wildtyp infiziert (MOI = 0,5) und zeigt eine flächendeckende Infektion, sichtbar anhand der hellgrünen Zellen (Abbildung 42, Positiv HAdV5). Die Kontrollen zeigen einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Zellkulturgefäß. Positive HAdV Zellen der Probe E3468-9 waren nur in diesem einen Bildausschnitt im gesamten 6-Well Gefäß zu finden (Abbildung 42).

Nachweis infektiöser SARS-CoV-2-Partikel

Da die RT-PCR-Daten zur Analyse von SARS-CoV-2 eindeutig negative Ergebnisse lieferten, wurden weitere Infektionsstudien mit diesen Proben nicht eingeleitet. Es kann davon ausgegangen werden, dass SARS-CoV-2 in allen gesammelten Proben nicht ausreichend vorhanden oder stabil war, um sowohl nachweisbares genetisches Material als auch infektiöse Partikel mit intakten Genomen nachweislich zu hinterlassen.

3.4 Molekularbiologische Untersuchungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik

3.4.1 Quantitativer Nachweis von SARS-CoV-2

Der Nachweis von Virusgenom mittels RT-qPCR besteht aus drei Schritten. Die Träger der Erbinformation (RNA im Falle von SARS-CoV-2) werden aus den Proben extrahiert. Anschließend werden die extrahierten RNA-Fragmente amplifiziert, also durch eine Polymerase-Kettenreaktion vermehrt und detektiert. Im dritten Schritt erfolgt eine automatisierte Auswertung der detektierten Nukleotidsequenzen.

3.4.1.1 Extraktion von Nukleinsäuren (RNA)

Die eingefrorenen Proben wurde aufgetaut und die RNA extrahiert. Die Extraktion erfolgte mit einem halbautomatischen Extraktionsgerät unter Verwendung des entsprechenden Extraktionskits (QIAcube HT, QIAamp® 96 Virus QIAcube® HT Kit, beide Qiagen).

Je Probe sind dazu 200 µl der Ausgangssuspension notwendig. Die Swab-Eluate konnten unmittelbar verwendet werden. Die Filter wurden entsprechend der Arbeitsanweisung des Geräteherstellers in eine homogene Suspension überführt. Dazu wurden die Filter jeweils in eine Suspension bestehend aus 3200 µl Virenpuffer und 240 µl Proteinase K unter sterilen Bedingungen in eine sterile Petrischale gegeben, verschlossen und innerhalb weniger Minuten bei gelegentlichem manuellem Schütteln aufgelöst. Als interner Standard wurde die Phage MS2 eingesetzt. Die erhaltene Flüssigkeit mit der extrahierten RNA (ca. 2 µl) wurde unmittelbar weiterverwendet bzw. bis zur weiteren Verwendung bei -78 °C eingefroren.

3.4.1.2 RT-qPCR

Die Extrakte wurden einer RT-qPCR unterzogen und entsprechend der Herstellervorschrift auf die Anwesenheit von SARS-CoV-2 geprüft (QuantStudio 5, TaqPath™ COVID 19 CE IVD RT PCR Kit, beide Thermo-Fisher). Für eine Analyse sind jeweils 10 µl der Extraktionslösung notwendig. Die Verwendung des internen Standards (Phage MS2) dient der Überprüfung, ob die vorangegangene Extraktion erfolgreich war.

3.4.1.3 Analyse des Ergebnisses der RT-qPCR

Das Ergebnis wird mittels Software (COVID19-Interpretive Software 2.3, Thermo-Fisher) analysiert. Bei der RT-qPCR wird nach drei unterschiedlichen Gen-Abschnitten (Targets) auf dem Virusgenom gesucht: ORF1-Gen, S-Gen und N-Gen. Bei Vorhandensein werden diese amplifiziert (vermehrt). Darüber hinaus gibt der Verlauf der Reaktion (Menge der amplifizierten Genabschnitte) Hinweise auf die Anzahl der ursprünglich vorhandenen RNA-Kopien. Damit eine Probe als positiv eingestuft wird, müssen mindestens zwei der Targets positiv sein, nur dann ist ein SARS-CoV-2-Nachweis eindeutig. Ist nur ein einzelnes Target positiv, wird das Ergebnis von der Software als negativ interpretiert. Eine Wiederholung der Reaktion ist dann empfohlen. In einzelnen Fällen kann es bei der Amplifikation (Vermehrung der Nukleotidsequenzen) zu Artefakten kommen, die das Auswerteprogramm als positives Einzel-Signal deutet, was schließlich zu einem ambivalenten Auswertergebnis führen kann. Zu Beginn der Amplifikation kann es zum Auftreten von sog. Welleneffekten kommen, die zu ambivalenten Auswertergebnissen führen können.

3.4.2 Ergebnisse

3.4.2.1 Luftkeimsammlung

Fahrzeuge

In der Innenraumluft der beprobten Schienen- und Straßenfahrzeuge konnte zum Zeitpunkt der Probenahme kein SARS-CoV-2 nachgewiesen werden. Die Probe mit der Kennung E3452-68 (Innenraumluft in der S-Bahn S3 auf der Fahrt von Holzkirchen Bhf. nach München-Lochhausen) konnte trotz wiederholtem Testdurchlauf nicht analysiert werden. Dies weist auf die Anwesenheit von Hemmstoffen in der Probe hin, die die Extraktion der RNA aus der Probe verhindern. Alle anderen Proben waren eindeutig negativ. Bei einzelnen Proben wurde ein einzelnes SARS-CoV-2-Gen, auch bei Wiederholung des Laufs, positiv markiert. Der Nachweis nur eines Gens stellt einen negativen Befund dar.

Stationäre Einrichtungen

In der Innenraumluft der drei beprobten Bahnhöfe konnte zum Zeitpunkt der Probenahme SARS-CoV-2 nicht nachgewiesen werden.

3.4.2.2 Beprobung von Oberflächen

Fahrzeuge

Auf den beprobten Oberflächen der Schienen- und Straßenfahrzeuge konnte zum Zeitpunkt der Probenahme SARS-CoV-2 nicht nachgewiesen werden.

Stationäre Einrichtungen

Auf den beprobten Oberflächen konnte zum Zeitpunkt der Probenahme SARS-CoV-2 nicht nachgewiesen werden.

3.5 Zusammenfassung der molekular- und mikrobiologischen Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Forschungseinrichtungen TUM und IBP beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- In den Luftproben konnte kein SARS-CoV-2 nachgewiesen werden.
- In den Wischproben konnte kein SARS-CoV-2 nachgewiesen werden.
- In Teilen der Luft- und Wischproben konnten HAdV in geringer Konzentration nachgewiesen werden. Aufgrund der geringen nachgewiesenen Konzentrationen an Virus-Genom können falsch positive Ergebnisse nicht sicher ausgeschlossen werden.
- Teilweise waren die HAdV in den Proben noch vermehrungsfähig.

Die Untersuchungen der TUM hinsichtlich HAdV zeigten, dass bei den Luft- als auch bei den Wischproben HAdV mittels PCR in geringer Menge nachgewiesen werden konnte und diese z. T. auch noch vermehrungsfähig waren (Haltestange und Türgriff in der U-Bahn, A-Wagen, Handlauf einer Fahrtreppe, S-Bahnhof München Hbf., siehe Anhang). Daraus ergibt sich, dass die angewandten Probennahmeverfahren für die vorliegende Fragestellung geeignet sind.

Bereits am 30.11.2020 galt die Verpflichtung, in den Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs eine Mund-Nasen-Bedeckung zu tragen. Ab dem 18.01.2021 wurden die Maßnahmen in Bayern verschärft: im öffentlichen Personennahverkehr gilt die Pflicht zum Tragen einer FFP2-Maske. Vor diesem Hintergrund lassen die Messergebnisse folgende Interpretationen zu:

- 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 Probenahme keine infizierten Personen unterwegs.
- Die obligatorischen Schutzmaßnahmen greifen und führen zu einer deutlichen Verringerung an virushaltigen Aerosolpartikeln in der Luft. Dies gilt nicht nur für SARS-CoV-2, sondern für aerosolgetragene Viren generell.
- Ggf. eingeleitete Hygienemaßnahmen der Betreiber wie z. B. häufigere Reinigung von Oberflächen in Fahrzeugen und stationären Einrichtungen zeigen die erwünschte Wirkung und führen zu einer Verringerung der Virenlast auf Oberflächen.

4 Validierung der Simulation

Die erhobenen physikalisch-chemischen Daten flossen in die Modellentwicklung unter AP 2 (Teil C) ein. Die Validierung des zonalen Modells erfolgte anhand des Verlaufs der im Rahmen der Messkampagne ausgehend vom Großraum München ermittelten CO₂-Konzentrationen. Die Ergebnisse der Validierung sind im Teil C [28] detaillierter beschrieben.

Die Validierungen zeigen, dass sich das zonale Modell sowohl für die Simulation von Schienen- als auch von Straßenfahrzeugen eignet und auch die Verhältnisse in unterirdischen Bahnhöfen gut abgebildet werden können. Parameter, wie z. B. Nutzereingriffe in die Lüftungssteuerung oder eine mögliche Abhängigkeit der Lüftung von der Motordrehzahl oder der Fahrtgeschwindigkeit bei Straßenfahrzeugen, werden im Modell nicht erfasst und könnten die Ursache für Abweichungen zwischen Modell und Messung sein.

4.1 ICE

Der Wagen, in dem die Messung stattfand, war während der Fahrt mit 9 bis maximal 14 Fahrgästen besetzt. Die größte Abweichung zwischen Simulation und Messung betrug kurzfristig ca. 150 ppm. Ansonsten zeigte sich eine insgesamt gute Übereinstimmung der Simulation mit den gemessenen CO₂-Konzentrationen. Auch das Schließen der Frischluftzufuhr bei der Fahrt durch den Tunnel kurz vor Erfurt konnte mit dem zonalen Modell mit guter Genauigkeit abgebildet werden.

4.2 Regionalzug und S-Bahn

Die Modellvalidierung erfolgte anhand der vorliegenden Strömungssimulationsdaten des Herstellers Alstom. Daten der Messkampagne wurden für diese Modellvalidierung nicht herangezogen. Das zonale Modell konnte das Raumklima hinreichend genau abbilden. Lediglich im Bodenbereich weicht das zonale Modell von der Strömungssimulation des Herstellers ab, was aber hinsichtlich des Infektionsrisikos als nicht relevant angesehen wird. Die Modellvalidierung für den Regionalzug ist auch für die S-Bahn gültig.

4.3 U-Bahnen

Der Modellierung des älteren U-Bahnmodells (A-Wagen) liegt eine Fahrt von München Großhadern nach Kieferngarten zugrunde. Die Belegung nahm zur Stadtmitte hin zu und dann im weiteren Verlauf der Fahrt wieder ab. Der Volumenstrom wurde anhand der CO₂-Messungen mit ca. 1.200 m³/h abgeschätzt. Auch hier ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

Für die Überprüfung des Simulationsmodells für das aktuelle U-Bahnmodell (C2-Wagen) wurde die CO₂-Konzentrationen einer Messfahrt in der Gegenrichtung (Kieferngarten nach München Großhadern) herangezogen. Die Luftmenge für den Heizfall wurde mit 2.100 m³/h angesetzt. Auch hier zeigt sich eine insgesamt gute Übereinstimmung von Messung und Simulation.

4.4 Fernbus

Die CO₂-Konzentration auf der Fahrt von München nach Lindau, die für die Validierung herangezogen wurde, schwankt stark. Der Bus war ca. zur Hälfte besetzt. Der Frischluftvolumenstrom wurde mit 700 m³/h ermittelt. Im Gegensatz zum tatsächlichen Konzentrationsverlauf ergibt die Simulation einen gleichmäßigen Verlauf der CO₂-Konzentration. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung kann z. B. durch Benutzereingriffe oder Eingriffe des Fahrers in die Lüftungsregelung bedingt sein, die das Modell nicht abbilden kann. Eine Abhängigkeit der Lüftung von der Fahrtgeschwindigkeit könnte die Schwankungen ebenfalls erklären.

4.5 Stadtbus

Die Validierungsmessung fand auf einem 12 m Standardbus statt. Der Bus war bei der Messfahrt ca. zur Hälfte besetzt. Dabei wurden anhand der CO₂-Konzentrationen Frischluftmengen unterhalb der Herstellerangaben errechnet. Die aus der Validierung rückgerechnete Frischluftmenge betrug 768 m³/h. Für den Bereich 3–8 Minuten ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Zu Beginn und zum Ende der Fahrt weichen Messung und Simulation ab, wobei die gemessenen Konzentrationen in diesen Bereichen unterhalb der errechneten liegen.

4.6 Straßenbahn

Die Validierung des zonalen Modells für die Straßenbahn erfolgte für die Fahrtstrecke von München St. Veit Platz nach München Hauptbahnhof Nord. Die maximale Auslastung betrug ca. 50 %. Simulation und Messwerte zeigen eine gute Übereinstimmung.

4.7 Bahnhof oberirdisch

Die gemessenen CO₂-Konzentrationen lagen nur geringfügig über der CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft, so dass eine Validierung der Simulation nicht möglich war.

4.8 Bahnhof unterirdisch

Das zonale Modell wurde anhand des U-Bahnhofs München Odeonsplatz validiert. Die gemessene und simulierte CO₂-Konzentration stimmten für die angenommene Belegung gut überein.

5 Ableitung eines Maßnahmenkatalogs

Für SARS-CoV-2 sind bislang drei Hauptübertragungswege bekannt:

- die Infektion im Nahbereich kleiner 1,5 m durch Tröpfchen,
- die Infektion durch virushaltige Aerosole und
- von untergeordneter Bedeutung die Schmierinfektion.

Damit ergeben sich drei Maßnahmenbündel:

- Vergrößern des Abstands von Person zu Person und das Zurückhalten von Tröpfchen,
- Schutz vor virushaltigen Aerosolen,
- Entfernung oder Inaktivierung von virushaltigen Tröpfchen auf Oberflächen.

Wie in AP 2 bereits gezeigt wurde, lässt sich in den Fahrzeugen ein Abstand von 1,5 m oder mehr von Person zu Person nicht einhalten. Die Schienenfahrzeuge im Nahverkehr sind auf einen wesentlich geringeren Abstand zwischen den Reisenden ausgelegt als die Fahrzeuge für den Regional- und Fernverkehr. Bei Anwesenheit einer erkrankten Person ist eine Infektion im Nahbereich ohne ausreichende persönliche Schutzmaßnahmen in den Fahrzeugen bei entsprechend langer gemeinsamer Fahrt nicht zu verhindern.

Eine medizinische Maske („OP-Maske“) nach [29] ist in der Lage, größere Tröpfchen zurückzuhalten. Den Ausstoß oder das Einatmen von Aerosolen kann mit einer medizinischen Maske reduziert, aber nicht effektiv verhindert werden. Die Simulationen in AP 2 haben ebenfalls gezeigt, dass das Tragen von gutschitzenden FFP2-Masken nach [30] und der Verzicht auf lautes Sprechen in den Fahrzeugen die wirksamste Infektionsschutzmaßnahme darstellt. Technische Lösungen wie die Erhöhung des Luftwechsels, Erhöhung des Frischluftanteils oder die Behandlung des Umluftanteils (Filtration, UV-C-Strahlung, Plasma oder Ionisation) können unterstützend wirken und reduzieren das Risiko für Fahrgäste in größerer Entfernung von der infizierten Person, sind aber nicht so effektiv wie die Kombination aus dem Tragen einer gutschitzenden FFP2-Maske mit dem gleichzeitigen Verzicht auf lautes Sprechen.

In den Stationen könnten insbesondere in den Wartebereichen mit Sitzgelegenheiten größere Abstände realisiert werden, indem z. B. jede zweite Sitzgelegenheit gesperrt oder der Abstand zwischen den Sitzgelegenheiten vergrößert wird. Diese Maßnahmen sind in erster Linie gegen die Übertragung im Nahbereich wirksam.

5.1 Organisatorische und betriebliche Maßnahmen

Die Ergebnisse der mikro- und molekularbiologischen Untersuchungen in diesem Arbeitspaket geben keine validen Hinweise, welche weitergehenden Maßnahmen noch getroffen werden sollten, um das Infektionsrisiko im öffentlichen Personenverkehr zu verringern, da in keiner Probe SARS-CoV-2 nachgewiesen werden konnte. Grundsätzlich ist hier jedoch anzumerken, dass die Messkampagne zu einer Zeit stattfand, als schon weitreichende Beschränkungen und Vorgaben in Kraft getreten waren. D. h. organisatorische oder betriebliche Maßnahmen wie die Verringerung der Belegungsdichte der Fahrzeuge, der Einsatz des kompletten Fuhrparks trotz reduziertem Fahrgastaufkommen, eine Erhöhung der Reinigungsfrequenz und eine Intensivierung der Reinigung waren bereits umgesetzt.

Das Tragen von FFP2-Masken zählt zu den effektivsten Maßnahmen, um das Infektionsrisiko mit aerosolgebundenen Erregern zu verringern. Gerade auf längeren Fahrten wird das Tragen von FFP2-Masken

aber als belastend empfunden. Längere Maskenpausen auf Bahnhöfen stellen eine Maßnahme dar, die für Fahrgäste eine Erleichterung darstellt und die Compliance der Fahrgäste unterstützen kann. Während der Maskenpausen sind selbstverständlich die Abstandsregeln einzuhalten. Eine Anpassung der Fahrplangestaltung ist dahingehend wünschenswert, dass längere Maskenpausen auf Bahnhöfen möglich werden. Die Maskenpausen könnten über die Anzeigesysteme in den Zügen oder die entsprechenden Apps der Bahnbetreiber den Reisenden angezeigt werden. Angesichts der hohen Komplexität der Fahrplangestaltung und der internationalen Verzahnung handelt es dabei aber um eine Maßnahme, die nicht kurzfristig umsetzbar ist.

In Wartebereichen mit einem geringen Luftaustausch kann die Vergrößerung der Abstände zwischen den Sitzplätzen das Infektionsrisiko mit Tröpfchen im Nahbereich verringern.

Im Bereich von Umsteigebahnhöfen (z. B. U-Bahnhof Odeonsplatz) fahren Züge häufig fast zeitgleich ein und aus, um den Fahrgästen einen Linienwechsel ohne Zeitverlust zu ermöglichen. Diese Situationen führen zu einer Ansammlung vieler Menschen auf dem Bahnsteig und auf den zu- und abführenden Fahrtreppen. Die Einhaltung eines Mindestabstands ist unter diesen Bedingungen meist nicht möglich. Ob ein Zeitversatz von wenigen Minuten die Situation zumindest an den Zu- und Abgängen etwas entschärfen könnte, wäre in weiteren Untersuchungen zu prüfen. Hier gilt es abzuwägen, inwieweit eine Veränderung der Taktung insbesondere in Zeiten hoher Auslastung zu einer Verringerung der Transportkapazität führt und damit im Sinne der Infektionsprävention kontraproduktiv wirkt.

5.2 Technische Maßnahmen

In den Fahrzeugen können ein reiner Frischluftbetrieb bzw. die Filterung oder Behandlung der Umluft mit UV-C-Strahlung zur Senkung der Erregerlast beitragen. Wie in AP 2 gezeigt, profitieren in erster Linie Fahrgäste, die sich in größerer Entfernung vom infizierten Fahrgast befinden, von dieser Maßnahme. In der näheren Umgebung der infizierten Person sind diese technischen Maßnahmen weniger wirksam. Die Erhöhung des Frischluftanteils kann je nach Auslegung der Lüftungsanlage möglich sein. Die Filterung oder Behandlung des Umluftanteils erfordert Eingriffe in die Fahrzeugtechnik und ist daher kurzfristig nicht umsetzbar. Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge sollten diese Fragestellungen aber berücksichtigt werden. Im Winter führt reiner Frischluftbetrieb ohne gleichzeitige Befeuchtung zu einer Absenkung der relativen Luftfeuchte, da kalte Außenluft erwärmt wird und damit deren relative Luftfeuchte sinkt. Dies kann insbesondere bei langen Fahrten in gewissem Ausmaß kontraproduktiv sein, da eine niedrige Luftfeuchte zu einem Austrocknen der Schleimhäute des oberen Atemtrakts führen kann, was wiederum die Anfälligkeit für Infektionen der Atemwege erhöht.

5.3 Hygienekonzepte

Ein Hygienekonzept kann als Kombinationen aus betrieblichen, organisatorischen, technischen und psychologischen Maßnahmen verstanden werden. Ein Hygienekonzept ist auf eine definierte Situation angepasst und es kann begründet angenommen werden, dass es in dieser Situation das Infektionsrisiko für die Fahrgäste verringert.

Auf ihrer Website führt beispielsweise die MVG [31] folgende Maßnahmen auf, die vom Betreiber zum Schutz der Fahrgäste ergriffen werden:

- Regelmäßige und gründliche Reinigung der Fahrzeuge und Stationen,
- Besondere Reinigung der Berührflächen,

- Regelmäßige Lüftung der Fahrzeuge,
- Automatische Öffnung der Türen wo technisch möglich,
- An Endhaltestellen bleiben die Türen geöffnet,
- Kontaktloser Ticketkauf per App,
- Verwendung von Trennscheiben in den Kundencentern,
- Trennscheiben am Fahrerplatz in den Bussen: der Einstieg an den vorderen Türen bleibt möglich,
- Installation von Hygienestationen mit Desinfektionsmittelspendern in U-Bahnhöfen,
- Test von neue Hygienemaßnahmen (z. B. UV-Desinfektion von Handläufen an Rolltreppen),
- Fahrplan- und Platzangebot wird, soweit möglich, aufrechterhalten,
- Auslastungsmelder bietet die Möglichkeit, vor Fahrtbeginn die voraussichtliche Auslastung auf der gewählten Strecke zu überprüfen,
- Erinnerung der Fahrgäste an die Einhaltung der Regeln über verschiedene Kanäle.

Außerdem weist die MVG ihre Fahrgäste auf ein pandemiegerechtes Verhalten hin:

- FFP2-Maske oder Maske mit vergleichbarer Schutzwirkung tragen,
- Handhygiene,
- Husten und niesen in die Armbeuge,
- Auf unnötige Fahrten verzichten,
- Stoßzeiten meiden,
- Gedränge vermeiden: zum Ein- und Aussteigen alle Türen nutzen,
- Sitzplätze versetzt belegen,
- Klappfenster der Fahrzeuge möglichst geöffnet lassen,
- Während der Fahrt oder beim Warten nicht essen und trinken,
- Längere Telefonate auf einen anderen Zeitpunkt verschieben,
- Gespräche vermeiden,
- Digitale Dienste nutzen,
- Corona-Warn-App verwenden.

Die wesentlichen Punkte des Vorgehens der MVG lassen sich auf die meisten Verkehrsträger übertragen:

- Reduzierung der direkten Kontakte von Fahrgästen mit dem Personal durch den Einsatz digitaler Dienste,
- Räumliche Trennung von Personal und Fahrgästen,
- Verringerung der Berührungen von Oberflächen z. B. durch automatische Öffnung aller Türen,
- Verringerung der Auslastung der Fahrzeuge durch Einsatz des kompletten Fuhrparks auch bei geringem erwarteten Fahrgastaufkommen,
- Signalisierung der Auslastung,
- Reinigung von Fahrzeugen und stationären Einrichtungen,
- Erhöhung des Frischluftanteils, Öffnen aller Türen an den Haltestellen und
- Verhaltenshinweise für die Fahrgäste.

5.4 Am Markt verfügbare Technologien

Am Markt sind unterschiedliche Technologien verfügbar, die zur Umsetzung der technischen Maßnahmen angewandt werden können. Die wichtigsten Techniken zur Behandlung der Umluft sind Filtrationseinheiten und Luftbehandlungsgeräte auf Basis von UV-C-Strahlung oder Kalt- bzw. Niedertemperaturplasma.

Beim Einsatz von Filtermedien (Klassifizierung nach [32]) ist zu beachten, dass die Medien mit dem höchsten Abscheidegrad auch den größten Druckverlust verursachen und bei deren Einsatz ggf. kein ausreichender Volumenstrom mehr sichergestellt werden kann. Die Verwendung von Filtermedien mit einem geringeren Abscheidegrad bei einem höheren Luftdurchsatz kann dann zielführend sein, wenn die Möglichkeit zum Einsatz leistungsstärkerer Ventilatoren aus Platzgründen oder wegen des höheren Energiebedarfs nicht möglich ist. Filtermedien müssen in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden.

Der Einbau von UV-C-Behandlungsstrecken in den Umluftstrom stellt eine Möglichkeit zur Inaktivierung von Viren und Mikroorganismen dar [33, 34]. Damit die im Umluftstrom enthaltenen Viruspartikel effektiv inaktiviert werden können, darf die dafür notwendige Strahlungsdosis nicht unterschritten werden. Die benötigte Strahlungsdosis ist abhängig von der Virus- bzw. Erregerart. Aus der Strahlungsintensität der UV-C-Quelle und der Verweilzeit des Viruspartikels in der Bestrahlungszone ergibt sich die Strahlungsdosis, der ein Viruspartikel beim Durchlaufen der Bestrahlungszone ausgesetzt ist. Die Viren werden bei diesem Verfahren nicht abgeschieden, sondern inaktiviert, d. h. sie sind nach Durchlaufen der Behandlungsstrecke nicht mehr in der Lage, in Zellen einzudringen bzw. können in den Wirtszellen nicht mehr vermehrt werden, da ihr Genom durch die UV-C-Strahlung geschädigt wurde. UV-C-Strahlungsquellen verlieren mit zunehmender Betriebsdauer an Intensität und müssen deshalb regelmäßig ausgetauscht werden.

Luftbehandlungseinheiten, die Kalt- oder Niedertemperaturplasma einsetzen, sind ebenfalls zur Inaktivierung von Erregern geeignet und können in den Umluftstrom eingebaut werden. Beim Einsatz dieser Technologie ist darauf zu achten, dass keine gesundheitlich bedenklichen Beiprodukte wie Ozon oder Stickoxide freigesetzt werden [35, 36], die in der Lage sind, mit anderen Stoffen in der Innenraumluft zu reagieren und unerwünschte flüchtige organische Verbindungen zu bilden.

5.5 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In der vorliegenden Untersuchung konnte die Frage nach der Resuspendierung von bereits auf Oberflächen abgeschiedenen Viren nicht untersucht werden. In der aktuellen Literatur sind z. T. lange Verweilzeiten von SARS-CoV-2 und eine zwar abnehmende aber dennoch vorhandene Infektiosität auf unterschiedlichen Oberflächen beschrieben [37–40]. Es ist nicht klar, ob diese Ergebnisse ohne Anpassungen auf die Bedingungen im Personenverkehr übertragbar sind und inwieweit abgesetzte und wieder aufgewirbelte Viruspartikel ein Infektionsrisiko darstellen und wenn ja, wie dieses zu bewerten ist. Die Möglichkeit der Resuspendierung alleine lässt auch hier noch keine Aussage über die Infektiosität der Viruspartikel zu. Hier könnten in einem ersten Schritt Arbeiten mit nicht humanpathogenen Modellviren (MS2 als Modell für den Noro-Virus [41] oder Bakteriophage Phi6 als Modell für behüllte Viren wie SARS-CoV-2 [42]) in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt werden.

Auf technologischer Seite wäre die Entwicklung von antiviral wirksamen Oberflächen wünschenswert. Es werden bereits viele Oberflächenmaterialien und Gegenstände wie z. B. Türdrücker und -griffe oder die Innenseiten von Kühlschränken mit dem Attribut „antimikrobiell“ beworben. Allerdings gibt es keine Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der antimikrobiellen Wirkung und keine Untersuchungen hinsichtlich der viruziden Eigenschaften. Neben der Entwicklung schnell wirkender, antiviraler Oberflächenmaterialien und -beschichtungen werden realitätsnahe und standardisierbare Nutzungs- oder Belastungsszenarien als wesentliche Bausteine für eine standardisierte Untersuchung der Dauerhaftigkeit einer antiviralen Wirkung benötigt.

Eine weitere technologische Entwicklung stellt ein System zur Signalisierung der Auslastung der einzelnen Fahrzeuge eines einfahrenden Zugs auf dem Bahnsteig dar, möglichst gekoppelt mit Maßnahmen, die eine „Einbahnstraßenregelung“ beim Zu- und Ausstieg aus Zügen ermöglicht. Dazu könnten Belegungssensoren in den Sitzen analog zu den Belegungssensoren, die im Pkw das Signal zum Anlegen des Sicherheitsgurtes aktivieren, genutzt werden. Die Erfassung der Auslastung der Stehplätze könnte durch berührungslose Sensoren an der Fahrzeugdecke oder an den Gepäckablagen realisiert werden.

5.6 Zielrichtung öffentlicher Forschungsförderung

Ziel der öffentlichen Forschungsförderung sollte die Finanzierung von Vorhaben zur Abklärung grundlegender Prozesse wie z. B. der Resuspendierung von auf Oberflächen abgeschiedenen virushaltigen Aerosolen und deren Infektiosität sein.

Während der Messkampagne wurde erkennbar, dass es trotz der Bemühungen der Betreiber zur Vermeidung von Personenansammlungen doch immer wieder zu einer Pulkbildung insbesondere an den Türen kommen kann. Daher ist es wünschenswert, Untersuchungen zu fördern, in welchen Grenzen und mit welchem Aufwand eine Steuerung von Fahrgastströmen möglich ist. Die Konzept- und Produktentwicklungen zur Fahrgastlenkung wird daher ebenfalls als unterstützungswürdig durch die öffentliche Forschungsförderung angesehen. Bei der Fahrgastlenkung muss ein multidisziplinärer Ansatz unter Einbeziehung der Fachrichtungen Psychologie, Ingenieurwissenschaften, Innenraumhygiene, Mikrobiologie und Epidemiologie verfolgt werden, um die Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen ausreichend sicher belegen zu können.

Die oben beschriebenen Untersuchungen zeigen das Bild hinsichtlich der Innenraumlufthygiene unter Pandemie-Bedingungen mit einer stark verringerten Fahrgastzahl, der Nutzung von medizinischen oder FFP2-Masken und die Anstrengungen der Betreiber, das Infektionsrisiko in ihren Fahrzeugen und Stationen möglichst zu minimieren. Es fehlen aber Daten zur hygienischen Situation in den Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs unter Normalbedingungen. Sobald die Maßnahmen zur Pandemiebekämpfung beendet sind, wird eine hygienische Bestandsaufnahme der Einrichtungen im öffentlichen Personenverkehr empfohlen. Diese Erhebung sollte alle Jahreszeiten erfassen und hinsichtlich der zu beprobenden Viren und anderer Organismen breiter angelegt werden. Damit wird eine Datenbasis geschaffen, auf der technologische Entwicklungen für hygienische urbane Oberflächen und hygienische Fahrzeuginnenräume für den öffentlichen Personenverkehr aufsetzen können.

6 Diskussion

6.1 Luftqualität

Die Luftqualität in den Fahrzeugen, beurteilt auf der Basis von CO₂-Konzentrationen [3], kann in der überwiegenden Anzahl der Fälle als hygienisch unbedenklich klassifiziert werden. Wurden höhere CO₂-Konzentrationen festgestellt, so bewegten sich diese immer noch im Konzentrationsbereich kleiner 2.000 ppm; sie sind damit als hygienisch auffällig zu qualifizieren. Es muss daher bei den vorgefundenen Umständen nicht mit einer Anreicherung von Aerosolpartikeln in den Fahrzeugen gerechnet werden. Die Lüftungseinrichtungen waren durchwegs in der Lage, den zusätzlichen Eintrag von CO₂ beim Zustieg von Fahrgästen in kurzer Zeit zu verringern. Bei der Beurteilung der Messwerte ist zu berücksichtigen, dass die Auslastung der Fahrzeuge deutlich geringer war als vor der Pandemie.

In den untersuchten Fernzügen und im Fernbus dient die CO₂-Konzentration als Parameter, anhand dessen die Lüftung gesteuert wird. Durch die geringe Auslastung der Züge auf der Strecke München Hbf. – Erfurt Hbf. und zurück wurde keine CO₂-Konzentration erreicht, die eine Überprüfung der Regelung zugelassen hätte; die Lüftung lief nur im Grundlastbetrieb. Selbst beim Schließen der Luftzufuhr bei den Tunnelpassagen erreichte die CO₂-Konzentration aufgrund der geringen Auslastung nicht den Maximalwert von 1.580 ppm. Die Lüftungsregelung im Fernbus ist laut Herstellerangaben auf einen Maximalwert von 1.200 ppm eingestellt. Trotzdem traten immer wieder CO₂-Spitzenkonzentrationen über dem Maximalwert auf, deren Ursache nicht ermittelt werden konnte. Eingriffe des Fahrers, Motordrehzahl oder Fahrtgeschwindigkeit könnten hierfür verantwortlich sein.

6.2 Aerosole

Die Bestimmung der Aerosolpartikel-Konzentration im Rahmen der Luftkeimsammlung haben gezeigt, dass Aerosolpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner oder gleich 0,5 µm zahlenmäßig den größten Anteil an den Aerosolpartikeln in den Fahrzeugen und stationären Einrichtungen ausmachen. Das ist vor dem Hintergrund, dass Partikel dieser Größe alveolengängig sind, von Bedeutung. Sind diese Aerosolpartikel mit SARS-CoV-2 beladen, können sie direkt mit der Atemluft in die tiefen Atemwege und die Alveolen transportiert werden.

Nachdem bislang die für eine Infektion notwendige Anzahl an SARS-CoV-2 nicht bekannt ist, kann aus den Partikelanzahlkonzentrationen nicht direkt auf ein Infektionsrisiko geschlossen werden. Hinzu kommt, dass der Nachweis von Virus-Genom keine Aussage darüber zulässt, wie viele vermehrungsfähige Viren sich in einer Probe befinden. Daraus ergibt sich, dass eine niedrige Aerosolkonzentration und die schnelle Entfernung von Aerosolen durch die Lüftung anzustreben sind, da so das Infektionsrisiko durch aerosolgetragene Viren verringert werden kann. Die Untersuchungen zur Aerosoldynamik im Raum Braunschweig – Hannover zeigten, dass die Lüftungseinrichtungen in den Fahrzeugen in der Lage sind, die z. B. beim Ein- und Ausstieg der Fahrgäste auftretenden Aerosolkonzentrationen schnell abzusinken.

6.3 SARS-CoV-2 und HAdV

Die Untersuchungen haben keinen Nachweis für die Anwesenheit von SARS-CoV-2 in der Innenraumluft von Fahrzeugen und Bahnhöfen des öffentlichen Personenverkehrs erbracht. Auch die beprobten Oberflächen in den Fahrzeugen und auf Bahnhöfen waren zum Zeitpunkt der Probenahme frei von SARS-CoV-2. Die zur Kontrolle aus denselben Proben durchgeführten Untersuchungen auf HAdV zeigten positive Befunde auf einem sehr niedrigen Niveau. Falsch positive Ergebnisse konnten nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Zum geringen Teil waren die auf Oberflächen gesammelten HAdV noch vermehrungsfähig. Diese positiven HAdV-Befunde hinsichtlich der Vermehrungsfähigkeit belegen, dass die eingesetzten Probenahmeverfahren für die zu bearbeitende Fragestellung geeignet sind. Die molekular und mikrobiologischen Befunde lassen zudem die Interpretation zu, dass die eingeleiteten Maßnahmen der Betreiber (Erhöhung des Frischluftanteils und der Reinigungsfrequenz, automatisches Öffnen der Türen, Verringerung der Auslastung durch Einsatz des vollen Fuhrparks, etc.) und die von den Fahrgästen ergriffenen bzw. vom Gesetzgeber angeordneten persönlichen Schutzmaßnahmen die Virenbelastung im öffentlichen Personenverkehr reduziert haben und auch die Einhaltung der AHA-Regeln zur Verringerung der Viruskontamination in der Luft und auf Oberflächen beitragen.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausschließlich stichprobenartige Messungen durchgeführt werden konnten. D. h. die Messergebnisse gelten für das untersuchte Fahrzeug bzw. die untersuchte Einrichtung am Ort der Probenahme und zum Zeitpunkt der Messung bzw. Probenahme. Um eine generelle Aussage über die Luftqualität in den Fahrzeugen und stationären Einrichtungen treffen zu können, sind breiter angelegte Untersuchungen unabdingbar. Solche Untersuchungen sollten den Fuhrpark und die stationären Einrichtungen in der Breite miteinbeziehen und die unterschiedlichen Tageszeiten berücksichtigen. Die Luftprobenahme sollte innerhalb jedes Fahrzeugs an unterschiedlichen Messpunkten und an jedem Messpunkt in unterschiedlichen Höhen erfolgen, um z. B. die Belastung von stehenden und sitzenden Fahrgästen ebenso zu berücksichtigen wie die von Kindern. Für die molekularbiologischen Untersuchungen wurden Probenvolumina zwischen 1.500 l und 6.000 l gezogen, was einer Probenahmedauer von mindestens 30 min entspricht. Bei der Luftkeimsammlung sollten im Rahmen einer breiter angelegten Untersuchung und zur Erhöhung der Aussagekraft an jeder Probenahmestelle mehrere Parallelproben ggf. mit unterschiedlichen Luftvolumina gezogen werden.

6.4 Validierung

Die Validierung der Simulation zeigte eine zufriedenstellende bis gute Übereinstimmung der Simulation mit den ermittelten CO₂-Konzentrationen. Der Vorteil des zonalen Modells liegt in der auf einem Standard-PC moderaten Rechenzeit. Das ermöglicht die Parametrierung also die Berechnung unterschiedlicher Szenarien oder Ansätze. Je feiner das Modell auflösen soll, umso mehr Rechenzeit pro Parametersatz wird benötigt. Es konnte gezeigt werden, dass sich das zonale Modell zur Risikoabschätzung einer Infektion mit SARS-CoV-2 in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs eignet und es möglich ist, die Schutzwirkung einzelner Maßnahmen mithilfe der Simulationsdaten zu quantifizieren und gegeneinander abzuwägen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die experimentellen Untersuchungen dieser Studie wurden überwiegend unter Lockdown-Bedingungen durchgeführt. Dies 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 MNB bzw. von medizinischen Masken oder FFP2-Masken (in Bayern im Nahverkehr seit dem 18.01.2021).

Die Untersuchungen zur Innenraumhygiene und zur Aerosoldynamik in verschiedenen Fahrzeugen (Stadtbus, Regiobus, Straßenbahn, Stadtbahn, Regionalbahn) im Raum Braunschweig – Hannover konnten zeigen, dass die aus hygienischen Gründen empfohlene Maximalkonzentration von weniger als 1.000 ppm im Durchschnitt in den Fahrzeugen 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 CO₂-Konzentration als hygienisch inakzeptabel eingestuft. Mit Ausnahme des Fernbusses, bei dem die CO₂-Konzentration dauerhaft über 1.000 ppm lag, treffen diese Ergebnisse auch auf die Messungen ausgehend vom Großraum München zu.

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

Die CO₂-Konzentration im oberirdischen Bahnhof lag auf Außenluftniveau, in unterirdischen Bahnhöfen betrug sie während der Probenahme maximal 587 ppm. Sie liegen damit im hygienisch unauffälligen Bereich.

Die Luftkeimsammlung in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs im Großraum München und auf der ICE-Strecke München Hbf. – Erfurt Hbf. ergaben keine Hinweise auf eine Belastung der Innenraumluft mit SARS-CoV-2. Gleiches gilt für die Luft in ober- und unterirdischen Bahnhöfen. Die Beprobung häufig berührter oder der Ausatemluft ausgesetzter Oberflächen ergab ebenfalls keinen Hinweis auf eine Kontamination mit SARS-CoV-2. Sowohl in der Innenraumluft von Fahrzeugen und Bahnhöfen als auch in den Wischproben konnten häufig vorkommende HAdV in geringer Menge nachgewiesen werden, wobei falsch positive Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden können. Die HAdV waren zu einem geringen Teil noch vermehrungsfähig.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass zum Zeitpunkt der Untersuchung und in den untersuchten Fahrzeugen und Einrichtungen das Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion bei Einhaltung der Schutz- und Hygienemaßnahmen im öffentlichen Personenverkehr nicht gegeben war.

Technische Weiterentwicklungen, die dazu beitragen können, das Infektionsrisiko mit aerosolgetragenen Erregern im öffentlichen Personenverkehr zu verringern, betreffen die Lüftungsanlagen in den Fahrzeugen, Anzeigesysteme für die Belegung einzelner Fahrzeuge und schnell wirkende antimikrobielle Materialien für häufig berührte Oberflächen. Nachdem auch aufgrund der inzwischen das Infektionsgeschehen dominierenden Mutante B.1.1.7 noch nicht mit einem Ende der Pandemie zu rechnen ist, sollten sowohl Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Lenkung von Fahrgastströmen angestoßen als auch grundlegende Fragen wie die der Resuspendierung sedimentierter Aerosolpartikel bearbeitet werden.

Abbildungsverzeichnis Teil D

Abbildung 1: Verschiedene thermische Komfortzonen für Innenräume.....	229
Abbildung 2: Position der Messgeräte im Linienbus 411 der BSVG am 4.12.2020.....	230
Abbildung 3: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.....	232
Abbildung 4: Zeitliche Profile der CO ₂ -Konzentrationen bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.....	232
Abbildung 5: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der Buslinie 411 (04.12.2020) und der Straßenbahnlinie 3 (08.12.2020) der BSVG.....	233
Abbildung 6: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG. ...	234
Abbildung 7: Zeitliche Profile der CO ₂ -Konzentrationen bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG.....	234
Abbildung 8: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der Straßenbahnlinie 10 (01.03.2021) und der Ringbuslinie 419 (04.03.2021) der BSVG.	235
Abbildung 9: Liniennetzplan der WestfalenBahn (Ausschnitt). Messungen erfolgten am 08.12.2020 auf der Strecke zwischen Braunschweig und Hannover.....	236
Abbildung 10: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte und CO ₂ bei Messungen in der WestfalenBahn (14.12.2020, Vormittag) auf der Strecke Braunschweig – Hannover – Braunschweig.....	236
Abbildung 11: Zeitliche Profile der Partikelkonzentrationen bei Messungen in der WestfalenBahn (14.12.2020, Vormittag) auf der Strecke Braunschweig – Hannover und Hannover – Braunschweig.....	237
Abbildung 12: Zeitliche Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).....	238
Abbildung 13: Zeitliche Profile der CO ₂ -Konzentrationen bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).....	238
Abbildung 14: Zeitliche Profile der Partikelkonzentration bei Messungen in der Stadtbahnlinie 4 der ÜSTRA am 09.03.2021 (Vormittag und Nachmittag).....	238
Abbildung 15: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte, CO ₂ und Partikelkonzentration bei Messungen in der Regiobuslinie 500 der ÜSTRA (09.03.2021, Vormittag).....	239
Abbildung 16: Zeitliche Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchte, CO ₂ und Partikelkonzentration bei Messungen in der unterirdischen Haltestelle der Stadtbahn am Hauptbahnhof Hannover (09.03.2021, Vormittag).....	239
Abbildung 17: Verlauf der Partikelanzahl-Konzentrationen und der CO ₂ -Konzentrationen. links: Fahrt im ICE 4 München Hbf. – Erfurt Hbf., rechts Fahrt im ICE 3 Erfurt Hbf. – München Hbf.	253
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte in einer Regionalbahn (Talent 2). links: München Hbf. – Garmisch-Partenkirchen Bhf., rechts Garmisch-Partenkirchen Bhf. – München Hbf.....	253

Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und der CO ₂ -Konzentration. links: München Hbf. – Garmisch-Partenkirchen Bhf., rechts Garmisch-Partenkirchen Bhf. – München Hbf.	254
Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte. links: Holzkirchen Bhf. – München Pasing Bhf., rechts München Lochhausen – Holzkirchen Bf.	255
Abbildung 21: Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO ₂ -Konzentration. links: Holzkirchen Bhf. – München Pasing Bhf., rechts München Lochhausen – Holzkirchen Bhf.	255
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte in zwei Zügen der U-Bahnlinie U6. links: A-Wagen von Klinikum Großhadern nach Garching Forschungszentrum, rechts: C2-Wagen von Garching Forschungszentrum nach Klinikum Großhadern.	256
Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO ₂ -Konzentration. links: A-Wagen von Klinikum Großhadern nach Garching Forschungszentrum, rechts: C2-Wagen von Garching Forschungszentrum nach Klinikum Großhadern.	257
Abbildung 24: Beprobung einer Straßenbahn der Linie 21. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Verlauf der CO ₂ -Konzentration.	257
Abbildung 25: Beprobung eines 12 m Standardbusses nach dem Einrücken zum Schichtende. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO ₂ -Konzentration.	258
Abbildung 26: Beprobung eines Gelenkbusses der Linie 68/58 auf der Fahrt von München Hbf. Süd – München Silberhornstraße (als Linie 68) – München Universität (als Linie 58). links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Konzentration.	259
Abbildung 27: Beprobung eines Fernbusses auf der Strecke von München ZOB nach Lindau Reutin. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl-Konzentration und der CO ₂ -Konzentration.	260
Abbildung 28: München Hauptbahnhof Bahnsteig zwischen Gleis 16 und Gleis 17. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Konzentration.	260
Abbildung 29: S-Bahnhof München Hauptbahnhof. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Konzentration.	261
Abbildung 30: U-Bahnhof München Odeonsplatz, U-Bahngeschoss U3/U6. links: Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte, rechts: Zeitlicher Verlauf von Partikelanzahl-Konzentration und CO ₂ -Konzentration.	262
Abbildung 31: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben.	267
Abbildung 32: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben.	268
Abbildung 33: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben.	268
Abbildung 34: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA aus Umweltproben.	269
Abbildung 35: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben der Reihe E3452.	270
Abbildung 36: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben der Reihe E3452 und E3468.	270
Abbildung 37: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter genomischer RNA für SARS-CoV-2 aus den Proben E3452- und E3468.	271

Abbildung 38: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation.....	272
Abbildung 39: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation.....	272
Abbildung 40: Quantitative RT-PCR basierend auf isolierter viraler DNA nach zwei Passagen Zellinokulation.....	273
Abbildung 41: Indirekte Immunfluoreszenz gegen das HAdV Hexonprotein aus Proben E3452-23 und E3452-25 in humanen HEK293 Zellen.	274
Abbildung 42: Indirekte Immunfluoreszenz gegen das HAdV Hexonprotein aus der Probe E3468-9 in humanen HEK293 Zellen.....	275
Abbildung 43: Liniennetzplan der BSVG.....	310
Abbildung 44: Liniennetzplan der Stadtbahn Hannover1.	311
Abbildung 45: Liniennetzplan der Busse in Hannover (Ausschnitt).....	312

Tabellenverzeichnis Teil D

Tabelle 1: Orientierende Messung in Fahrzeugen des Fernverkehrs (ICE 3 und ICE 4).....	243
Tabelle 2: Messfahrt in Fahrzeugen des Regionalverkehrs (Talent 2)	244
Tabelle 3: Messfahrt in Fahrzeugen der S-Bahn München (ET-423).....	245
Tabelle 4: Messfahrt in U-Bahnwagen der MVG	246
Tabelle 5: Messfahrt in einer Strassenbahn vom Typ S1 Variobahn der MVG	247
Tabelle 6: Messung und Probenahme in einem Standardbus der MVG nach dem Einrücken ins Depot.....	247
Tabelle 7: Messfahrt in einem Gelenkbus der MVG.....	248
Tabelle 8: Messfahrt in einem Fernbus (VDL FHD-2).....	248
Tabelle 9: Beprobung München Hbf.....	249
Tabelle 10: Beprobung S-Bahnhof München Hbf tief.....	250
Tabelle 11: Beprobung U-Bahnhof München Odeonsplatz.....	250
Tabelle 12: Beprobung U-Bahnhof München Am Hart	251
Tabelle 13: Beprobung S-Bahnhof München Lochhausen.....	251
Tabelle 14: Beprobung Bahnhof Holzkirchen.....	251
Tabelle 15: Beprobung Hauptbahnhof Erfurt.....	252
Tabelle 16: Probenbezeichnungen der Luft- und Wischproben – Ergebnisse der molekular- und mikrobiologischen Untersuchungen.....	294
Tabelle 17: Zusammenstellung der vom Fraunhofer WKI durchgeführten Messungen im Regionalverkehr Braunschweig – Hannover	302
Tabelle 18: Parameter und Probenahmen.....	303
Tabelle 19: Direktanzeigende Messgeräte und Probenahmegeräte	304
Tabelle 20: Verbrauchsmaterialien zur Probenahme.....	305
Tabelle 21: Verwendete Geräte und Materialien für die RNA-Extraktion und die RT-qPCR am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP	305
Tabelle 22: Verwendete Humane Zelllinie mit Genotyp, Verwendungszweck und Referenz.....	306
Tabelle 23: Verwendetes Zellkulturmedium mit Zusammensetzung und Herstellername	306
Tabelle 24: Verwendetes DNA-Plasmid mit Beschreibung, Verwendungszweck und Referenz.....	306
Tabelle 25: Verwendete Oligonukleotide mit Sequenz und Verwendungszweck.....	306
Tabelle 26: Verwendeter Virusstamm mit Genotyp und Referenz.....	306
Tabelle 27: Verwendeter Primärantikörper mit Verdünnungsfaktor, Speziesherkunft und Herstellername	307
Tabelle 28: Verwendeter Primärantikörper mit Verdünnungsfaktor, Eigenschaft und Herstellername	307
Tabelle 29: Verwendete Isolationskits zur viralen DNA/RNA-Extraktion.....	307

Tabelle 30: Verwendete Chemikalien und Reagenzien	307
Tabelle 31: Zusammensetzung von TBS-BG, PBS und PBS-T	308
Tabelle 32: Verwendete Laborgeräte.....	309
Tabelle 33: Verwendete Einweg-Laborutensilien.....	310

Quellenverzeichnis Teil D

- [1] **Vogels, C.B.F., Brito, A.F., Wyllie, A.L., Fauver, J.R. et al., (2020):** *Analytical sensitivity and efficiency comparisons of SARS-CoV-2 RT-qPCR primer-probe sets.* In: *Nature microbiology* **5**(10):1299–1305, doi:[10.1038/s41564-020-0761-6](https://doi.org/10.1038/s41564-020-0761-6).
- [2] **Corman, V.M., Landt, O., Kaiser, M., Molenkamp, R. et al., (2020):** *Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR.* In: *Euro surveillance : bulletin Europeen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin* **25**(3), doi:[10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045](https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045).
- [3] **Ad-hoc-AG, (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):1358–1369, doi:[10.1007/s00103-008-0707-2](https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2).
- [4] **Di Carlo, P., Chiacchiarretta, P., Sinjari, B., Aruffo, E. et al., (2020):** *Air and surface measurements of SARS-CoV-2 inside a bus during normal operation.* In: *PLoS one* **15**(11), doi:[10.1371/journal.pone.0235943](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235943).
- [5] **Moreno, T., Pintó, R.M., Bosch, A., Moreno, N. et al., (2021):** *Tracing surface and airborne SARS-CoV-2 RNA inside public buses and subway trains.* In: *Environment international* **147**, doi:[10.1016/j.envint.2020.106326](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106326).
- [6] **DIN ISO 16000-16:2009-12, Innenraumluftverunreinigungen - Teil_16: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Probenahme durch Filtration (ISO_16000-16:2008),** Beuth Verlag GmbH.
- [7] **Yu, F., Yan, L., Wang, N., Yang, S. et al., (2020):** *Quantitative Detection and Viral Load Analysis of SARS-CoV-2 in Infected Patients.* In: *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America* **71**(15):793–798, doi:[10.1093/cid/ciaa345](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa345).
- [8] **Heim, A., Ebnet, C., Harste, G., and Pring-Akerblom, P., (2003):** *Rapid and quantitative detection of human adenovirus DNA by real-time PCR.* In: *Journal of medical virology* **70**(2):228–239, doi:[10.1002/jmv.10382](https://doi.org/10.1002/jmv.10382).
- [9] **Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe, (2020):** *Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA): TRBA 462 Einstufung von Viren in Risikogruppen, (GMBL. Nr. 45):*1009.
- [10] **World Health Organization, (2020):** *Laboratory biosafety guidance related to coronavirus disease (COVID-19): interim guidance.* (WHO/WPE/GIH/2020.3):1–11, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/332076>.
- [11] **Wurtz, N., Penant, G., Jardot, P., Duclos, N. et al., (2021):** *Culture of SARS-CoV-2 in a panel of laboratory cell lines, permissivity, and differences in growth profile.* In: *European journal of clinical microbiology & infectious diseases : official publication of the European Society of Clinical Microbiology* **40**(3):477–484, doi:[10.1007/s10096-020-04106-0](https://doi.org/10.1007/s10096-020-04106-0).
- [12] **Parsons, K., (2014):** *Human Thermal Environments.* CRC Press, ISBN 9780429169656.

- [13] **DIN EN 12831-1:2017-09**, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN_12831-1:2017*. Beuth Verlag GmbH.
- [14] **Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A. et al.**, (2016): *Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution*. In: *Environment international* **94**:196–210, doi:[10.1016/j.envint.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.009).
- [15] **Salthammer, T.**, (2017): *The Air that I Breathe*. In: *Chem. Unserer Zeit* **51**(5):308–323, doi:[10.1002/ciuz.201700779](https://doi.org/10.1002/ciuz.201700779).
- [16] **Umweltbundesamt**, (2020): *Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren: Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt:1–8* [Online], [Zugriff am: 19.03.2021]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf.
- [17] **Morawska, L., Afshari, A., Bae, G.N., Buonanno, G. et al.**, (2013): *Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment*. In: *Indoor air* **23**(6):462–487, doi:[10.1111/ina.12044](https://doi.org/10.1111/ina.12044).
- [18] **Morawska, L., Ayoko, G.A., Bae, G.N., Buonanno, G. et al.**, (2017): *Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure*. In: *Environment international* **108**:75–83, doi:[10.1016/j.envint.2017.07.025](https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.025).
- [19] **Licina, D. and Nazaroff, W.W.**, (2018): *Clothing as a transport vector for airborne particles: Chamber study*. In: *Indoor air* **28**(3):404–414, doi:[10.1111/ina.12452](https://doi.org/10.1111/ina.12452).
- [20] **World Health Organization**, (2006): *Air Quality Guidelines - Global Update 2005*. WHO Regional Office for Europe, Kopenhagen, ISBN 92 890 2192 6.
- [21] **Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden** (2008): *Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft*. In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* **51**(11):1370–1378, doi:[10.1007/s00103-008-0708-1](https://doi.org/10.1007/s00103-008-0708-1).
- [22] **Baron, P.A. and Willeke, K.**, (2005): *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons, New York, ISBN 978-0471784920.
- [23] **Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., Wang, W., Fabri, T. et al.**, (2014): *Airborne virus sampling: Efficiencies of samplers and their detection limits for infectious bursal disease virus (IBDV)*. In: *Annals of agricultural and environmental medicine : AAEM* **21**(3):464–471, doi:[10.5604/12321966.1120585](https://doi.org/10.5604/12321966.1120585).
- [24] **Tseng, C.-C. and Li, C.-S.**, (2005): *Collection efficiencies of aerosol samplers for virus-containing aerosols*. In: *Journal of aerosol science* **36**(5):593–607, doi:[10.1016/j.jaerosci.2004.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.12.004).
- [25] **DIN EN ISO 18593:2018-10**, *Mikrobiologie der Lebensmittelkette - Horizontales Verfahren für Probenahmetechniken von Oberflächen (ISO_18593:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_18593:2018*. Beuth Verlag GmbH.
- [26] **Asbach, C.**, (2021): *Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum SARS-CoV-2-Infektionsgeschehen*. In: *GrdL* **81**(01-02):60, doi:[10.37544/0949-8036-2021-01-02-62](https://doi.org/10.37544/0949-8036-2021-01-02-62).

- [27] **Hartmann, N.M., Dartscht, M., Szewzyk, R., and Selinka, H.-C., (2013):** *Monitoring of adenovirus serotypes in environmental samples by combined PCR and melting point analyse.* In: *Virology journal* 10:190, doi:[10.1186/1743-422X-10-190](https://doi.org/10.1186/1743-422X-10-190).
- [28] **Will, H., Stratbücker, S., Norrefeldt, V., and Scherer, C., (2021):** *Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonennah- und -fernverkehr: Arbeitspaket 2: Ausbreitungsmodellierung und Risikobewertung von Mikroorganismen und Viren (SARS-CoV-2) in öffentlichen Verkehrsmitteln.*
- [29] **DIN EN 14683:2019-10,** *Medizinische Gesichtsmasken - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN_14683:2019+AC:2019.* Beuth Verlag GmbH.
- [30] **DIN EN 149:2009-08,** *Atemschutzgeräte - Filtrierende Halbmasken zum Schutz gegen Partikeln - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN_149:2001+A1:2009.* Beuth Verlag GmbH.
- [31] **Münchener Verkehrsgesellschaft mbH,** *Hinweise zum Coronavirus: Sicher unterwegs (Staying save on public transport),* [Online], [Zugriff am: 25.05.2021]. Verfügbar unter: <https://www.mvg.de/services/aktuelles/coronavirus.html>.
- [32] **DIN EN 1822-1:2019-10,** *Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil_1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN_1822-1:2019.* Beuth Verlag GmbH.
- [33] **Qiao, Y., Yang, M., Marabella, I.A., McGee, D.A.J. et al., (2020):** *Greater than 3-Log Reduction in Viable Coronavirus Aerosol Concentration in Ducted Ultraviolet-C (UV-C) Systems.* In: *Environmental science & technology*, doi:[10.1021/acs.est.0c05763](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05763).
- [34] **Biasin, M., Bianco, A., Pareschi, G., Cavalleri, A. et al., (2021):** *UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication.* In: *Scientific reports* 11(1):6260, doi:[10.1038/s41598-021-85425-w](https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w).
- [35] **Zhang, Y., Mo, J., Li, Y., Sundell, J. et al., (2011):** *Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review.* In: *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)* 45(26):4329–4343, doi:[10.1016/j.atmosenv.2011.05.041](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.041).
- [36] **Bahri, M. and Haghghat, F., (2014):** *Plasma-Based Indoor Air Cleaning Technologies: The State of the Art-Review.* In: *Clean Soil Air Water* 42(12):1667–1680, doi:[10.1002/clen.201300296](https://doi.org/10.1002/clen.201300296).
- [37] **van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G. et al., (2020):** *Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1.* In: *The New England journal of medicine* 382(16):1564–1567, doi:[10.1056/NEJMc2004973](https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973).
- [38] **Marquès, M. and Domingo, J.L., (2020):** *Contamination of inert surfaces by SARS-CoV-2: Persistence, stability and infectivity. A review.* In: *Environmental research* 193, doi:[10.1016/j.envres.2020.110559](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110559).
- [39] **Aboubakr, H.A., Sharafeldin, T.A., and Goyal, S.M., (2020):** *Stability of SARS-CoV-2 and other coronaviruses in the environment and on common touch surfaces and the influence of climatic conditions: a review.* In: *Transboundary and emerging diseases*, doi:[10.1111/tbed.13707](https://doi.org/10.1111/tbed.13707).
- [40] **Bueckert, M., Gupta, R., Gupta, A., Garg, M. et al., (2020):** *Infectivity of SARS-CoV-2 and Other Coronaviruses on Dry Surfaces: Potential for Indirect Transmission.* In: *Materials (Basel, Switzerland)* 13(22), doi:[10.3390/ma13225211](https://doi.org/10.3390/ma13225211).

- [41] **Tung-Thompson**, G., Libera, D.A., Koch, K.L., Los Reyes, F.L. de et al., (2015): *Aerosolization of a Human Norovirus Surrogate, Bacteriophage MS2, during Simulated Vomiting*. In: PloS one **10**(8):e0134277, doi:[10.1371/journal.pone.0134277](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134277).
- [42] **Whitworth**, C., Mu, Y., Houston, H., Martinez-Smith, M. et al., (2020): *Persistence of Bacteriophage Phi 6 on Porous and Nonporous Surfaces and the Potential for Its Use as an Ebola Virus or Coronavirus Surrogate*. In: Applied and environmental microbiology **86**(17), doi:[10.1128/AEM.01482-20](https://doi.org/10.1128/AEM.01482-20).
- [43] **Graham**, F.L., Smiley, J., Russell, W.C., and Nairn, R., (1977): *Characteristics of a human cell line transformed by DNA from human adenovirus type 5*. In: The Journal of general virology **36**(1):59–74, doi:[10.1099/0022-1317-36-1-59](https://doi.org/10.1099/0022-1317-36-1-59).
- [44] **Groitel**, P. and Dobner, T., (2007): *Construction of adenovirus type 5 early region 1 and 4 virus mutants*. In: Methods in molecular medicine 130:29–39, doi:[10.1385/1-59745-166-5:29](https://doi.org/10.1385/1-59745-166-5:29).

Anhang Teil D

Tabellen

TABELLE 16: PROBENBEZEICHNUNGEN DER LUFT- UND WISCHPROBEN – ERGEBNISSE DER MOLEKULAR- UND MIKROBIOLOGISCHEN UNTERSUCHUNGEN

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM	
E3452-1	30.11.2020	0	ICE 4 ICE 600 Wagen Nr. 24 12 020-7	Türgriff Toilette innen	TUM	n.b.
E3452-2	30.11.2020	0		Spiegel Toilette	TUM	n.b.
E3452-3	30.11.2020	0		Fenster	TUM	n.b.
E3452-4	30.11.2020	0		Rückenlehne, Rückseite Sitz, Kunststoff	TUM	n.b.
E3452-5	30.11.2020	0		Haltegriff Ausstieg, Metalllegierung	TUM	-
E3452-6	30.11.2020	0	Erfurt Hbf.	Entwerter Bhf. Erfurt	TUM	-
E3452-7	30.11.2020	0	ICE 3 ICE 1005 Wagen Nr.403 232-2	Türgriff Toilette innen	TUM	-
E3452-8	30.11.2020	0		ICE, Fenster	TUM	-
E3452-9	30.11.2020	0		ICE Spiegel Toilette	TUM	-
E3452-10	n. v.					

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM	
E3452-11	30.11.2020	0	ICE 3 ICE 1005 Wagen Nr. 403 232-2	Haltegriff Ausstieg, Metalllegierung	TUM	-
E3452-12	30.11.2020	0		Druckknopf Ausstieg	TUM	-
E3452-13	30.11.2020	6.000	ICE 4 ICE 600 Wagen Nr. 412 020-7	n.b.	TUM	n.b.
E3452-14	30.11.2020	3.000			TUM	-
E3452-15	30.11.2020	1.500			TUM	-
E3452-16	30.11.2020	6.000	ICE 3 ICE 1005 Wagen Nr. 403 232-2	n.b.	TUM	-
E3452-17	30.11.2020	3.000			TUM	-
E3452-18	30.11.2020	1.500			TUM	-
E3452-19	10.12.2020	0	Solobus im Depot Wagen Nr. 4310	Bus M43, Fahrkartenaufomat	IBP	n.b.
E3452-20	10.12.2020	0	U6, A-Wagen Wagen Nr. 7204	Fenster	IBP	n.b.
E3452-21	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-22	10.12.2020	0		Türgriff	IBP	n.b.
E3452-23	10.12.2020	0			TUM	++
E3452-24	10.12.2020	0		Haltestange	IBP	n.b.
E3452-25	10.12.2020	0			TUM	++
E3452-26	10.12.2020	0		Bus M43, Fahrkartenaufomat	TUM	+

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM	
E3452-27	10.12.2020	0	Solobus im Depot Wagen Nr. 4310	Haltestange	IBP	n.b.
E3452-28	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-29	10.12.2020	0		Bus M43 Fenster	IBP	n.b.
E3452-30	10.12.2020	0		Druckknopf Tür- öffner	IBP	n.b.
E3452-31	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-32	10.12.2020	0		Bus M43 Fenster	TUM	+
E3452-33	10.12.2020	0	U-Bahnhof Odeonsplatz	Handlauf	IBP	n.b.
E3452-34	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-35	10.12.2020	0		Fahrkartenauto- mat	IBP	n.b.
E3452-36	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-37	10.12.2020	0		Druckknopf Auf- zug	IBP	n.b.
E3452-38	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-39	10.12.2020	0	U6, C2-Wagen Wagen Nr. 7713	Haltestange	IBP	n.b.
E3452-40	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-41	10.12.2020	0		Haltebogen Wa- genmitte	IBP	n.b.
E3452-42	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-43	10.12.2020	0		Druckknopf Tür- öffner	IBP	n.b.
E3452-44	10.12.2020	0			TUM	+

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM	
E3452-45	10.12.2020	0	U-Bahnhof München Am Hart	Handlauf Rolltreppe	IBP	n.b.
E3452-46	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-47	10.12.2020	0		Fahrkartenautomat	IBP	n.b.
E3452-48	10.12.2020	0			TUM	+
E3452-49	10.12.2020	1.500	Solobus im Depot Wagen Nr. 4310	n.b.	IBP	n.b.
E3452-50	10.12.2020	1.500		TUM	+	
E3452-51	10.12.2020	1.500	U6, A-Wagen Wagen Nr. 7204	n.b.	IBP	n.b.
E3452-52	10.12.2020	1.500		TUM	+	
E3452-53	10.12.2020	1.500	U6, C2-Wagen Wagen Nr. 7713	n.b.	IBP	n.b.
E3452-54	10.12.2020	1.500		TUM	+	
E3452-55	10.12.2020	1.500	Bhf. Odeonsplatz Bahnsteig U3/U6	n.b.	IBP	n.b.
E3452-56	10.12.2020	1.500		TUM	+	
E3452-57	18.12.2020	1.500	Flixbus FS-G 480 0 - 60 min	n.b.	TUM	+
E3452-58	18.12.2020	1.500		IBP	n.b.	
E3452-59	18.12.2020	1.500	Flixbus FS-G 480 60 - 120 min	n.b.	TUM	+
E3452-60	18.12.2020	1.500		IBP	n.b.	
E3452-61	18.12.2020	0	Flixbus FS-G 480	Haltestange hintere Tür	TUM	+
E3452-62	18.12.2020	0			IBP	n.b.

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV	
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM		
E3452-63	18.12.2020	0		Flixbus, Unterseite Klapp Tisch	TUM	+	
E3452-64	18.12.2020	0			IBP	n.b.	
E3452-65	18.12.2020	0		Flixbus Türgriff Toilette	TUM	+ n.b.	
E3452-66	18.12.2020	0			IBP	n.b.	
E3452-67	19.01.2021	2.749	S3, Hoki ab Wagen Nr. 2573	n.b.	TUM	+	
E3452-68	19.01.2021	2.750		IBP	n.b.		
E3452-69	19.01.2021	0		Türöffner	TUM	+	
E3452-70	19.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3452-71	19.01.2021	0		Haltstange	TUM	+	
E3452-72	19.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3452-73	19.01.2021	0		Bhf. Holzkirchen	Fahrkartenautomat	TUM	+
E3452-74	19.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3452-75	19.01.2021	2.729	S3, Lochhausen ab Wagen Nr. 3783	n.b.	TUM	+	
E3452-76	19.01.2021	2.735		IBP	n.b.		
E3452-77	19.01.2021	0	S-Bahnhof München-Lochhausen	Fahrkartenautomat	TUM	+	
E3452-78	19.01.2021	0		IBP	n.b.		
E3452-79	19.01.2021	0	S3, Lochhausen ab Wagen Nr. 3783	Türöffner	TUM	+	
E3452-80	19.01.2021	0		IBP	n.b.		

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM	
E3452-81	19.01.2021	0		Haltestange	TUM	+
E3452-82	19.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-83	21.01.2021	3.000	Talent 2, München ab Wagen Nr. 9480 2 442 216-4	n.b.	IBP	n.b.
E3452-84	21.01.2021	3.000			TUM	+
E3452-85	21.01.2021	3.000	Talent 2, Garmisch ab Wagen Nr. 9480 2 442 219-8	n.b.	TUM	+
E3452-86	21.01.2021	3.000			IBP	n.b.
E3452-87	21.01.2021	0	Talent 2, München ab Wagen Nr. 9480 2 442 216-4	Türgriff Toilette innen	TUM	+
E3452-88	21.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-89	21.01.2021	0		Fläche Tisch	TUM	+
E3452-90	21.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-91	21.01.2021	0		Türöffner	TUM	+
E3452-92	21.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-93	21.01.2021	0	Talent 2, Garmisch ab Nr. 9480 2 442 219-8	Haltestange	TUM	+
E3452-94	21.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-95	21.01.2021	0		Rückseite Sitz	TUM	+
E3452-96	21.01.2021	0			IBP	n.b.
E3452-97	21.01.2021	0		Fenster	TUM	+
E3452-98	21.01.2021	0			IBP	n.b.

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV	
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM		
E3452-99	30.11.2020	0	ICE 3 ICE 1005 Wagen Nr. 403 232-2	Rückseite Sitz, Kunststoff	TUM	+	
E3468-1	26.01.2021	2.000	München Hbf., Gleis 16	n.b.	TUM	+	
E3468-2	26.01.2021	2.000			IBP	n.b.	
E3468-3	26.01.2021	2.000	München Hbf., S-Bahnhof Bahnsteig	n.b.	TUM	+	
E3468-4	26.01.2021	2.000			IBP	n.b.	
E3468-5	26.01.2021	0	Haupthalle München Hbf.	Fahrkartenauto- mat	TUM	+	
E3468-6	26.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-7	26.01.2021	0	München Hbf. S-Bahnbereich	Fahrkartenauto- mat	TUM	+	
E3468-8	26.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-9	26.01.2021	0	S-Bahnhof München Hbf.	Handlauf Fahrtreppe	TUM	++	
E3468-10	26.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-11	26.01.2021	0		Handlauf Treppe	TUM	+	
E3468-12	26.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-13	26.01.2021	0		Fahrplanaushang	TUM	+	
E3468-14	26.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-15	27.01.2021	2.000		Gelenkbus Bus Linie 68/58 Wagen Nr.5354	n.b.	IBP	n.b.
E3468-16	27.01.2021	2.000				TUM	+

Probennummer	Datum	Luftprobe		Wischprobe	Bearbeitung	HAdV	
		Volumen [l]	Probenahmeort	Probenahmeort	IBP/TUM		
E3468-17	27.01.2021	1.500	Straßenbahn Linie 21 Wagen Nr. 2317	n.b.	TUM	+	
E3468-18	27.01.2021	1.500			IBP	n.b.	
E3468-19	27.01.2021	0	Gelenkbus Bus Linie 68/58 Wagen Nr.5354	Haltstange	TUM	+	
E3468-20	27.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-21	27.01.2021	0		Druckknopf Halt- wunsch	TUM	+	
E3468-22	27.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-23	27.01.2021	0		Entwerter	TUM	+	
E3468-24	27.01.2021	0		Entwerter	IBP	n.b.	
E3468-25	27.01.2021	0		Straßenbahn Linie 21 Wagen Nr. 2317	Haltstange mit Druckknopf Haltewunsch	TUM	+
E3468-26	27.01.2021	0				IBP	n.b.
E3468-27	27.01.2021	0	Fahrkartenauto- mat		TUM	+	
E3468-28	27.01.2021	0			IBP	n.b.	
E3468-29	27.01.2021	0	Entwerter		TUM	+	
E3468-30	27.01.2021	0			IBP	n.b.	

n.b. Der Parameter wurde nicht bestimmt.

n.v. Die Probennummer wurde nicht vergeben

- = HAdV DNA wurde nicht nachgewiesen.

+ = HAdV DNA wurde in geringen Mengen nachgewiesen.

++ = Vermehrungsfähige HAdV wurde mittels Immunfluoreszenz nachgewiesen.

TABELLE 17: ZUSAMMENSTELLUNG DER VOM FRAUNHOFER WKI DURCHGEFÜHRTEN MESSUNGEN IM REGIONALVERKEHR BRAUNSCHWEIG – HANNOVER

Datum	Zeit	Betreiber	Linie	Strecke
04.12.2020	07:01 – 08:02	BSVG	Bus Linie 411	Lammer Busch – Am Kalkwerk
04.12.2020	08:09 – 09:09	BSVG	Bus Linie 411	Am Kalkwerk – Lammer Busch
08.12.2020	07:01 – 07:37	BSVG	Straßenbahn Linie 3	Weserstrasse – Grenzweg
08.12.2020	07:40 – 08:15	BSVG	Straßenbahn Linie 3	Grenzweg – Weserstraße
01.03.2021	15:45 – 16:16	BSVG	Straßenbahn Linie 10	Hauptbahnhof – Carl-Miele-Str.
01.03.2021	16:25 – 16:54	BSVG	Straßenbahn Linie 10	Carl-Miele-Str. – Hauptbahnhof
01.03.2021	17:00 – 17:27	BSVG	Straßenbahn Linie 10	Hauptbahnhof – Carl-Miele-Str.
01.03.2021	17:40 – 18:06	BSVG	Straßenbahn Linie 10	Carl-Miele-Str. – Hauptbahnhof
04.03.2021	15:47 – 16:26	BSVG	Bus Linie 419	Ringlinie Hauptbahnhof
04.03.2021	16:47 – 17:24	BSVG	Bus Linie 419	Ringlinie Hauptbahnhof
04.03.2021	17:46 – 18:24	BSVG	Bus Linie 419	Ringlinie Hauptbahnhof
14.12.2020	06:20 – 07:03	WestfalenBahn	95772	Braunschweig – Hannover
14.12.2020	07:16 – 08:06	WestfalenBahn	95753	Hannover – Braunschweig
14.12.2020	16:20 – 17:05	WestfalenBahn	95782	Braunschweig – Hannover
14.12.2020	17:16 – 18:02	WestfalenBahn	95811	Hannover – Braunschweig
09.03.2021	07:30 – 08:13	ÜSTRA	Stadtbahn Linie 4	Roderbruch – Garbsen
09.03.2021	08:30 – 09:14	ÜSTRA	Stadtbahn Linie 4	Garbsen – Roderbruch
09.03.2021	14:50 – 15:34	ÜSTRA	Stadtbahn Linie 4	Roderbruch – Garbsen
09.03.2021	15:50 – 16:34	ÜSTRA	Stadtbahn Linie 4	Garbsen – Roderbruch
09.03.2021	10:32 – 11:20	ÜSTRA	Regiobus 500	Hannover ZOB – Gehrden
09.03.2021	11:39 – 12:31	ÜSTRA	Regiobus 500	Gehrden – Hannover ZOB

TABELLE 18: PARAMETER UND PROBENAHMEN

Fahrzeug/ Einrichtung	Luft- tempera- tur	Rel. Luft- feuchte	CO ₂ -Kon- zentration	Aerosol- partikel- Konzent- ration	Luftkeim- sammlung	Wisch- probe
ICE 3/ICE 4	-	-	+	+	+	+
Talent 2	+	+	+	+	+	+
S-Bahn ET-423	+	+	+	+	+	+
U-Bahn A-Wagen	+	+	+	+	+	+
U-Bahn C2-Wagen	+	+	+	+	+	+
Straßenbahn	+	+	+	-	+	+
Fernbus	+	+	+	+	+	+
12 m Stadtbus	+	+	+	+	+	+
Stadtbus Gelenkbus	+	+	+	-	+	+
München Hbf.	+	+	+	-	+	+
S-Bahnhof München Hbf.	+	+	+	-	+	+
U-Bahnhof München-Ode- onsplatz	+	+	+	+	+	+
Erfurt Hbf.	-	-	-	-	-	+
Holzkirchen Bhf.	-	-	-	-	-	+
S-Bahnhof Mün- chen-Loch- hausen	-	-	-	-	-	+
U-Bahnhof München Am Hart	-	-	-	-	-	+

TABELLE 19: DIREKTANZEIGENDE MESSGERÄTE UND PROBENAHMEGERÄTE

Gerät/Material	Bezeichnung/Typ	Parameter	Hersteller/Lieferant
Handmessgerät für CO₂, Luftfeuchte und Temperatur (IAQ) mit Datenloggerfunktion	CP11	CO ₂ , rel. Luftfeuchte, Lufttemperatur	Rotronic Messgeräte GmbH, Ettlingen
Datenlogger zur Aufzeichnung des absoluten Luftdrucks	MSR 145B	Absoluter Luftdruck	Rotronic Messgeräte GmbH, Ettlingen
Universal-Messkoffer	Trolley V2	Absoluter Luftdruck, rel. Feuchte, Lufttemperatur, CO ₂ , PM _{0.5} , PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀	Prökel GmbH, München
Probenahmesystem	MBASS30V3	Luftkeimsammlung	Umweltanalytik Holbach GmbH, Wadern
Filteradapter	FA 30	Luftkeimsammlung: HAdV, SARS-CoV-2	Umweltanalytik Holbach GmbH, Wadern

TABELLE 20: VERBRAUCHSMATERIALIEN ZUR PROBENAHME

Gerät/Material	Bezeichnung/Typ	Parameter	Hersteller/ Lieferant
Gelatinefilter	Gelatine Disposables Sartorius SM 17528-080-ACD	Luftkeimsammlung: HAdV, SARS-CoV-2	Sartorius Stedim Biotech GmbH, Göttingen
Swab-Kits bestehend aus:			IBP
Swabs	VWR® Critical Swab®	Probenahme auf Oberflächen: HAdV, SARS-CoV-2	VWR Europe
Schraubdeckelröhrchen zur Aufbewahrung des Zellkulturmediums	2 ml Screw Cap Tube Free Standing Free of detectable DNA, DNase, RNase, Metals, Pyrogens	Probenahme auf Oberflächen: HAdV, SARS-CoV-2	BIOplastics BV, Landgraaf, NL
Zentrifugenröhrchen	Cellstar Tubes 15 mm	Probenahme auf Oberflächen: HAdV, SARS-CoV-2	Greiner Bio-One International AG, Kremsmünster, AT
Zellkulturmedium	Dulbecco's Modified Eagle's Medium – high glucose	Probenahme auf Oberflächen: HAdV, SARS-CoV-2	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim

TABELLE 21: VERWENDETE GERÄTE UND MATERIALIEN FÜR DIE RNA-EXTRAKTION UND DIE RT-QPCR AM FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

Gerät/Material	Bezeichnung/Typ	Parameter	Hersteller/Lieferant
Extraktionsgerät	QIAcube HT/QIAxtractor System	SARS-CoV-2	QIAGEN GmbH, Hilden
Extraktionskit	QIAamp® 96 Virus QIAcube® HT Kit	SARS-CoV-2	QIAGEN GmbH, Hilden
RT-qPCR-Gerät	Quantstudio 5	SARS-CoV-2	Life Technologies GmbH / ThermoFisher Scientific, Darmstadt
RT-qPCR-Kit	TaqPath™ COVID 19 CE IVD RT PCR Kit	SARS-CoV-2	Life Technologies GmbH / ThermoFisher Scientific, Darmstadt
Auswertungssoftware	COVID-19 Interpretive Software 2.3	SARS-CoV-2	Life Technologies GmbH / ThermoFisher Scientific, Darmstadt

TABELLE 22: VERWENDETE HUMANE ZELLINIE MIT GENOTYP, VERWENDUNGSZWECK UND REFERENZ

Cell line	Genotyp	Referenz
HEK 293	Humane embryonische Nieren-Zelllinie mit HAdV-C5 transformiert und stabiler Expression der HAdV-C5 E1-Region	[43]

TABELLE 23: VERWENDETES ZELLKULTURMEDIUM MIT ZUSAMMENSETZUNG UND HERSTELLERNAME

Medium	Zusammensetzung	Hersteller
DMEM – high glucose	4.500 mg/L Glukose, L-Glutamin, Natrium-Bikarbonat, Natrium-Pyruvat bicarbonate, sterilfiltriert	Sigma Aldrich
FBS qualified	sterilfiltriert	Gibco®

TABELLE 24: VERWENDETES DNA-PLASMID MIT BESCHREIBUNG, VERWENDUNGSZWECK UND REFERENZ

Plasmid	Beschreibung	Verwendungszweck	Referenz
HAdV-C5 Bacmid	DNA-Plasmid mit HAdV-C5 Gensequenz und E3 Region Deletion	Positivkontrolle für RT-PCR	[44]

TABELLE 25: VERWENDETE OLIGONUKLEOTIDE MIT SEQUENZ UND VERWENDUNGSZWECK

Primer	Sequenz	Verwendungszweck
HAdV universell fwd	GCCCCAGTGGTCTTACATGCACAT	RT-PCR
HAdV universell rev	GCCACGGTGGGGTTTCTAACTT	RT-PCR

TABELLE 26: VERWENDETER VIRUSSTAMM MIT GENOTYP UND REFERENZ

Humaner Adenovirus	Genotyp	Referenz
HAdV-C5 Wildtyp	H5pg4100, mit 1863 bp Deletion in der viralen E3 region (nt 28602-30465)	[44]

TABELLE 27: VERWENDETER PRIMÄRANTIKÖRPER MIT VERDÜNNUNGSFAKTOR, SPEZIESHERKUNFT UND HERSTELLERNAME

Antikörper	Verdünnung	Spezies	Hersteller
Adenovirus Hexon Protein Antikörper (8C4)	1:2.000	Anti-Maus	Santa Cruz

TABELLE 28: VERWENDETER PRIMÄRANTIKÖRPER MIT VERDÜNNUNGSFAKTOR, EIGENSCHAFT UND HERSTELLERNAME

Antikörper	Verdünnung	Eigenschaften	Hersteller
647-anti-mouse	1:200	Alexa-647 konjugiert, Ziegen-Anti-Maus Antikörper	Dianova

TABELLE 29: VERWENDETE ISOLATIONSKITS ZUR VIRALEN DNA/RNA-EXTRAKTION

Kit	Hersteller
QIAamp DNA Blood Mini Kit	Qiagen
RealAccurate® Quadruplex SARS-CoV-2 PCR Kit	PathoFinder®

TABELLE 30: VERWENDETE CHEMIKALIEN UND REAGENZIEN

Material	Hersteller
2-Propanol	AppliChem
Ethanol	AppliChem
Natriumacetat	AppliChem
Phenol/chloroform/isoamyl alcohol (25:24:1)	Sigma-Aldrich
Phosphate buffered saline (PBS)	Biochrom
Proteinase K	Carl Roth
RNase A	Carl Roth
Sodium dodecylsulfate (SDS)	Carl Roth
Tris(hydroxymethyl)aminomethane (Tris)	Carl Roth
Tween-20	AppliChem

TABELLE 31: ZUSAMMENSETZUNG VON TBS-BG, PBS UND PBS-T

Lösung	Komponente	Konzentration
TBS-BG	Tris/HCl, pH 7,6	20 mM
	NaCl	137 mM
	KCl	3 mM
	MgCl ₂	1,5 mM
	Tween-20	0,05 % (v/v)
	Natriumazid	0,05 % (w/v)
	Glycin	5 % (w/v)
	BSA	5 % (w/v)
PBS	NaCl	140 mM
	KCl	3 mM
	Na ₂ HPO ₄	4 mM
	KH ₂ PO ₄	1,5 mM
	(Autoklaviert)	
PBS-T	Tween-20 in 1x PBS	0,1 % (v/v)

TABELLE 32: VERWENDETE LABORGERÄTE

Gerät	Hersteller
Axiovert 200 M Mikroskop	Zeiss
BRAND® accu-jet® pro	Sigma-Aldrich
Eppendorf® Research® plus Pipette, 0,1-2,5 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Research® plus Pipette, 0,5-10 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Research® plus Pipette, 2-20 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Research® plus Pipette, 10-100 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Research® plus Pipette, 20-200 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Research® plus Pipette, 100-1000 µl	Eppendorf®
Eppendorf® Thermomixer Comfort 5355	Eppendorf®
Gefrierschrank, -20 °C	Liebherr-International Deutschland GmbH
Heraeus® BB16 Function Line CO2 Inkubator	Heraeus Instruments GmbH
Heraeus™ Fresco™ 17 Mikrozentrifuge	Thermo Fisher Scientific
Heraeus™ Herafreeze HFU 586 Basic, -80 °C	Thermo Fisher Scientific
Heraeus™ Laminair HLB 2448 GS	Thermo Fisher Scientific
Heracell™ 150i CO2 Inkubator	Thermo Fisher Scientific
LightCycler® 480 Instrument II	Roche Life Sciences
MS 3 basic Vortexer	IKA®-Werke GmbH & Co. KG
Multitron Inkubationsschüttler	Infors HT
Neubauer Zählkammer	LO Laboroptik
QuantStudio™ 5	Thermo Fisher Scientific
Sprout® Minizentrifuge	Heathrow Scientific
Test Tube Rotating Shaker 3025	GFL
Thermocycler peqSTAR 96x universal gradient	VWR International GmbH
Unitwist RT	UniEquip Laborgerätebau- und Vertriebs GmbH
Vacusaft Vacuumpumpe	Integra, Biosciences GmbH
Vortex-Genie 2	Scientific Industries, Inc.

TABELLE 33: VERWENDETE EINWEG-LABORUTENSILIEN

Material	Hersteller
CryoPure Tube 72.379, 1,8 ml weiß	Sarstedt AG & Co. KG
Eppendorf® Combitips advanced® Pipettenspitzen	Eppendorf
Greiner CELLSTAR® serologische Pipette, 2 ml	Sigma-Aldrich
Greiner CELLSTAR® serologische Pipette, 5 ml	Sigma-Aldrich
Greiner CELLSTAR® serologische Pipette, 10 ml	Sigma-Aldrich
Greiner CELLSTAR® serologische Pipette, 25 ml	Sigma-Aldrich
Kimtech Science* Purple Nitrile*Handschuhe	Kimberly-Clark Worldwide, Inc.
Micro tube 1,5 ml	Sarstedt AG & Co. KG
Milex-GP, 0,22µm, Polyethersulfon, 33 mm, gamma sterilisiert	Merck KGaA
Multiply®-Pro tube 0.2 ml	Sarstedt AG & Co. KG
Nitril® NextGen® Handschuhe	Meditrade GmbH
Omnifix Einmalspritzen, B. Braun	Thermo Fisher Scientific
TC dish 150, standard 83.3903	Sarstedt AG & Co. KG
TC plate 6 well, standard F 83.3920	Sarstedt AG & Co. KG
TC plate 12 well, standard F 83.3921	Sarstedt AG & Co. KG
Tube 50 ml, 114x23, PP, 62.547.254	Sarstedt AG & Co. KG
Tube 15 ml, 120x17, PP, 62.554.502	Sarstedt AG & Co. KG

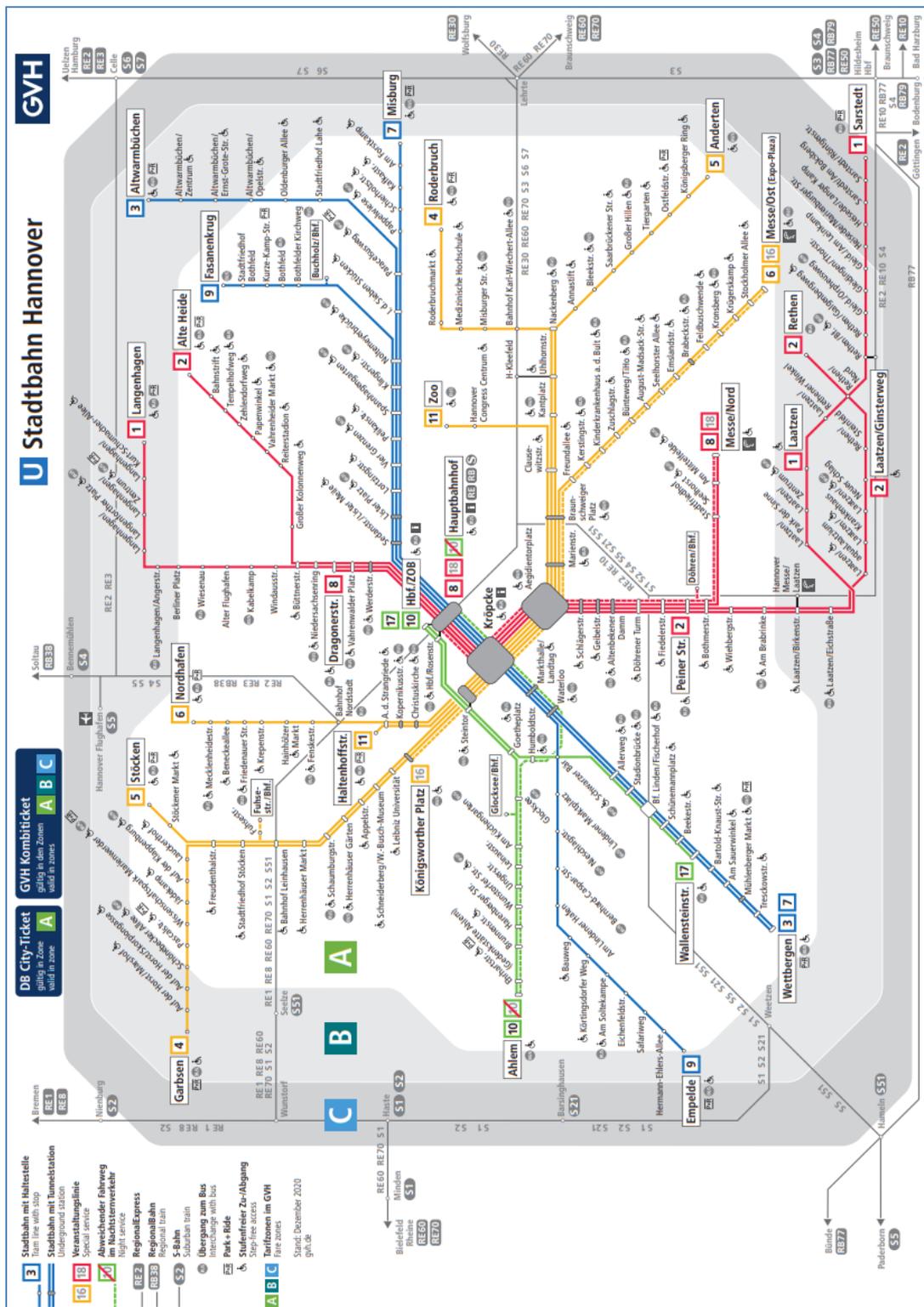


Abbildung 44: Liniennetzplan der Stadtbahn Hannover. Messungen erfolgten auf der Linie 4 (zur Detailsicht bitte entsprechend vergrößern), UESTRA 2021.

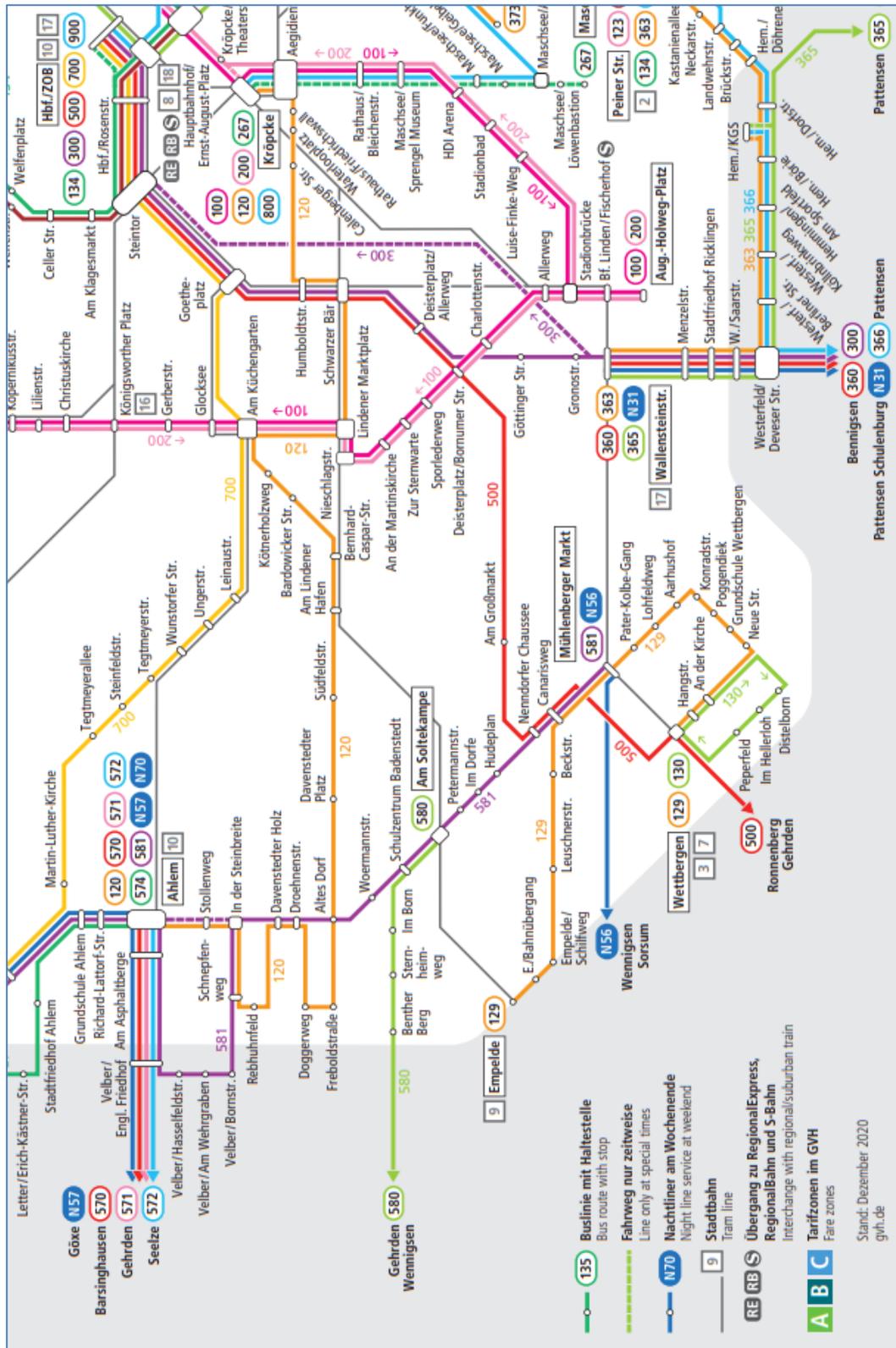


Abbildung 45: Liniennetzplan der Busse in Hannover (Ausschnitt). Messungen erfolgten auf der Regiobuslinie 500. Das Fahrzeug der Stadtbahnlinie 4 war vom Typ TW 3000, der Hersteller des Regiobus 500 war MAN, UESTRA 2021.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte am Umweltbundesamt
Bhf.	Bahnhof
Bp	Basenpaare
BSA	Engl. Bovine serum albumin: Rinderserumalbumin
BSVG	Braunschweiger Verkehrs-GmbH
cDNA	Engl. complementary deoxyribonucleic acid: komplementäre Desoxyribonukleinsäure
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COVID-19	Engl. Coronavirus Disease: Durch SARS-CoV-2 ausgelöste Erkrankung
Cp	Engl. crossing point: Schwellenwert
CPE	Engl. Cytopathic Effect: zytopathischer Effekt
DMEM	Engl. Dulbecco's Modified Eagle Medium, standardisiertes Medium für die Zellkultur
DNA	Engl. Deoxyribonucleic Acid: Desoxyribonukleinsäure, Träger der Erbinformation im Zellkern oder im Virus-Capsoid
EDTA	Engl. Ethylenediaminetetraacetic: Ethylendiamintetraessigsäure
FFP2	Engl. Filtering Face Piece: partikelfiltrierende Halbmaske nach EN 149. Die Masken werden entsprechend ihrer Schutzwirkung in 3 Klassen (FFP1 – FFP3) eingeteilt. Seit dem 18.01.2021 ist die Benutzung von FFP2-Masken im öffentlichen Nahverkehr und dessen Einrichtungen in Bayern verpflichtend vorgeschrieben.
HAdV	Humane Adenoviren
Hbf.	Hauptbahnhof
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
KCl	Kaliumchlorid
M	Molar

Abkürzung	Erläuterung
MgCl ₂	Magnesiumchlorid
mM	Millimolar
MNB MNS	Mund-Nasen-Bedeckung, Mund-Nasen-Schutz: nicht standardisierte Bedeckung von Mund und Nase
MOI	Engl. multiplicity of infection: Infektionsfaktor
mRNA	Engl. Messenger Ribonucleic Acid: Boten-RNA einzelsträngige Ribonukleinsäure, die die Information zum Aufbau eines Proteins trägt. Das Genom von SARS-CoV-2 liegt im Virus-Capsid in Form von mehreren mRNA-Strängen vor.
µm	Mikrometer: 10 ⁻⁶ m
MVG	MVG Münchner Verkehrsgesellschaft mbH
n/cm ³	Anzahlkonzentration: Anzahl der Aerosolpartikel in einem Kubikzentimeter Luft
NaCl	Natriumchlorid
nt	Nukleotide
PCR	Engl. Polymerase Chain Reaction: Polymerase-Kettenreaktion, molekularbiologisches Verfahren zur Vermehrung von Abschnitten der Erbinformation (DNA- oder RNA-Fragmenten)
pH	Engl. potential of Hydrogen: Wasserstoffpotential, Maß für die sauren oder alkalischen Eigenschaften einer wässrigen Lösung
PM	Engl. Particulate Matter: Feinstaub, Schwebstoff
PM10	Feinstaubfraktion mit einem aerodynamischen Durchmesser von max. 10 µm
ppm	Engl. parts per million: Konzentrationsangabe in Volumen- oder Massenanteilen
qPCR	Engl. quantitative Polymerase Chain Reaction: quantitative PCR, auch synonym verwendet für RT-PCR
r. F.	Relative Luftfeuchte: Angabe des Wassergehalts in der Luft in [%]
RNA	Engl. RiboNucleic Acid: Ribonukleinsäure: Träger der Erbinformation Das Virusgenom kann in Form von DNA, doppel- oder einzelsträngiger RNA vorliegen. Im Capsid von SARS-CoV-2 liegt die Erbinformation in Form von einzelsträngiger mRNA vor.
RT	Raumtemperatur

Abkürzung	Erläuterung
RT-PCR	Engl. Real-time Polymerase Chain Reaction: synonym verwendet für qPCR oder engl. Reverse transcriptase Polymerase Chain Reaction: PCR mithilfe einer Reaktion mit dem Enzym Reverse Transkriptase: Ein RNA-Abschnitt wird mithilfe des Enzyms Reverse Transkriptase in den codierenden DNA-Abschnitt umgeschrieben. Dieser DNA-Abschnitt wird dann mittels PCR vervielfältigt und detektiert.
SARS-CoV-2	Engl. Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2: Beta-Coronavirus, das als Auslöser von COVID-19 identifiziert wurde
TUM	Technische Universität München
ÜSTRA	Hannoversche Verkehrsbetriebe Aktiengesellschaft
VOC	Engl. Volatile Organic Compounds: Flüchtige organische Verbindungen, die im Retentionsbereich von jeweils einschließlich n-Hexan bis n-Hexadecan auf einer überwiegend unpolaren Kapillarsäule (5 % Phenyl- und 95 % Dimethylpolysiloxan) eluieren
v/v	Engl. volume/volume: Volumen/Volumen
WHO	Engl. World Health Organization: Welt-Gesundheitsorganisation
WKI	Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
w/v	Engl. weight/volume: Masse/Volumen
ZOB	Zentraler Omnibusbahnhof