

BBSR-
Online-Publikation
31/2024

SAVE

Infektionspräventives Bauen zum Schutz kritischer Infrastrukturen

von

Lukas Adrian Jurk
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Sunder
Kirsten Remmers
Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel
Dr. Yunus Emre Cetin
Dr. Sandra Nadine Jendrossek
Prof. Dr. Petra Gastmeier
Jens Brack
Zhuo Chen



SAVE

Infektionspräventives Bauen zum Schutz kritischer Infrastrukturen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.02

Projektlaufzeit: 09.2020 bis 08.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Guido Hagel
guido.hagel@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau
Lukas Adrian Jurk (Projektleitung)
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Sunder
Kirsten Remmers

TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut
Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel
Dr.-Ing. Yunus Emre Cetin

Charité – Universitätsmedizin Berlin, Institut für Hygiene und Umweltmedizin
Dr. med. Sandra Jendrossek
Prof. Dr. med. Petra Gastmeier

TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Jens Brack
Zhuo Chen

Redaktion

TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau
Lukas Adrian Jurk

Stand

April 2023

Gestaltung

TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau
Lukas Adrian Jurk

Bildnachweis

Titelbild: Victor Forgacs/Unsplash.com

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Jurk, Lukas Adrian; Sunder, Wolfgang; Remmers, Kirsten; Kriegel, Martin; Cetin, Yunus Emre; Jendrossek, Sandra; Gastmeier, Petra; Brack, Jens; Chen, Zhuo: SAVE: Infektionspräventives Bauen zum Schutz kritischer Infrastrukturen. BBSR-Online-Publikation 31/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	8
Problemstellung	9
Zielstellung	11
Forschungsdesign	12
Arbeitshypothesen	12
Forschungsfragen	12
Methodischer Ansatz	13
Projektteam und Organisation	13
Arbeitspakete und Meilensteine	14
Projektverlauf	16
Gemeinsames Vorgehen	16
Baukonstruktive und Prozessuale Betrachtung des Instituts für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau	18
Untersuchung des Einflusses von Lüftungsmaßnahmen auf das Risiko luftgetragener Infektionen durch das Institut für Hygiene und Umweltmedizin	35
Lüftungstechnische Untersuchungen des Hermann-Rietschel-Instituts	39
Materialalterungs- und Reinigbarkeitstests des IBMBs	46
Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	50
Ergebnisse und Planungshilfe	52
Abgeleitete Entwurfsprinzipien	52
Bauliche Empfehlungen	64
Der Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Risiko luftgetragener Infektionen	87
Ergebnisse der Lüftungstechnischen Untersuchungen	90
Reinigbarkeitsempfehlungen zur Materialwahl	911
Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis	104
Hygiene-Baseline	104
Diskussion	105
Ausblick	107
Mitwirkende	108
Kurzbiographien	109
Literaturverzeichnis	111
Abbildungsverzeichnis	114
Tabellenverzeichnis	116

Anlagen	118
Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Alten- und Pflegeheimen	118
Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Arztpraxen	134
Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Kindergärten	144
Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Schulen	161
Ergebnisse der Reinigbarkeitstests	188

Kurzfassung

Im Projekt SAVE erarbeiteten Forschende aus den Bereichen Architektur, Hygiene, Haustechnik, Materialwissenschaft, Design und Epidemiologie interdisziplinär effektive Strategien zur Kontrolle und zum Umgang mit Ausbreitungswegen von Erregern zum Schutz kritischer Infrastrukturen. Zentrale Frage des Forschungsvorhabens war, welche baukonstruktiven, prozessualen, Lüftungstechnischen und hygienischen Maßnahmen das Infektionsrisiko der Nutzenden und Beschäftigten innerhalb der kritischen Infrastrukturen Schulen, Kindergärten, Arztpraxen sowie Alten- und Pflegeheimen reduzieren können. Die erarbeiteten Empfehlungen zielen darauf ab, Neu- und Bestandsbauten für präventive, reaktive und adaptive Maßnahmen zur Unterbrechung von Infektionsketten zu ertüchtigen. Dadurch sollen zukünftig im Normalbetrieb Krankheitsfälle reduziert und in pandemischen Situationen ein Weiterbetrieb ermöglicht werden.

Das Forschungsprojekt fokussierte sich auf den für die COVID-19-Pandemie besonders relevanten luftgetragenen Ausbreitungsweg von Erregern, berücksichtigte jedoch auch Kontaktinfektionswege. Über die pandemische Situation hinaus sollen die erarbeiteten Empfehlungen im Alltag ebenfalls Relevanz bewahren. Die interdisziplinäre Betrachtung ermöglichte eine umfassende Erörterung der initialen Frage, welche Faktoren für das Infektionsgeschehen in Innenräumen relevant sind, sowie die ganzheitliche Betrachtung der weiteren Arbeitsschritte. Gemeinsam und interdisziplinär wurden Möglichkeiten der Risikominimierung ausgearbeitet, und deren Relevanz, Verhältnismäßigkeit und Durchführbarkeit diskutiert und bewertet. Abschließende Empfehlungen wurden interdisziplinär formuliert und Aufklärungsinhalte zu Grundlagenwissen für das Verständnis ebendieser Empfehlungen zusammengetragen. Eine Vielzahl verschiedener Methoden, die in den einzelnen Disziplinen angesiedelt sind, wurden verwendet, um die inter- und intradisziplinären Empfehlungen zu erforschen. Neben einem Scoping Review der internationalen Studienlage zum Einfluss der Luftqualität auf das Infektionsgeschehen wurden Simulationen und numerische Modellierungen zu Lüftungsmaßnahmen durchgeführt, um Lüftungstechnische, prozessuale und baukonstruktive Maßnahmen zu definieren. Hinsichtlich der Untersuchung dieser sowie hygienischer Empfehlungen wurden Expertenbefragungen zu infektionskritischen Tätigkeiten, Nutzendeninterviews innerhalb von Bestandsgebäuden und typologische Bewertungen in Expertenworkshops durchgeführt, die sowohl eine Außen- wie auch Innenperspektive bei der Bewertung von Bestandsbauten ermöglichten. Aus diesen Erkenntnissen ließen sich Empfehlungen ableiten, die nicht nur für den Umbau im Bestand herangezogen, sondern auch bei Neubauten umgesetzt werden können. Diese umfassen die Betrachtungsebenen von der Gebäudelage über den Grundriss bis hin zur Raumausstattung. Chemische, physikalische und mechanische Alterungsverfahren wurden auf Materialproben angewendet, um deren Alterung und anschließende Reinigbarkeit zu testen. Daraus konnten Empfehlungen für eine ideale Materialwahl in verschiedenen Funktionsbereichen abgeleitet werden.

Die erarbeiteten Empfehlungen bilden eine hervorragende Grundlage in die zukünftige Baupraxis hineingetragen zu werden und das Thema des infektionspräventiven Bauens wirksam umzusetzen. Dadurch kann zukünftig Krankheitsfällen vorgebeugt werden. Eine energetische, soziopsychologische und betriebswirtschaftliche Betrachtung konnte im Rahmen des Projekts SAVE nicht durchgeführt werden und muss aktuell von den jeweiligen Planenden und Bauherren eigenständig getroffen werden.

Der Bau kann die Voraussetzung für eine geeignete Umgebung zur Minimierung des Infektionsrisikos schaffen. Jedoch bedarf es einer kontinuierlichen Wartung des Bestands und Aufklärung im Wissen um die Anwendung adaptiver und reaktiver Maßnahmen bei den Beschäftigten der betrachteten Infrastrukturen. Daher ist eine Wissensvermittlung der erarbeiteten Erkenntnisse nicht nur an Planenden, sondern auch die Nutzenden und Beschäftigten der Gebäude zwingend erforderlich. Dies soll in einem Folgeprojekt durch die Database of Architecture and Health Environment sichergestellt werden.

Abstract

In the SAVE project, researchers from the fields of architecture, hygiene, building engineering, materials science, design and epidemiology developed interdisciplinary effective strategies for controlling and managing pathogen spread routes to protect critical infrastructures. The central question of the research project was which structural, procedural, ventilation and hygienic measures can reduce the risk of infection for users and employees within the critical infrastructures of schools, kindergartens, medical practices and retirement and nursing homes. The recommendations developed are aimed at making new and existing buildings suitable for preventive, reactive and adaptive measures to interrupt infection chains. This should reduce incidents of illness in normal operations and enable continued operation in pandemic situations.

The research project focuses on the airborne pathway of pathogens that is particularly relevant for the COVID-19 pandemic, but also considers contact infection pathways. Beyond the pandemic situation, the recommendations developed should also retain relevance in everyday life. The interdisciplinary approach enabled a comprehensive discussion of the initial question of which factors are relevant for indoor infection incidence, as well as a holistic view of the further work steps. Jointly and intradisciplinarily, possibilities for risk minimization were elaborated, and their relevance, proportionality, and feasibility were discussed and evaluated. Final recommendations were formulated in an interdisciplinary manner and educational content was compiled into basic knowledge for the understanding of these very recommendations. A large number of different methods based in each discipline were used to explore the inter- and intra-disciplinary recommendations. In addition to a scoping review of the international body of studies on the impact of air quality on infection incidence, simulations and numerical modeling on ventilation measures were performed to define ventilation, process, and building design measures. Regarding the investigation of these as well as hygienic recommendations, expert surveys on infection-critical activities, user interviews within existing buildings, and typological assessment in expert workshops were conducted, providing both an exterior and interior perspective in the evaluation of existing buildings. From these findings, recommendations could be derived that can not only be used for retrofitting in existing buildings, but also implemented in new buildings. These cover the levels of consideration from the building location to the floor plan to the room furnishings. Chemical, physical and mechanical aging methods were applied to material samples to test their aging and subsequent cleanability. From this, recommendations for an ideal choice of materials in various functional areas could be derived.

The recommendations developed form an excellent basis for being incorporated into future building practice and for effectively implementing the topic of infection-preventive building. In this way, cases of illness can be prevented in the future. An energetic, socio-psychological and economic consideration could not be carried out within the framework of the SAVE project and must currently be made independently by the respective planners and builders.

Construction can create the conditions for a suitable environment to minimize the risk of infection. However, continuous maintenance of the inventory and education in the knowledge of the application of adaptive and reactive measures among the employees of the considered infrastructures is needed. Therefore, a knowledge transfer of the elaborated findings not only to planners, but also to the users and employees of the buildings is mandatory. This is to be ensured in a follow-up project by the Database of Architecture and Health Environment.

Einführung

Themenfeld

Das Projekt SAVE erarbeitete interdisziplinär effektive Strategien zur Kontrolle und zum Umgang mit Ausbreitungswegen von Erregern zum Schutz kritischer Infrastrukturen.

Ziel des Verbundes war die sektorübergreifende Bewertung von Risikofaktoren zur Infektionsübertragung in Abhängigkeit des Erregers anhand bestehender schützenswerter Infrastrukturen und der damit verbundenen Identifizierung prozessualer Abläufe. Diese wurden in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt und gewichtet, um konkrete Handlungsempfehlungen zur Unterbrechung von Infektionsausbreitungswegen für die Bereiche Bau, Material und Haustechnik abzuleiten. Ausgewählte Modelllösungen für konkrete Problemstellungen wurden erarbeitet und vorgestellt.

Untersuchungsgegenstand

Vier Infrastrukturen wurden als kritisch und relevant bewertet, um sie hinsichtlich ihrer prozessualen, gebäudetechnischen und architektonischen Potentiale zur Reduzierung des Infektionsrisikos für Nutzende innerhalb des Gebäudes zu untersuchen. Die vier Infrastrukturen Schulen, Kindergärten, Arztpraxen sowie Alten- und Pflegeheime wurden aufgrund ihres Einflusses auf das allgemeine Infektionsgeschehen, der besonderen Disposition der Nutzenden, ihrer Bedeutung für die Pädagogik oder ihrer Relevanz für die Gesundheitsversorgung und für Impfkampagnen ausgewählt. Unter anderem wurden Ist- und Sollzustände der Luftqualität, der hygienischen Prozesse, der Oberflächenbeschaffenheit und Reinigbarkeit während und nach der Materialalterung in den Gebäuden sowie Gebäudetypologien und Nutzendenerfahrungen erforscht.

Problemstellung

Während der COVID-19-Pandemie entwickelte sich der Wissenstand zum Umgang mit dem Erreger SARS-CoV-2 dynamisch und rief viele reaktive Maßnahmen hervor. Eine Untersuchung, wie die gebaute Umgebung angepasst werden sollte, um einen Weiterbetrieb unserer Infrastrukturen zu gewährleisten, fand nicht statt. Vielmehr wurden Schulen und weitere Einrichtung geschlossen, bzw. vollständig isoliert. Um zukünftig auf Pandemien reagieren zu können und auch im Normalbetrieb Infektionsketten zu unterbrechen, muss erforscht werden, welchen Beitrag die Architektur und Haustechnik bei der Minderung des Infektionsrisikos spielen kann.

Stand der Forschung/Baupraxis

Die Thematik des Forschungsvorhabens resultiert aus den Ergebnissen der Forschungsprojekte „HYBAU+“ der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ (SWD – 10.08.18.7-14.04) und „Praxis: Krankenhausbau“ der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ (SWD – 10.08.18.7-12.07). In diesen Forschungsarbeiten wurde der Zustand von baulichen Strukturen und dessen infektionspräventives Potential von Gesundheitsbauten abgefragt. Dabei wurde die bauliche, technische und personelle Ausstattung dieses Gebäudetypus als bisher unzureichend erforscht eingestuft (Sunder et al. 2018).

Weiter wurde in den Vorgängerprojekten festgestellt, dass eine übergeordnete ganzheitliche Betrachtung der baulichen Infektionsprävention nicht stattfindet. Es bestehen zwar Klassen, Regeln und Empfehlungen, die sich mit Teil- bzw. Detailbereichen von z. B. Haustechnik oder Hygiene befassen. Da es kaum Standards in diesem Themenfeld gibt, führt dies zu einer großen Heterogenität der architektonischen und technischen Gegebenheiten. Hinzu kommt, dass Planungsempfehlungen für die bauliche Infektionsprävention nahezu evidenzbasiert sind. Erst in jüngster Zeit halten auch evidenzbasierte Empfehlungen Einzug, wie z. B. bei den KRINKO-Empfehlungen der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention am Robert Koch-Institut.

Ein gemeinsames Projekt der TU Braunschweig und der Charité Berlin (gefördert durch die Forschungsinitiative „Zukunft BAU“) hat jedoch aufgezeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen baulicher Struktur und dem Übertragungsrisiko von Infektionserregern gibt (Stiller et al. 2016; Stiller et al. 2017 71 ff.). Demnach gibt es eine Evidenz für den Vorteil der Ausstattung der Intensivstationen mit einem möglichst großen Anteil von Einbettzimmern. Daraus resultierend sollten in der Zukunft deutlich mehr Einzelzimmer auf Intensivstationen gebaut werden, optimal sogar 100 %.

Bei der Übertragung von Krankheitserregern spielt auch die Infektion über die Raumluft (Tröpfchen & Partikel) eine Rolle. Dies konnte in verschiedenen Studien belegt werden (Correia et al. 2020).

Die erhobenen Meldedaten des Robert-Koch-Instituts von Infektionen mit dem Erreger SARS-CoV-2 wurden bisher nicht orts- und gebäudespezifisch ausgewertet. Daher bestanden keine Erkenntnisse zum Zusammenhang von Gebäudestruktur, Population und Infektionsgeschehen. Parallel zum Forschungsprojekt hat sich währenddessen international die Studienlage sehr dynamisch verändert. Daher wurden mehrfache Updates des Systemic Reviews der Charité durchgeführt.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Die Bewältigung außergewöhnlicher Pandemien setzt ein effizientes Zusammenwirken und eine ressortübergreifende Zusammenarbeit aller beteiligten Fachbereiche und Einrichtungen voraus. Das zeigen die bisherigen Erfahrungen, die im Zusammenhang mit der seit Ende 2019 weltweiten Ausbreitung des Coronavirus (SARS-CoV-2) stehen. Von dem neu auftretenden Corona-Virus und seiner schnellen globalen Verbreitung geht eine rasant wachsende Gefahr aus, die alle Lebensbereiche des Menschen betrifft. Dieser Gefahr standen zu Projektbeginn ein Mangel an (neuen) wirksamen Medikamenten sowie unzureichende präventive und diagnostische Möglichkeiten gegenüber.

Die Entwicklung von Lösungen zur verbesserten Kontrolle und Bekämpfung der COVID-19-Pandemie war daher nicht nur einer isolierten Gruppe von Fachleuten vorbehalten, sondern erfordert die Beteiligung von

Fachkräften aus völlig unterschiedlichen Disziplinen. Dies schließt insbesondere auch die Infrastruktur und deren Gebäude, die Materialität und die Haus- und im speziellen die Lüftungstechnik mit ein. Ein zentraler Punkt ist hierbei die Hygiene im Gebäude, die durch das Verhalten der Nutzenden und insbesondere durch Desinfektionsmaßnahmen bestimmt wird. Ein weiterer Punkt ist der bauliche Zustand eines Gebäudes und seine Funktionalität in Form von Prozessabläufen.

Im Verlauf der Ausbreitung des SARS-CoV-2-Virus wurde jedoch deutlich, dass zu wichtigen Fragen des infrastrukturellen Krisenmanagements ein hoher Handlungsbedarf bestanden, insbesondere bei der Entwicklung einheitlicher Empfehlungen. Hinzu kam die geringe wissenschaftliche Evidenz zu einer Reihe höchst relevanter Fragestellungen: Durch welche baulichen und technischen Maßnahmen kann die Übertragung des Virus effektiv kontrolliert bzw. vermieden werden? Welche Infrastrukturen sind in Bezug auf die Optimierung von baulichen Maßnahmen besonders relevant? Welche Materialien eignen sich für eine effektive Reinigung und Desinfizierung? Wo entstehen die meisten Hygienefehler?

Öffentliches Interesse

Die COVID-19-Pandemie wurde durch das SARS-CoV-2 Virus verursacht, das eine COVID-19 Erkrankung auslösen kann, die wiederum zu weiteren schwerwiegenden Erkrankungen führen kann. Da dieser neue Erreger zuvor nicht oder sehr lange nicht in der menschlichen Bevölkerung vorgekommen ist, bestand zu Projektbeginn noch keine effektive Impftherapie zu dieser Viruserkrankung. Das menschliche Immunsystem war daher nahezu ungeschützt dem Erreger ausgesetzt. Viren werden neben dem Klimawandel als eine der maßgeblichen Bedrohungen für die Menschheit angesehen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) weist darauf hin, dass auch ein pandemisches Virus, das bei gesunden Menschen überwiegend vergleichsweise milde Symptome verursacht, durch die hohe Zahl von Erkrankten in einem begrenzten Zeitraum die Gesundheitssysteme eines Staates überlasten und schwere volkswirtschaftliche Verwerfungen auslösen könne (WHO 2009).

Kritische Infrastrukturen haben eine zentrale Bedeutung für das Gemeinwesen. Beeinträchtigungen oder Ausfälle durch einen Pandemiefall können zu erheblichen Störungen wie Versorgungsengpässen führen (BBK 2007). In der Folge kann die öffentliche Sicherheit gefährdet sein, und es können hohe volkswirtschaftliche Schäden entstehen. Das vorliegende Projekt nimmt den Schutz kritischer Infrastrukturen und deren Widerstandsfähigkeit gegen Störungen im Pandemiefall in den Fokus. Dabei gilt es, den Blick über das Gesundheits- und Pflegewesen zu erweitern und auf Infrastruktursysteme zu richten, die für die Aufrechterhaltung einer funktionsfähigen Gesellschaft ebenso unerlässlich sind. Dazu gehören unter anderem Bildungseinrichtungen, Verkehrsbauten, Verwaltungsgebäude, Supermärkte und Produktionsstätten. Infolge einer Pandemie können Störungen in einer Infrastruktur folgenschwere Effekte auslösen, die weitreichende Auswirkungen auf andere Infrastrukturen haben. Deshalb müssen kritische Infrastrukturen zukünftig stärker sektor- und grenzübergreifend betrachtet werden.

Zielstellung

Konkrete Projektziele

Das Projekt erarbeitet interdisziplinär effektive Strategien zur Kontrolle und zum Umgang mit Ausbreitungswegen von Erregern zum Schutz kritischer Infrastrukturen. Ziel des Verbundes ist die sektorübergreifende Bewertung von Risikofaktoren zur Infektionsübertragung in Abhängigkeit des Erregers anhand bestehender schützenswerter Infrastrukturen und der damit verbundenen Identifizierung prozessualer Abläufe. Diese wurden in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt und gewichtet, um konkrete Handlungsempfehlungen zur Unterbrechung von Infektionsausbreitungswegen für die Bereiche Bau, Material und Haustechnik abzuleiten. Ausgewählte Modellösungen für konkrete Problemstellungen wurden erarbeitet und vorgestellt.

Die erarbeiteten baulichen Lösungen wurden hinsichtlich ihrer Eignung und Zweckmäßigkeit unter Einbeziehung einer groß angelegten fachlichen Nutzendenbefragung überprüft. Als Nutzendengruppen wurden dafür die Bereiche Architektur, Design, Medizin, Materialwissenschaft, Haustechnik, Gesundheitswissenschaft, und Mitglieder von Gesundheitsverbänden involviert. Die Evaluationsmethoden wurden so an einer hohen Anzahl von Personen durchgeführt und anhand von qualitativen und quantitativen Ergebnisparametern aufbereitet.

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Mittel- und langfristiges Ziel des Projekts ist die Bereitstellung von Planungshilfen, die zu einer infektionspräventiven Baupraxis führen. Planende und Nutzende der betrachteten Infrastrukturen sollen befähigt werden, infektionspräventiv zu bauen, in einer pandemischen Situation infektionspräventiv reagieren und den Betrieb umstellen zu können, sowie die erforderliche Infrastruktur langfristig instand halten zu können. Dadurch sollen im Normalbetrieb Infektionen vorgebeugt werden und in pandemischen Situationen der Weiterbetrieb kritischer Infrastrukturen in unserer Gesellschaft sichergestellt werden.

Ergebnisse und Planungshilfen

Abgeleitete Entwurfsprinzipien	→ Seite 52
Allgemeine bauliche Empfehlungen	→ Seite 64
Bauliche Empfehlungen Schulen	→ Seite 68
Bauliche Empfehlungen Kindergärten	→ Seite 73
Bauliche Empfehlungen Alten- und Pflegeheimen	→ Seite 77
Bauliche Empfehlungen Arztpraxen	→ Seite 83

Forschungsdesign

Arbeitshypothesen

KERNTHESE 1) Kritische Infrastrukturen haben eine zentrale Bedeutung für das Gemeinwesen. Beeinträchtigungen oder Ausfälle in Folge einer Pandemie können zu erheblichen Störungen wie Versorgungsengpässen führen. Deren Widerstandsfähigkeit gegen Störungen stehen im Fokus. Dabei gilt es, den Blick auf Infrastruktursysteme, wie z. B. Gesundheits- und Pflegewesen, zu erweitern, die für die Aufrechterhaltung einer funktionsfähigen Gesellschaft ebenso unerlässlich sind, wie z. B. das Bildungs- oder Verwaltungswesen.

KERNTHESE 2) Die Erarbeitung neuer Konzepte zur Infektionskontrolle erfordert eine Zusammenarbeit über fachliche Grenzen hinweg. Die Erarbeitung von konkreten Handlungsempfehlungen zur Unterbrechung von Infektionsausbreitungswegen muss unter Einbindung der Disziplinen Bau, Material, Haustechnik und Hygiene erfolgen.

KERNTHESE 3) Bauliche und technische Maßnahmen können das Übertragungsrisiko von Infektionserregern in kritische Infrastrukturen reduzieren und hierdurch die Anzahl der Infektionen senken.

KERNTHESE 4) Es besteht ein hoher Bedarf an einheitlicher Bauplanung von kritischen Infrastrukturen im Bereich der Infektionsprävention. Den Planenden wird aufgrund der unübersichtlichen länderspezifischen Vorschriftenlage und Standards die Planungstätigkeit erschwert.

Forschungsfragen

Bau

1. Welche baulichen Maßnahmen unterstützen nachhaltig und effektiv die Infektionsprävention?
2. Welche baulichen Maßnahmen gilt es angesichts der COVID-19 Pandemie zügig umzusetzen?
3. Wie groß ist der Effekt der Prävention, der durch eine bauliche Interventionsmaßnahme erzielt werden kann?
4. Welche kritischen Infrastrukturen stehen im Pandemiefall im Fokus?
5. Welche Maßnahmen für die bauliche Infektionsprävention gibt es, und wie können sie für die neuen Herausforderungen angewendet werden?

Hygiene

6. Wie kommen Infektionsübertragungen in welchen Infrastrukturen zustande?
7. Wie ist der zeitliche und örtliche Auftritt von Infektionsübertragungen?
8. Welche sinnvollen Hygienemaßnahmen gibt es?
9. Welche Evidenz zur baulichen Infektionsprävention besteht in der Literatur?
10. Wie ist die Einschätzung von Fachkräften (Planendene, Hygieniker und Hygienikerinnen, Epidemiologen und Epidemiologinnen) und Nutzenden?

Material

11. Welche Oberflächen können als hygiesicher eingestuft werden und welche lassen sich leicht reinigen?
12. Welche mechanischen, chemischen und physikalischen Einwirkungen auf das Material müssen für welche Einsatzbereiche berücksichtigt werden?
13. Mit welcher Materialwahl kann das von unbelebten Feststoffoberflächen ausgehende Infektionsrisiko dauerhaft reduziert werden?
14. Wie verändert sich im Alterungsprozess der chemische Aufbau und die physikalische Struktur eines Materials und was bedeutet dies für den potentiellen Übertragungsweg?

Haustechnik

15. Welche technischen Maßnahmen unterstützen nachhaltig und effektiv die Infektionsprävention?
16. Welche technischen Maßnahmen gilt es angesichts der COVID-19 Pandemie zügig umzusetzen?
17. Wie groß ist der Effekt der Prävention, der durch eine technische Interventionsmaßnahme erzielt werden kann?
18. Welche geringinvestiven und ad-hoc Maßnahmen können an bestehenden Lüftungsanlagen/Entrauchungsanlagen durchgeführt werden, die zur Verringerung des Infektionsrisikos beitragen?

Methodischer Ansatz

Um eine praxisnahe Bewertung des Umgangs mit der baulichen Umgebung innerhalb der COVID-19-Pandemie durchzuführen, wurden zudem die Nutzenden der betrachteten Infrastrukturen in mehreren ausgewählten Gebäudetypologien besucht und digital, sowie vor Ort anhand eines Leitfadenterviews befragt. Zudem wurden mathematische Modelle zur Berechnung von Infektionsrisiken und eine Literaturrecherche zur Lüftungstechnik durchgeführt. Ein laufendes Systemic Review erkundet die Studienlage der ausgesuchten Infrastrukturen hinsichtlich der Lüftungstechnik und Hygiene. Mechanische, chemische und physikalische Reinigungsverfahren beproben die Reinigungs- und Desinfektionsmittelbeständigkeit der anwendungsbezogenen Materialauswahl. Im Detail wurde pro Institut wie folgt vorgegangen:

1. Strukturierte Erhebung organisatorischer, baulicher und technischer Unterschiede von definierten kritischen Infrastrukturen; Bewertung nach infektionspräventiver Relevanz (TU Braunschweig, Charité und TU Berlin): An Beispielgebäuden wird ein Katalog von Faktoren (z. B. bauliche Struktur, Materialität, Nutzungsgrad) erhoben und bewertet. Unterstützende Methoden: Vor-Ort-Begehungen, Fachkräfte-Workshops, B Nutzenden- und Fachkräfte-Befragung.
2. Wissenschaftliche Analyse zu (a) den Einflussgrößen, die auf das Ausbreitungsverhalten von luftgetragenen Erregern in kritischen Infrastrukturen einwirken und (b) existierenden Lüftungskonzepten, die eine Separierung von Gebäudebereichen ermöglichen (TU Berlin): Die aktuelle Literatur wird zu diesem Thema gesichtet und Ergebnisse zu laufenden Projekten geprüft. Anhand von numerischen Simulationen wird die Effektivität der Lüftungskonzepte geprüft und bewertet.
3. Untersuchungen zur Reinigbarkeit von Materialien (TU Braunschweig) in Bezug auf die definierten kritischen Infrastrukturen: Aufzeigen der Veränderungen relevanter Eigenschaften (z. B. Rauheit, freie Oberflächenenergie, Härte) verschiedener Materialien durch mechanische, chemische und physikalische Einwirkungen. Hiermit werden wesentliche Aspekte wie mechanischer Abrieb durch Nutzung sowie Alterungserscheinungen abgebildet.
4. Recherche zu rechtlichen Vorgaben (TU Braunschweig, Charité, TU Berlin): Intensive und kritische Literaturrecherche (Systemic Review) zu Vorgaben baulicher Ausstattung von definierten kritischen Infrastrukturen; bestehende Regelungen sind teilweise jahrzehntealt und entsprechen zum Teil nicht mehr den gängigen Empfehlungen der Fachgesellschaften.
5. Simulation Raum und Prozess (TU Braunschweig): Die baulichen Maßnahmen werden durch die Nutzung eines am Institut zur Verfügung stehenden Labors virtuell dargestellt. Durch diese Methode können unter der Interaktion der Nutzenden im Kontext zukünftiger Arbeitsumfelder visualisiert und bewertet werden.

Projektteam und Organisation

Das Forschungsteam vereint die vier Disziplinen Bau, Hygiene, Material und Haustechnik, vertreten durch das Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau (TU Braunschweig), das Institut für Hygiene und Umweltmedizin (Charité Universitätsmedizin Berlin), das Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz (TU Braunschweig) und das Hermann-Rietschel-Institut (TU Berlin).

Alle Institute haben langjährige und gemeinsame Forschungserfahrung in unterschiedlichen Bereichen der Gesundheit und der Infektionsprävention und sind als Forschungseinrichtungen bekannt und etabliert. Das Robert Koch-Institut (Berlin) ist in beratender Funktion in das Forschungskonsortium integriert.

Diese Themenbereiche wurden abgedeckt:

BAU: Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau (IKE), TU Braunschweig

HYGIENE: Institut für Hygiene und Umweltmedizin, Charité Berlin (CB)

MATERIAL: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB), TU Braunschweig

HAUSTECHNIK: Hermann-Rietschel-Institut (HRI), TU Berlin

INFEKTIOLOGIE: Robert Koch-Institut (RKI), Berlin, beratend

Die inhaltliche Auseinandersetzung und Bearbeitung fanden überwiegend an den beteiligten Instituten statt. Die gewünschte interdisziplinäre Betrachtung der Herausforderungen und Ergebnisse wurde in Form von regelmäßigen Forschungstreffen aller beteiligten Partner umgesetzt. Hierzu wurden beinahe monatlich digitale und persönliche Forschungstreffen aller Projektbeteiligten sowie weitere, kleinere Treffen in Präsenz und digital abgehalten, um eine gemeinsame Strategieentwicklung abzustimmen, Arbeitsergebnisse und Wissen auszutauschen, zu diskutieren und zu konsolidieren. Durch den laufenden Wissensaustausch und die Diskussion von Ergebnissen konnte eine umfängliche interdisziplinäre Betrachtung durchgeführt werden.

Arbeitspakete und Meilensteine

AP1_BASISPERIODE: Bauwissenschaftliche Analyse und Bewertung infektionsrelevanter Bereiche kritischer Infrastrukturen und Priorisierung dieser Infrastrukturen für weitere Untersuchungen; Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche zu nationalen und internationalen Forschungsstudien; intensiver Wissensaustausch mit allen beteiligten Projektpartnern und hinzugezogenen Fachkräften (z. B. durch Workshops). Definierung, Erarbeitung und Vorstellung von ersten ausgewählten baulichen Modellösungen und Materialempfehlungen, die für konkrete Problemstellungen im Rahmen des Pandemiefalles COVID-19 mit großer Wahrscheinlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Unterbrechung von Infektionsübertragungswegen haben.

AP2_MODELIERUNGSPERIODE: Entwicklung praxistauglicher baulicher Musterlösungen für infektionsrelevante Bereiche der definierten Infrastrukturen für (a) das gängige Infektionsgeschehen und (b) für einen vergleichbaren Pandemiefall COVID-19 Untersuchungen ausgewählter Materialien und deren Oberflächen zur Reinigbarkeit und Abnutzung zur dauerhaften Reduzierung von Übertragungswegen; Untersuchungen zur Raumluftströmung unter Einbeziehung relevanter Einflussgrößen wie Raumgröße, Personenbelegung, Einrichtung und Lüftungsprinzip

AP3_INTERPRETATIONSPERIODE: Zusammenführung der in AP 2 identifizierten Teillösungen bezüglich baulich-funktioneller Gebäudestruktur, Gebäudetechnik, und Materialeinsatz zu ganzheitlichen Lösungsansätzen der in AP 1 priorisierten kritischen Infrastrukturen. Evaluierung der Ergebnisse durch die beteiligten Projektpartner und hinzugezogenen Fachkräften.

AP4_DOKUMENTATIONSPERIODE: Überführung der Ergebnisse in ein praxisorientiertes „Weißbuch zur baulichen Infektionsprävention kritischer Infrastrukturen“; das Weißbuch generiert Handlungsempfehlungen sowohl für den „Normalbetrieb“ als auch für den Pandemiefall. Aufbau der Open-Access Datenbank.

MEILENSTEIN 1: Erarbeitung und Vorstellung erster ausgewählter baulicher Modellösungen und Materialempfehlungen, die nachhaltig und effektiv die Infektionsprävention unterstützen.

MEILENSTEIN 2: Erstellung eines Lastenheftes mit Handlungsempfehlungen für kritische Infrastrukturen für die Betrachtungsebenen Lage, Gebäude, Raum und bauliches Detail unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse der Disziplinen Bau, Material und Haustechnik

Die Arbeitspakete waren in folgende Unterarbeitspakete unterteilt:

AP1 UP-1: Strukturierte Erhebung organisatorischer, baulicher und technischen Unterschiede von definierten kritischen Infrastrukturen, Priorisierung dieser Infrastrukturen für weitere Untersuchungen (IKE, IBMB, HRI)

UP-2: Strukturierte Erhebung prozessuales Hygienemanagement von definierten kritischen Infrastrukturen nach infektionspräventiver Relevanz (CB)

UP-3: Definierung, Erarbeitung und Vorstellung von ersten ausgewählten baulichen Modelllösungen und Materialempfehlungen (Alle)

AP2 UP-1: Entwicklung praxistauglicher baulicher Musterlösungen für infektionsrelevante Bereiche der definierten Infrastrukturen für (a) das gängige Infektionsgeschehen und (b) für einen vergleichbaren Pandemiefall COVID-19 (IKE)

UP-2: Systematische Literaturrecherche zu baulichen Maßnahmen der Infektionsprävention zu definierten Infrastrukturen (CB)

UP-3: Untersuchungen ausgewählter Materialien und Oberflächen zur Reinigbarkeit und Abnutzung zur dauerhaften Reduzierung von Übertragungswegen (IBMB)

UP4: Untersuchungen zu Raumluftrömung unter Einbeziehung relevanter Einflussgrößen wie Raumgröße, Personenbelegung, Einrichtung und Lüftungsprinzip (HRI)

AP3 UP1: Zusammenführung der in AP 2 identifizierten Teillösungen bezüglich baulich-funktioneller Gebäudestruktur, Gebäudetechnik, und Materialeinsatz zu ganzheitlichen Lösungsansätzen

UP2 Evaluierung der Ergebnisse der beteiligten Projektpartner und Fachkräfte

AP 4 UP1 Erstellung einer Open-Access-Datenbank und der Struktur des Weißbuches

UP2 Überführung der Ergebnisse in einen praxisorientierten Maßnahmenkatalog

Projektverlauf

Gemeinsames Vorgehen

Zu Beginn des Projekts entschieden sich die Forschungspartner für das folgende Vorgehen. Jeder Projektabschnitt sollte für alle Infrastrukturen durchlaufen sein, bevor die nächste Phase begann.

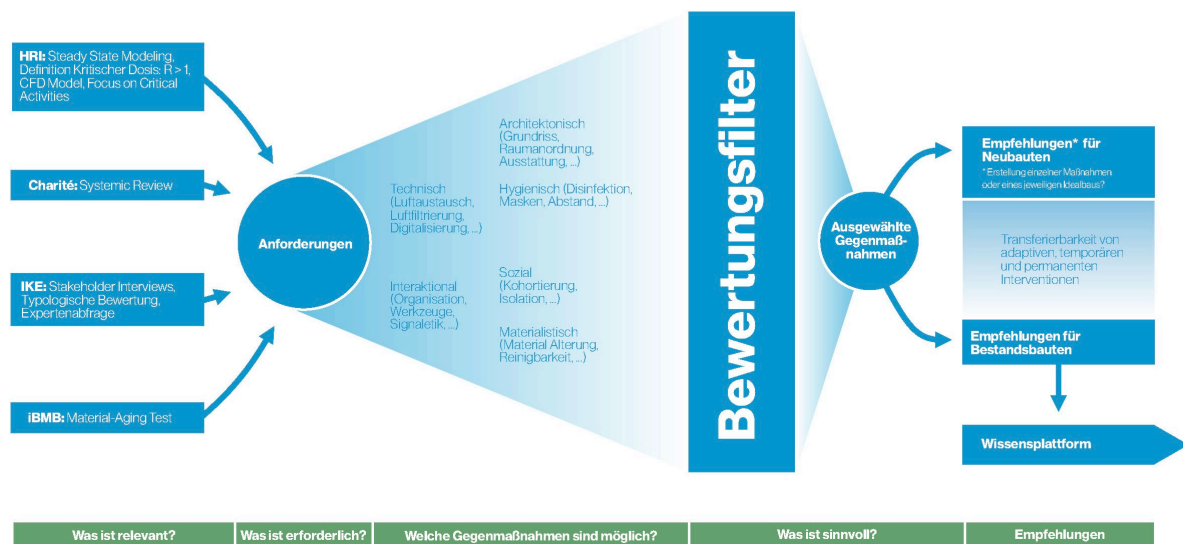
Zentrale Fragen im Vorgehen waren:

- Was ist relevant?
- Was wird benötigt?
- Was ist möglich?
- Was ist sinnvoll?

Im ersten Schritt wurden die infektionskritischen Parameter identifiziert. Dazu zählen unter anderem Tätigkeiten, Personenaufkommen, Widerstand gegen Maßnahmen, Dosis und Zeitdauer. Daraus erfolgte die Definition von Zielen, wie das Infektionsrisiko reduziert werden kann. Anschließend wurden interdisziplinäre und intradisziplinäre Ansätze zur Erreichung der Ziele gesammelt. Daran schloss sich eine Bewertung der Durchführ- und Realisierbarkeit sowie Relevanz der gesammelten Maßnahmen an. Die verbliebenen Maßnahmen wurden gemeinsam als Empfehlungen ausgesprochen.

Eine weitgehend unabhängige Durchführung des Projekts war alleine dem IBMB vorbehalten, da die Testreihen unabhängig der Erkenntnisse der anderen Disziplinen durchgeführt werden konnten. Jedoch erforderten einige Fragestellungen zu Beginn und zum Ende zwingend eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. So musste z.B. geklärt werden, welche Desinfektionsmittel für die chemische Alterung und welche Funktionsbereiche für die Auswertung der Testergebnisse und Formulierung von Empfehlungen herangezogen werden sollten.

Abbildung 1
Vorgehen im Projekt



Quelle: IKE

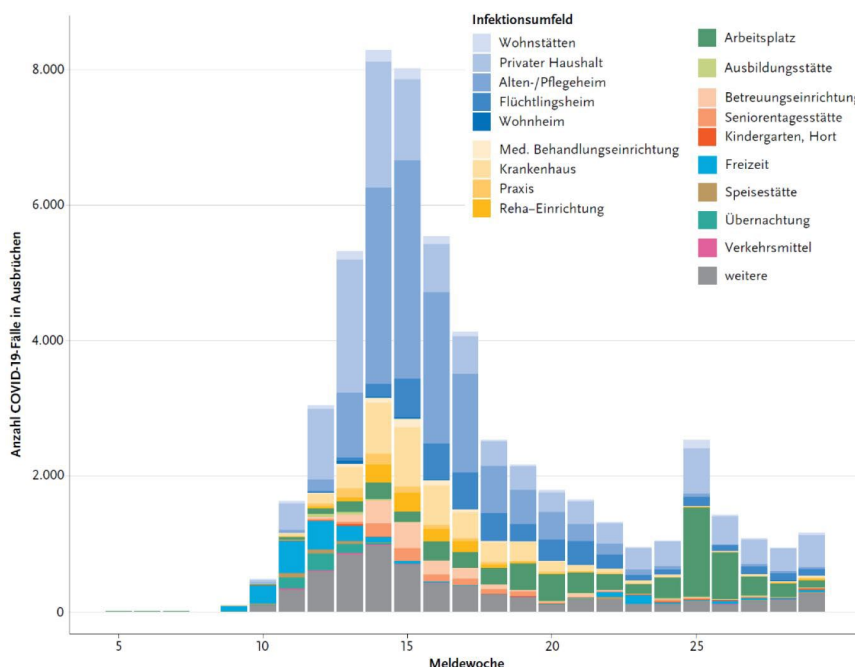
Festlegung zu betrachtender kritischer Infrastrukturen

Es wurden vier kritische Infrastrukturen von den beteiligten Forschungspartnern als relevant ausgewählt. Diese wurden auf ihre jeweiligen hygienischen, baulichen, technischen und materialwissenschaftlichen Anforderungen hin untersucht:

- Schulbau
- Kindertagesstätte
- Arztpraxis
- Alten- und Pflegeheim

Die definierten Infrastrukturen haben mit großer Wahrscheinlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Unterbrechung von Infektionsübertragungswegen des Erregers SARS-CoV-2. Abbildung 2 zeigt eine Verteilung der COVID-19-Fälle nach Infektionsumfeld. Zudem sind die gewählten Infrastrukturen zentral bei der Sicherstellung pädagogischer Versorgung und Bildung von Kindern und Jugendlichen, bei der Durchführung von flächendeckenden Impfkampagnen und der medizinischen Allgemeinversorgung sowie bei der Pflege von Senioren und Seniorinnen. Letztere erkranken darüber hinaus häufig mit einem schwerwiegenden Krankheitsverlauf und sind besonders schutzbedürftig.

Abbildung 1
Anzahl COVID-19-Fälle je nach Infektionsumfeld und Meldewoche



Quelle: Robert-Koch Institut, Epidemiologisches Bulletin, September 2020

Abfolge Gebäudetypen

Aufgrund der überdurchschnittlich hohen Komplexität der zu betrachtenden Gebäude und Prozesse wurde eine konsekutive Bearbeitung der Gebäudetypen festgelegt (Schulen, Kitas, Alten-/Pflegeheime, Arztpraxen). Dadurch konnten die gebäudespezifischen Erkenntnisse zwischen den einzelnen Disziplinen besser ausgetauscht und implementiert, sowie gebäudespezifische und übergreifende Maßnahmen entwickelt werden. Eine parallele Betrachtung aller Infrastrukturen wurde vor allem aus architektonischer Sicht als nicht durchführbar erachtet, da die zu beachtenden Parameter, wie Raumprogramm, Nutzende, Prozesse usw. jeweils einzigartig sind. Hingegen konnten Forschungsprozesse und Erkenntnisse in den anderen Disziplinen einfacher verallgemeinert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Disposition der Nutzendengruppen führten die Mitarbeiterinnen der Charité gesonderte Systemic Reviews für die einzelnen Infrastrukturen durch.

Was ist relevant?

In Deutschland wird erwartet, dass viele der untersuchten Infrastrukturen auch weiterhin im Bestand betrieben werden. Es wurde daher von allen Forschungspartnern als sinnvoll erachtet, eine Betrachtung von sowohl

Bestands- als auch Neubauten bei der Entwicklung von Empfehlungen durchzuführen. Der Fokus sollte dabei auf die infektionsrelevanten Prozesse im jeweiligen Gebäude statt auf spezifische Räume gelegt werden. Andernfalls könnten relevante Faktoren, die zum Infektionsrisiko beitragen, nicht sinnvoll beeinflusst werden. Dabei hat das IKE jeden der ausgewählten Gebäudetypen von der Makro-Skala des Gebäudes über den Grundriss, den einzelnen Raum bis hin zur Mikro-Skala des baulichen Details untersucht.

Aufgrund der vorherrschenden COVID-19-Pandemie legten die Forschungspartner einen Fokus auf die Betrachtung luftgetragener Infektionsübertragungswege bei der Entwicklung von Gegenmaßnahmen. Da Kindergärten aber auch Alten- und Pflegeheime untersucht wurden, sollte die Unterbrechung von Kontaktinfektionswegen ebenso einbezogen werden.

Eine weitere zentrale Frage stellte das Ausmaß dar, in dem die Infektionswahrscheinlichkeiten durch die Maßnahmen reduziert wird. Dies lässt sich aufgrund der sich dynamisch entwickelnden Eigenschaften relevanter aktueller und zukünftiger Erreger, sowie der sehr individuellen Situationen in den einzelnen Infrastrukturen nicht absolut beantworten. Vielmehr lässt sich nur pauschal Einfluss auf gängige Faktoren nehmen und teilweise relativ berechnen, wie sehr die Infektionswahrscheinlichkeit sinkt.

Als Ziel wurde die Entwicklung von Maßnahmen präventiver, adaptiver und reaktiver Art definiert. Dadurch soll das Infektionsrisiko sowohl im Normalbetrieb gesenkt werden, als auch den Nutzenden der betrachteten Infrastrukturen die Möglichkeit geben auf ein lokales Infektionsgeschehen oder eine pandemische Lage reagieren zu können. Das Ausmaß bestimmter Maßnahmen und deren weitreichende Einflüsse, beispielsweise hinsichtlich sozialer oder energetischer Kosten, erfordert ein situatives hinzuschalten, um Begegnungen zwischen Menschen sicherer zu gestalten, statt dauerhaft zu beeinflussen.

Die Maßnahmen sollten vorrangig eine prozessual-interaktional, baukonstruktiv-technische, hygienische und wenn möglich auch sozialpsychologische Form haben, sodass ein ganzheitliches Repertoire an möglichen Maßnahmen zur Verfügung steht. Als zentrale Einflussgrößen auf die Infektionsübertragung in Gebäuden wurden die Faktoren Aufenthaltszeit, Aktivität, Disposition der Nutzendengruppe(n), Personendichte, Frequenz der Zusammenkunft, Dosis (CO₂-Konzentration über Zeitraum), Anzahl der Personenkontakte, Zugangsmöglichkeiten und Flexibilität von Abtrennungsmöglichkeiten identifiziert.

Baukonstruktive und Prozessuale Betrachtung des Instituts für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau

Abfrage infektionskritischer Funktionsbereiche und Tätigkeiten

Zur Definierung, welche relevanten Prozesse und folglich Räume analysiert und betrachtet werden sollten, wurde eine interne Expertenbefragung an den beteiligten Forschungseinrichtungen durch das IKE durchgeführt. Dazu sollten die einzelnen Items einer durch das IKE vorbereiteten Liste anhand einer 5-stufigen Skala durch die befragten Fachkräfte hinsichtlich ihres Infektionspotenzials relativ zum Rest der Liste bewertet werden. Da es keine einheitlichen Leitlinien und Empfehlungen zu den baulichen Anforderungen der Infektionsprävention gibt, konnte bei der Entwicklung des Fragebogens auf keine Quelle Bezug genommen werden. Stattdessen wurde die Liste auf der Basis der aktuellen Kenntnisse und Erfahrungen der Beschäftigten des Instituts erarbeitet und mit den weiteren Partnern abgestimmt. Die Bewertungen konnten von den einzelnen Institutionen kommentiert werden.

Tabelle 1
Abfrage infektiöskritischer Funktionsbereiche in der Schule

Funktionsbereiche der Schule	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Klassenraum			X	XXX	
Fachräume (Biologie, Chemie usw.)			X	XXX	
Musikräume			X		XXX
Lehrerzimmer		X	XX		X
Eingangsbereich	XX	X		X	
Treppenhaus	XX		XX		
Gangbereich	X	X	XX		
Aula			X	XX	X
Pausenhof	XXXX				
Pausenraum		X	X	X	X
Mensa			X	XX	X
Sanitäranlagen (Schüler*Innen)		X	XX		X
Sanitäranlagen (Lehrer*Innen)		X	XX		X
Umkleiden (Sport)			XXXX		
Sanitäranlagen (Umkleiden)			XXX		X
Sporthalle		X	X	XX	
Sportplatz	XXX	X			
Verwaltung	XX	X		X	
Sekretariat	X	XX		X	
Garderobe/Spinde		XXXX			
Putz- und Entsorgungsräume	XX	XX			
Mensaküche		X	XXX		
Ausgabe von Spielgeräten	XX	X	X		
Bibliothek		XX	XX		

Quelle: IKE

Tabelle 2
Abfrage infekionskritischer Tätigkeiten in der Schule

Tätigkeiten in einer Schule	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Unterricht					
Frontalunterricht			XX	X	
Einzelarbeiten		XX	X		
Gruppenarbeiten				XX	X
Referate			XXX		
Arbeit am Computer		XX	X		
Versuche (Fachunterricht bspw. Chemie)			X	XX	
Sportunterricht				XX	X
Musikunterricht					XXX
Theaterunterricht			X		XX
Klassenraumwechsel nach Stundenende		X	X		
Pause im Außenbereich	XXX				
Pause im Innenbereich				X	X
Freistunde (Schüler*Innen)			XX		X
Freistunde (Lehrer*Innen)			XX		X
Essensausgabe		X	X	X	
(Mittag-)Essen			X	X	X
Verwaltungstätigkeiten		X	X	X	
Verwaltungstätigkeiten mit Publikumsverkehr		XX	X		
Nutzung der Sanitäreinrichtungen		X	X	X	
Hausmeisterstätigkeiten			XX		
Ausgabe von Lehrmaterialien		X	X		
Ausgabe von Spielgeräten		X	X		
Reinigungsarbeiten		X	X		

Quelle: IKE

Tabelle 3
Abfrage infektiöskritischer Tätigkeiten in der Kindertagesstätte

Funktionsbereiche in Kindertagesstätten	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Eingangsbereich				X	
Außenraum/Spielplatz					
Garderobe				XXX	
Gruppenraum				XXXX	XX
Schlafraum				X	XX
Mehrzweckraum				XXXX	
Küche				X	
Essensraum				XXXXX	
WC/Sanitäranlagen (Kinder)				X	X
Personalraum mit Teeküche					
Umkleideraum (Personal)					
WC/Sanitäranlagen (Personal)					X
Putz- und Entsorgungsräume					
Verwaltungsraum				X	

Quelle: IKE

Tabelle 4
Abfrage infektiöskritischer Tätigkeiten in der Kindertagesstätte

Tätigkeiten in einer Kindertagesstätte	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Ankunft der Kinder				XX	
Abholung der Kinder				X	X
Betreuung im Gruppenraum				X	XX
Spielen im Innenraum				XXX	XX
Spielen im Außenbereich					
Schlafen				XXX	
Essensvorbereitung/Essensausgabe					
(Mittag-)Essen				X	
Nutzung der Sanitäranlagen (Kinder)				X	
Nutzung der Sanitäranlagen (Personal)					
Pause (Personal)				X	
Reinigungsarbeiten					
Verwaltungstätigkeiten				X	

Quelle: IKE

Tabelle 5
Abfrage infektiöskritischer Tätigkeiten in der Arztpraxis

Funktionsbereiche einer Arztpraxis	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Empfangsbereich				X	
Wartezimmer mit Garderobe				XX	XX
WC (Patient*Innen)					X
Behandlungsraum				XXX	
Fachärztlicher Untersuchungsraum				XXX	
Personalraum mit Teeküche				XXX	
Personalumkleide					
WC (Personal)				X	
Verwaltungsräume				X	X
Lager für Reinigungsmaterial					
Ver- und Entsorgungsräume					
Zahnarzt					X

Quelle: IKE

Tabelle 6
Abfrage infektiöskritischer Tätigkeiten in der Arztpraxis

Tätigkeiten in einer Arztpraxis	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Empfang der Patient*Innen				XX	
Warten				XXX	
Sprechstunde				XX	
Behandlung/Untersuchung					XXX
Nutzung der Sanitäranlagen (Patient*Innen)					
Verwaltungstätigkeiten				X	
Verwaltungstätigkeiten mit Patientenkontakt				X	
Ver- und Entsorgung					
Reinigungsarbeiten					
Pause für Personal				X	
Nutzung der Sanitäranlagen					

Quelle: IKE

Tabelle 7
Abfrage infektiöskritischer Funktionsbereiche eines Alten-/Pflegeheimes

Funktionsbereiche eines Alten-/Pflegeheims	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Zimmer der Bewohner*Innen				XXX	
Sanitäranlagen (Bewohner*Innen)				X	X
Aufenthaltsraum/Seniorenclub				XXXXX	
Cafeteria				XXXX	
Essensraum				XXXX	X
Gangbereiche					
Aufzüge				XXX	X
Physiotherapieraum				XXX	XX
Behandlungsraum				XXXX	
Eingangsbereich mit Empfang					
Besucherraum				XXX	X
Sanitäranlagen (Besucher*Innen)				X	X
Außenanlage					
Aufsichtsraum					
Personalraum mit Teeküche					
Umkleiden (Personal)					
Sanitäranlagen (Personal)					X
Ver- und Entsorgungsraum					
Verwaltungsraum				X	
Putz- und Entsorgungsräume					

Quelle: IKE

Tabelle 8
Abfrage infektiöskritischer Tätigkeiten eines Alten-/Pflegeheimes

Tätigkeiten in Alten-/Pflegeheimen	Infektionskritisch				
	1	2	3	4	5
Persönliche Versorgung der Bewohner*Innen				XXX	XX
Hilfe bei Nutzung der Sanitäranlagen				X	XXX
Vorbereitung und Ausgabe der Mahlzeiten				X	
Einnahme der Mahlzeiten				X	XX
Gruppenbetreuung im Tagesablauf				XXX	
Empfang von Besucher*Innen					X
Besuch für Bewohner*Innen				XXX	X
Pause (Personal)				XX	
Nutzung der Sanitäranlagen (Personal)					
Verwaltungstätigkeiten				X	
Ver- und Entsorgungsarbeiten					
Reinigungsarbeiten					
Physiotherapie				X	XX

Quelle: IKE

Tabelle 9
Zusammenfassung Infektionskritischer Funktionsbereiche und Tätigkeiten

Schulen	Kindertagesstätten	Arztpraxen	Alten-/Pflegeheim
Infektionskritische Funktionsbereiche			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Klassenraum ■ Fachraum (Biologie, Chemie usw.) ■ Musikraum ■ Aula ■ Pausenraum ■ Mensa ■ Sanitäreinrichtungen (Schüler_innen) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gruppenraum ■ Schlafraum ■ Mehrzweckraum ■ Essensraum 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Behandlungsraum ■ Warteraum mit Garderobe ■ Fachärztlicher Untersuchungsraum ■ Personalraum mit Teeküche 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aufenthaltsraum/ Cafeteria ■ Essensraum ■ Aufzüge ■ Physiotherapieraum ■ Behandlungsraum
Infektionskritische Tätigkeiten			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Gruppenarbeiten ■ Versuche (Fachunterricht bspw. Chemie) ■ Musikunterricht ■ Pause im Innenbereich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ankunft und Abholung der Kinder ■ Betreuung im Gruppenraum ■ Spielen im Innenraum 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Behandlung/Untersuchung ■ Empfang der Patient_innen ■ Warten ■ Sprechstunde 	<ul style="list-style-type: none"> ■ persönliche Versorgung der Bewohner_innen ■ Hilfe bei Nutzung der Sanitäreinrichtungen ■ Einnahme der Mahlzeiten ■ Gruppenbetreuung im Tagesablauf ■ Besuch für Bewohner_innen ■ Pause (Personal)

Quelle: IKE

Definierung und Berechnung infektionskritischer Situationen

Auf Basis der Abfrage infektionskritischer Funktionsbereiche und Tätigkeiten wurden gebäudespezifische aber auch übertragbare prozessuale und räumliche Situationen bzw. Referenzszenarien definiert und praxisnah dimensioniert, um das Infektionsrisiko und die Schadstoffpartikelströmungen innerhalb dieser gängigen Funktionsbereiche zu analysieren. Für eine Analyse des Infektionsrisikos mittels Wells-Riley/Steady State Model wurden die Rahmendaten für acht Szenarien vom IKE erarbeitet und zur Analyse an das HRI weitergegeben.

Bekannte Gegenmaßnahmen wurden bei der Analyse auf das Referenzszenario angewendet, um das Infektionsrisiko zu senken. Bestimmte Parameter dürfen jedoch nicht unter die Schwellenwerte fallen. Andernfalls könnte die zu analysierende Tätigkeit nicht mehr sinnvoll durchgeführt werden. Die Anzahl anwesender Schüler und Schülerinnen beispielsweise derart drastisch zu reduzieren, dass kein Unterricht mehr möglich ist, muss nicht analysiert werden. Durch den Vergleich des resultierenden Infektionsrisikos des Referenz- und des sicheren Raumszenarios kann aufgezeigt werden, wo welche bekannten und/oder zusätzlichen Gegenmaßnahmen angewendet werden sollten.

Tabelle 10

Tabellarische Übersicht der definierten Szenarien zur Berechnung des Infektionspräventionspotenzials verschiedener Räumvarianten und deren Auswirkung

Referenzszenario							
Standartwert einer Prä-Covid-19-Umgebung							
Aufenthaltsdauer		# anwesender Personen		Raummaße (HxBxL)	Quelle	Lüftungsart	Fenster- und Türfläche
Ø min	Definition	Ø	Definition	Ø m			m2 Musterbauordnung 1/8 der Nettogrundfläche laut (MBO) 2002 §47 Aufenthaltsräume
Reguläre Schulstunde							
Personen sind in der Art des Frontalunterrichts angeordnet							
45	Schulstunde	25	24 Schulkinder, eine Lehrkraft	Quadrat: 7,3x7,3x3,2 Rechteck: 5,5x9,8x3,2	Raumpilot Grundlagen, S. 511 + 518	Einseitig, natürliche Belüftung	Quadrat: 6,7 m2 Rechteck: 6,7 m2
Wartezimmer einer Praxis der Allgemeinmedizin							
Bis zu 60	Schätzung	10	Menschen allen Altersklassen	4x5x2,7	x	Einseitig, natürliche Belüftung	2,5 m2
Pflegesituation im Alten-/Pflegeheim							
Bewohner oder Bewohnerin wird im Zimmer durch Pflegekraft gepflegt							
60	Schätzung	2	Senior oder Seniorin und Pflegekraft	3x4x2,7	x	Einseitig, natürliche Belüftung	1,5 m2
Schulflur während einer Pause							
Mischnutzung auch als Lagerfläche, Garderobe und zum Sitzen/Warten							
Bis zu 15	Schätzung	40	Schulkinder, eine Lehrkraft	30x1,25x3,2	Raumpilot Grundlagen, S. 484	Einseitig, natürliche Belüftung	4,7 m2
Mittagessen in einem Kindergarten							
Eine Gruppe von Kindern isst zusammen und wird von zwei pädagogischen Fachkräften dabei betreut							
60	Länge einer Mittagspause	15	13 Kinder, zwei pädagogischen Fachkräften	5x6x3	x	Einseitig, natürliche Belüftung	4 m2
Sanitäranlage							
In öffentlichen Einrichtungen mit WC und Waschbecken							
Bis zu 5	Schätzung	5	Menschen allen Altersklassen	3,2x2,68x2,7	Raumpilot Grundlagen S. 413/414	Einseitig, natürliche Belüftung	1 m2
Sportklasse in der Sporthalle							
90	Zwei Schulstunden	25	Schulkinder, eine Lehrkraft	15x27x5,5 (Einzelfeld-Sporthalle)	Neufert S. 537	Einseitig, natürliche Belüftung	51 m2

Quelle: IKE

Tabelle 11

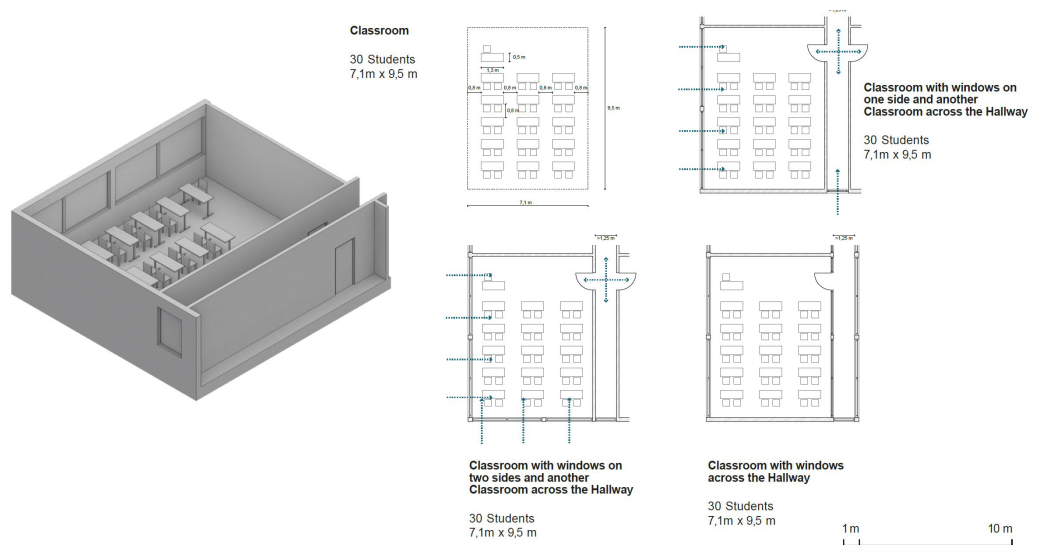
Tabellarische Übersicht der aufgrund von Interventionen angepassten definierten Szenarien mit Mindestwerten zur Berechnung des Infektionspräventionspotenzials verschiedener Räumvarianten und deren Auswirkung

Safe-Room-Szenario			
Sinnvolle Mindestwerte			
Aufenthaltsdauer (min)	# anwesender Personen	Interaktionsform	Raummaße
Reguläre Schulstunde			
Personen sind in der Art des Frontalunterrichts angeordnet			
45	13	Frontalunterricht, Schüler tragen FFP2 Masken	variabel
Wartezimmer einer Praxis der Allgemeinmedizin			
variabel	variabel	Sitzend wartend mit FFP2 Maske	variabel
Pflegesituation im Alten-/Pflegeheim			
Bewohner oder Bewohnerin wird im Zimmer durch Pflegekraft gepflegt			
40	2	Moderate bis laute Gesprächslautstärke, Pflegekraft trägt FFP2 Maske	variabel
Schulflur während einer Pause			
Mischnutzung auch als Lagerfläche, Garderobe und zum Sitzen/Warten			
Wenige Sekunden an einem Flurabschnitt	variabel	Schüler gehen und unterhalten sich, tragen FFP2 Masken	variabel
Mittagessen in einem Kindergarten			
Eine Gruppe von Kindern isst zusammen und wird von zwei pädagogischen Fachkräften dabei betreut			
30	9	Moderate Gesprächslautstärke	variabel
Sanitäranlage			
In öffentlichen Einrichtungen mit WC und Waschbecken			
Bis zu 5	variabel	Leise Gesprächslautstärke, tragen FFP2 Masken	variabel
Sportklasse in der Schulsporthalle			
90	13	Stilles Training, dabei wird Abstand gehalten	variabel

Quelle: IKE

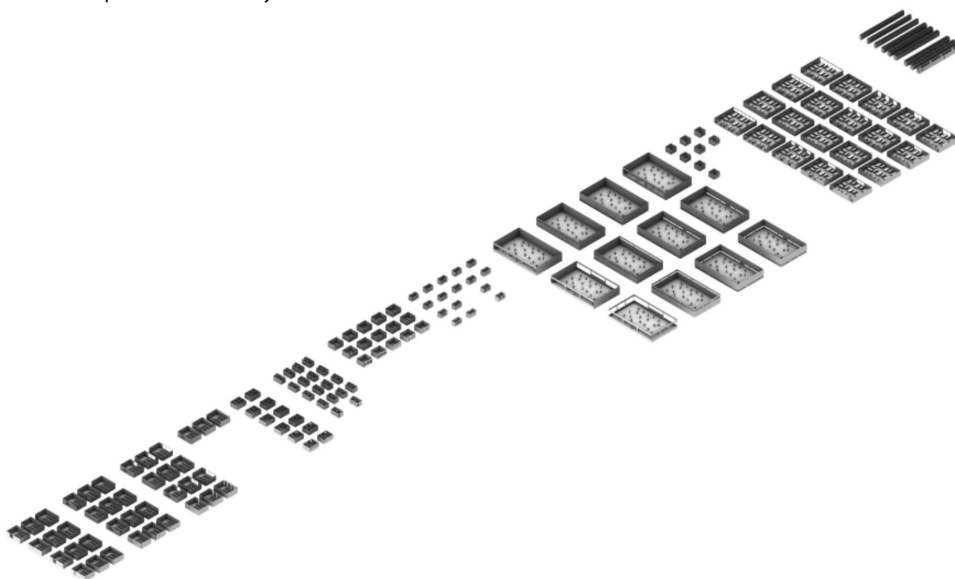
In einem Folgeschritt modellierte das IKE potentielle bauliche Varianten und Interventionsmöglichkeiten (bspw. ein-/zweiseitig belüftete Klassenzimmer, große/kleine Fenster, oben/mittig positioniert, etc.). Diese CAD-Modelle wurden dem HRI für eine vergleichende Analyse durch Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen bereitgestellt. Es wurde eine natürliche Belüftung berechnet. Die Simulationsergebnisse konnten jedoch nur eingeschränkt für die Entwicklung baulicher Empfehlungen verwendet werden, da tatsächliche Schadstoffpartikelströme multifaktoriellen Parametern zugrunde liegen, die stark variieren können (siehe Lüftungstechnische Untersuchungen des Hermann-Rietschel-Instituts). Im weiteren Projektverlauf wurden Nutzendeninterviews und typologische Bewertungen durchgeführt, um Maßnahmen zu erarbeiten, die weniger Randbedingungen unterliegen und zielgerichteter eingesetzt werden können.

Abbildung 3
Beispiel eines Szenario-Raums inklusive Abwandlungen



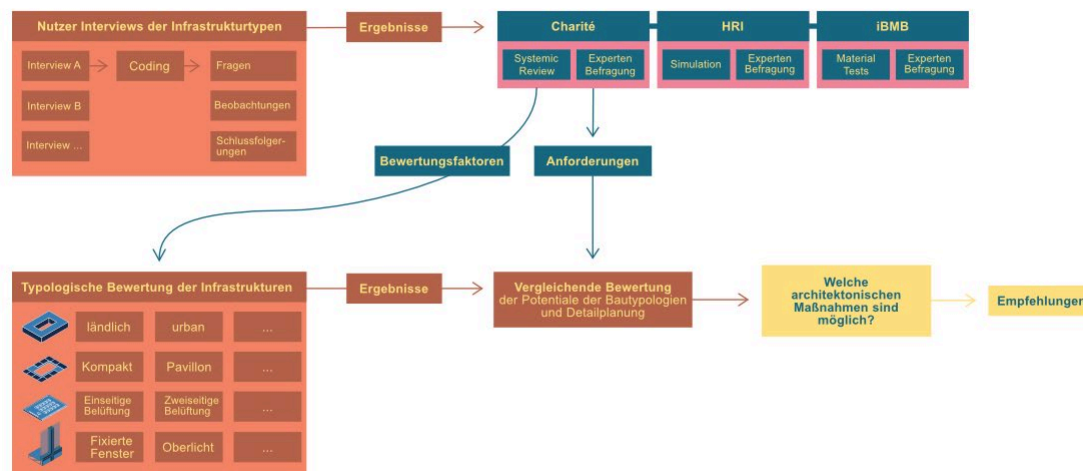
Quelle: IKE

Abbildung 4
Übersicht der 149 Raumvarianten zu den definierten infektionskritischen Szenarien zur Berechnung des Infektionspräventionspotenzials mittels Computational Fluid Dynamics



Quelle: IKE

Abbildung 5
Vorgeschlagene Methodik des IKEs



Quelle: IKE

Interviews mit Nutzenden der Infrastrukturen

Dem Forschungsteam standen zu Projektbeginn keine Erkenntnisse zum Umgang der Nutzenden der betrachteten Infrastrukturen mit den angeordneten Maßnahmen zur Verfügung. Auch waren keine Informationen zu Eigeninitiativen verfügbar. Vielmehr beschränkte sich die Informationslage auf Anekdoten, welche durch die Presse veröffentlicht wurden. Es waren zudem keine qualitativen Erhebungen bekannt. Um den Zusammenhang zwischen Maßnahmen hinsichtlich des Infektionsgeschehens, Nutzendenverhalten und gebauter Umgebung zu untersuchen, wurden explorative Leitfadeninterviews durch das IKE durchgeführt.

Ziel der Interviews ist es, die Akzeptanz und Defizite verordneter Maßnahmen in der COVID-19-Pandemie auf der Umsetzungsebene abzufragen und dabei mögliche, neue Maßnahmen und Herausforderungen durch den gebauten Ist-Zustand und Wissensstand der Nutzenden zu erörtern. Es wurden konkrete Fragen anhand eines Leitfrageninterviews zu den Themen Veränderungen im Betrieb, Informationsweitergabe, Akzeptanz der Maßnahmen, Umsetzung der Verordnungen und Richtlinien, alternative Möglichkeiten, Ressourcenverfügbarkeit, Eigeninitiativen und Wünsche der Nutzenden in den Gebäuden gestellt.

Die Interviews wurden, den Umständen entsprechend möglich, in Präsenz innerhalb der jeweiligen Einrichtung durchgeführt, um einen direkten Eindruck der gebauten und ortsspezifischen Situationen durch die jeweiligen Interviewenden zu erlangen. Von den Interviewenden wurden Fotos der Umgebung zur Unterstützung der Auswertung aufgenommen. Aufgrund der Kontaktbeschränkungen durch die COVID-19-Pandemie war zeitweise nur eine digitale Durchführung der Gespräche möglich. Durch die Bereitstellung von Fotos, Hygieneplänen und Informationsblätter der Einrichtung durch die Interviewten wurde die Datenlage für die Auswertung angereichert. Grundrisse wurden von allen Einrichtungen zur Auswertung bereitgestellt. Die Interviews dauerten zwischen 30 und 110 min. Um eine möglichst flächendeckende Erhebung zu ermöglichen, wurden Nutzende aus verschiedenen Bundesländern, Einrichtungsformen, -größen, -gebäudetypen und Einzugsgebieten interviewt. Rahmendaten zu den Personen, ihrer Karriere und den Einrichtungen wurden erfasst.

Zum Zeitraum der Interviews von Lehrkräften und Schulsozialarbeiterinnen zwischen Dezember 2020 und April 2021 waren größtenteils nur Gespräche per Videokonferenz möglich. Die interviewten Lehrkräfte waren unmittelbar durch Anordnungen der Bundesländer betroffen. Die Erfahrungen der ersten Monate der COVID-19-Pandemie lagen zu diesem Zeitpunkt noch nicht sehr lange zurück. Das Infektionsgeschehen, die Informationslage, sowie Art und Umfang der angeordneten Maßnahmen entwickelte sich dynamisch weiter. Ein Ende der Pandemie war ebenfalls noch nicht absehbar. Eine Befragung von Schülern und Schülerinnen als Perspektivenerweiterung wurde von den Forschenden angestrebt, konnte aufgrund der

Infektionsschutzaufgaben und fehlender zeitlicher und personeller Ressourcen jedoch nicht durchgeführt werden. Es wurden insgesamt neun Interviews mit in Niedersachsen und Nordrheinwestfalen angestellten Personen im Alter zwischen 27 und 55 Jahren durchgeführt. Die Arbeitserfahrung lag zwischen 3 Monaten und 23 Jahren. Vornehmlich wurden jüngere Personen im Alter von 28 bis 35 Jahren interviewt. Die Vollzeitkräfte waren als Gymnasial- oder Grundschullehrkraft in verschiedenen Stufen als Klassen- und/oder Fachlehrkraft oder als Springer zwischen Schulen und teilweise mit Zusatzausbildungen als Coach, Mediatorin und zum Thema Deutsch als Fremdsprachen tätig. Die Einrichtungen sind teils städtisch und teils ländlich durch diverse Einzugsgebiete geprägt. Die Schulgröße variiert von 170-1000 Schüler und Schülerinnen und bietet teilweise Nachmittagsbetreuung an. Teilweise gab es bestätigte Coronafälle in den Einrichtungen.

Im Anschluss wurden in Kindergärten und Nachmittagsbetreuungen Interviews im geringeren Maß durchgeführt, da die beteiligten Personengruppen, prozessualen Abläufe und Gebäudestrukturen den des Schulbetriebs ähneln. Diese Interviews konnten alle vor Ort in Präsenz während und nach dem laufenden Betrieb an vier Standorten in Braunschweig durchgeführt werden. Die interviewten Personen hatten zwischen 13 und 33 Jahren - teils in Leitungspositionen – Arbeitserfahrung. Die Einrichtungen haben konfessionelle, öffentliche und private Trägerschaften und betreuten zwischen 20 und 80 Kindern und beschäftigten zwischen 4 und 8 betreuende Personen. Auch die Baustruktur von umgebauter Altbauwohnung, Neubausolitär, Nachkriegspavillon und Containerstruktur mit unterschiedlich großem Außenbereich ist divers gewählt. Teilweise gab es bestätigte Coronafälle in den Einrichtungen. Das Betreuungsangebot reicht von Vormittags- über Mittags- bis Nachmittagsbetreuung.

Alle anschließenden acht Interviews in Arztpraxen der Allgemeinmedizin konnten ebenfalls in Präsenz durchgeführt werden. Durch das sich damals abflachende Infektionsgeschehen und die geringere Pathogenität der vorherrschenden SARS-CoV-2 Variante konnten Arztpraxen in fünf verschiedenen Bundesländern (NRW, NDS, HH, BRA, BER) und Einzugsgebieten im großstädtischen, städtischen und ländlichen Raum besucht werden. Es konnten Interviews in verschiedenen Gebäudestrukturen, Einrichtungs- und Organisationsformen sowie -größen durchgeführt werden. Dies umfasst ein medizinisches Versorgungszentrum mit Allgemein- und Facharztpraxen und einzelne Praxen die zwischen einer/m bis vier Ärzte und Ärztinnen beschäftigen, sowie eine Gemeinschaftspraxis von zwei Kinderärztinnen. Die einzelnen Praxen befinden sich in diversen Bautypologien. Dazu gehören ein umgebautes Mühlhaus, Altbauten, Mehrfamilienhäuser in urbanen Randgebieten und ein riegelförmiger Plattenbau. Die Interviews wurden zu einem Zeitpunkt durchgeführt, an dem Impfungen gegen das SARS-CoV-2 Virus bereits gängiges Alltagsgeschäft in den Praxen waren. Zwei interviewte Ärztinnen hatten ihre Praxis nach bisheriger Arbeitserfahrung in vorherigen Arztpraxen erst während der COVID-19-Pandemie eröffnet und konnten bereits erste Erkenntnisse aus dieser Phase in die Gestaltung der neuen Praxisräumlichkeiten einfließen lassen.

Die Interviews in Alten- und Pflegeheimen wurden parallel zu den Interviews der Arztpraxen durchgeführt. Es erfolgte zunächst eine Recherche der stark von Coronafällen betroffenen Einrichtungen, da dort durch die intensive Auseinandersetzung mit der COVID-19-Pandemie größere Erkenntnisse erwartet wurden. Aufgrund von Vorbehalten, Sorge vor schlechter Presse, einem starken Infektionsgeschehen innerhalb der Einrichtungen und folglich starkem Personalausfall konnte nur eine sehr geringere Anzahl an Interviewpartnern gefunden werden. Von den ursprünglich 9 Einrichtungen, welche sich zu Interviews bereit erklärten, konnten aufgrund der immer wiederkehrenden Personen- und Kontaktbeschränkungen sowie ständigem, krankheitsbedingtem Personalausfalls nur 3 Interviews geführt werden. Die Interviewten waren jedoch sehr motiviert, ihre Erfahrungen zu teilen, da bei den Interviewten Hoffnung auf bessere Arbeitsbedingungen durch infektionspräventiv gebaute Strukturen in der Zukunft bestand. Teilweise wurden Beschäftigte stark betroffener Einrichtungen interviewt, welche viele Todesfälle zu beklagen hatten, andere Einrichtungen hatten kaum Infektionsfälle vorzuweisen. Interviewte aus ersteren Einrichtungen hatten teilweise stark emotionalisierende Erlebnisse durchlebt und drastische Maßnahmen ergriffen, welche die Interviewaussagen und dessen Verlauf geprägt haben. Die Einrichtungen liegen alle im städtischen Einzugsgebiet in Niedersachsen und Nordrheinwestfalen. Die Einrichtungen sind eine Riegelbauweise aus den 60iger Jahren, eine H-Struktur aus den 2000er Jahren und eine historisch gewachsene Anlage bestehend aus Altbau, Riegelbau aus den Nachkriegsjahren und einer Kleeblattstruktur aus den 90iger Jahren. Je nach gebauter Struktur konnten unterschiedlich viele bestätigte Coronafälle festgestellt werden. Es wurden Heimleitungen

und Pflegeleitungen mit einer Arbeitserfahrung von 12 bis 34 Jahren interviewt. Die Trägerschaft ist konfessionell oder privatwirtschaftlich.

Alle Interviews wurden mittels der qualitativen Inhaltsanalyse und Mixed Methods ausgewertet. Die Interviews wurden in einer Software für qualitative Analysen induktiv und deduktiv in zwei oder mehr Durchgängen codiert. Alle Interviews bis auf die der Lehrkräfte konnten durch mehr als eine Person codiert werden, um einer Voreingenommenheit vorzubeugen. Nach der Codierung wurden thematische Zusammenfassungen pro Oberthema erstellt. Aus diesen wurden Vorschläge für Empfehlungen, Beobachtungen, Schlussfolgerungen und Forschungsfragen hinsichtlich relevanter architektonischer und prozessualer Eingriffe abgeleitet. Diese Dokumente wurden anschließend vom IKE an die Forschungspartner der Charité und des Hermann-Rietschel-Instituts zur Begutachtung weitergegeben. Dort wurde in einer gemeinsamen Betrachtung der Beschäftigten eine Kommentierung vorgenommen. Dadurch konnten bereits Fragestellungen der Nutzenden der Infrastruktur im Umgang mit ihrem Gebäude gesammelt und beantwortet werden. Beispielsweise herrschte Unklarheit, ob ein Schuh in die Klassenzimmertür gestellt werden sollte, um einen Luftaustausch über den Flur zu ermöglichen, oder Schulklassen einzeln nacheinander vom Schulhof abgeholt werden sollten. Im Folgenden hat das IKE dann baukonstruktive und prozessuale Empfehlungen abgeleitet. Es erfolgte eine Bewertung der jeweiligen infektionspräventiven Relevanz im gemeinsamen Gespräch mit der den Beschäftigten des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin. Teilweise waren die vom Interview abgeleiteten Empfehlungen deckungsgleich mit der aktuellen Studienlage oder Empfehlungen, die sich aus den typologischen Bewertungsworkshops ergeben haben, teilweise ergänzten die Erkenntnisse diese. Insgesamt brachten die Interviews maßgebliche, neue Erkenntnisse hervor.

Auszüge der O-Töne der Interviews:

„Aus den **Abholzonen** holen wir die Schüler **zeitversetzt** ab und **bringen sie in die Fachräume**. Leider sind die **Zonen nicht überdacht** und häufig stehen Sie [die Schüler] im Regen“

„Ich wünsche mir **breite Flure, größere Klassenzimmer und ein Waschbecken** in jedem Raum.“

„Die **festgelegte Sitzordnung** wird möglichst in **allen Fächern beibehalten**, um **Infektionsgruppen** zu bilden.“

„Alle halbe Stunde gibt es einen **speziellen Lüftungsgong zur Erinnerung**. Dann wird stoßgelüftet“

„Die Kinder haben sich eine eigene Schaukel gebaut, da ihr **Schulhofabschnitt sonst nichts zu bieten hatte**.“

„Wir **schicken die Oberstufenschüler vom Schulhof**, da dort **kein Platz** ist. Dann müssen wir Sie umständlich auf der Straße beaufsichtigen.“

„Glücklicherweise haben wir ein achsensymmetrisches Schulgebäude mit **zwei Treppenhäusern und Notausgängen die wir nutzen**. Dadurch können wir ein **Einbahnsystem** umsetzen“

„Plötzlich lassen sich auch **alle Fenster öffnen, die sonst im 1. und 2. OG geschlossen** waren [Bezug auf Sicherheitsmaßnahmen]“

Abbildung 6
Übersicht der Codes der Nutzerinterviews für Schulen



Quelle: IKE

Abbildung 7
Auszug aus der Zusammenfassung der Analyse der Nutzendeninterviews

03.1 Belüftung und Klimatisierung		
Schlussfolgerung	Fragen	
Es sollten Methoden zur Durchlüftung der Klassenräume und Flure verbaut werden.	Wie wichtig ist eine gezielte Belüftung der Flure?	
Es braucht einen klaren Handlungsleitfaden, der verschiedene Situationen gezielt berücksichtigt.	Welche Belüftungsmaßnahmen sind notwendig? Gibt es einen Frequenzrechner, wann und wie gelüftet oder gefiltert werden soll?	
	Wie können adaptive Maßnahmen aussehen? Kann durch einen Kamineffekt ein Gebäude sinnvoll und natürlich belüftet werden? Sollten Türen einen Belüftungsmodus haben?	
	Welche Entscheidungsmatrixen gibt es, um zu entscheiden, wann wie durch Lehrkräfte eingegriffen werden kann, ohne die Luft verschiedener Kohorten zu durchmengen? (Schuh in Tür um Flur querzulüften)	
Die Luft kann trotz Lüftungsanlage (eines Passivhauses) stickig sein. Dies passiert auch bei starker Beheizung. Nicht alle Lüftungsanlagen sind korrekt eingesetzt.	Warum ist die Luft trotz Lüftungsanlage stickig? Wie lässt sich dem vorbeugen?	
	Können CO2 Messuhren sinnvoll eingesetzt werden? Wenn ja, wie und wo sollten Sie platziert sein?	
Eine große Flügeltür nach Draußen und beidseitige Fenster im Klassenzimmer werden gerne angenommen, um den Raum natürlich zu belüften und auch während der Schulstunde einen "Außenbereich" zu imitieren.	Viele Fenster einfachste Methode?	
Es wird eine Belüftungsmethode benötigt, die Wärmeverlust verhindert. Auf Jacken und Decken sollte verzichtet werden, da das Aufnehmen und Ablegen von der Garderobe unnötige Bewegungen und mögliche Kontakte zwischen SchülerInnen generiert.	Wie kann ohne zu großen Wärmeverlust belüftet werden?	
Vorschlag und Beobachtung	Wer?	Wo?
Flure sind oftmals ohne Fenster oder Möglichkeit der expliziten Durchlüftung gebaut.		
Klassenräume haben keine extra Belüftungssysteme.		
Schuhe werden in Klassenraumtüren gestellt und Flurfenster geöffnet.		
Es gibt teilweise CO2 Messuhren.		
Bei natürlicher Belüftung wird es im Klassenzimmer teilweise extrem kalt, sodass Jacken und Decken getragen werden müssen.		

Quelle: IKE

Typologische Bewertung beispielhafter Bauten

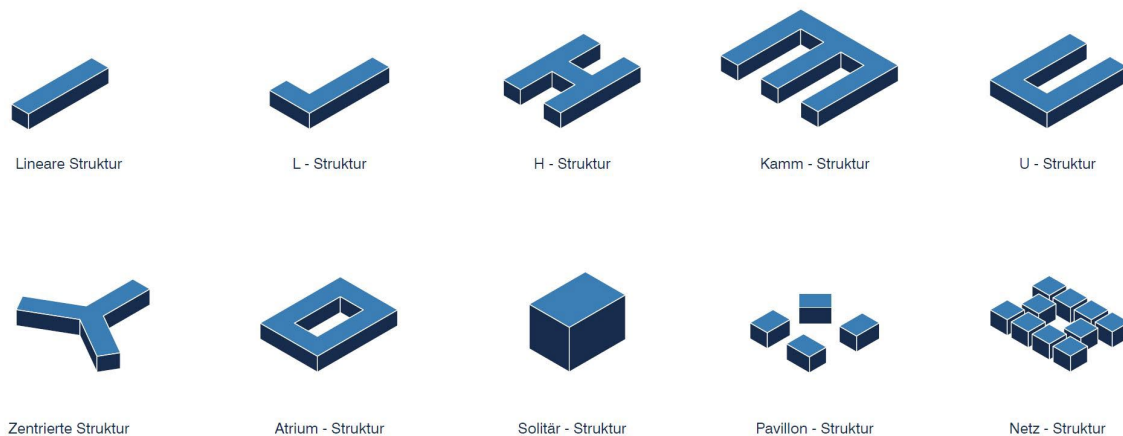
Zur Erarbeitung von Maßnahmen auf der Skala der Gebäudelage und des Grundrisses wurde eine typologische Bewertung von Grundrissen in einem Workshop pro Infrastruktur durchgeführt. Dazu wurde eine repräsentative Auswahl an unterschiedlichen Gebäudetypologien aus einer breitangelegten Quellenauswahl für jede der fünf ausgewählten Infrastrukturen getroffen. Diese wurden mit einer neu entwickelten Methode komparativ im Rahmen eines Expertenworkshops hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Grundlage bietet eine vom IKE definierte Liste von 12 vorab ausgewählten, relevanten Faktoren der baulichen Infektionsprävention, die von den Forschungspartnern im Vorhinein validiert wurde. Insgesamt wurden die Grundrisse von sieben Kindergärten, neun Schulen, acht Arztpraxen/-häuser, acht Alten- und Pflegeheime sowie fünf Hörsaalgebäuden beurteilt.

An jeder Bewertung nahmen zwischen 10 und 15 Planende mit Erfahrung im Bau der jeweiligen Infrastruktur online teil. Es wurde ein Präsentationswerkzeug mit integriertem Abstimmungs- und Kommentarfunktionen verwendet. Zu Beginn wurden die Faktoren und deren infektionspräventives Potential allen Teilnehmenden vermittelt. Anschließend wurden das zu bewertende Gebäude mit Rahmendaten, Fotos, Grundrissen und Schnitten erläutert. Danach begann die Bewertungsphase. Es wurden die einzelnen Faktoren und Grundrisse angezeigt. Die Teilnehmenden hatten je Faktor acht Sekunden Zeit, die Grundrisse aller Geschosse, deren den Faktor betreffende Merkmale farblich hervorgehoben waren, zu bewerten. Dazu wurde eine fünfstufige Likertskala verwendet. Nachdem ein Gebäude vollständig bewertet wurde, konnten individuell und anonym Kommentare zu den Vor- und Nachteilen des Gebäudes abgegeben werden. Diese wurden zeitgleich allen offengelegt und gemeinsam diskutiert. Nachdem alle Grundrisse bewertet und kommentiert wurden, sollten die Gebäude miteinander verglichen werden. Dazu gab es die Möglichkeit anonym und Individuell eine entsprechende Übersicht zu kommentieren. Die Ergebnisse wurden ebenfalls gemeinsam diskutiert.

Die Ergebnisse einiger Faktoren können bei den Arztpraxen nicht als valide betrachtet werden. Dies lässt sich durch auf die geringe Relevanz des Faktors für einer Infrastruktur zurückführen, die in den aller meisten Fällen kein eigenständiges Gebäude darstellt, sondern in eine Gebäudestruktur mit Mischnutzung eingebettet ist.

Das Forschungsteam aus einer Gesamtübersicht aller quantitativen Ergebnisse und qualitativen Aussagen die Ausprägungen der verschiedenen Typologien hinsichtlich ihres infektionspräventiven Potentials bewertet. Daraus wurden bauliche Empfehlungen abgeleitet. Zudem konnten relative Aussagen zwischen den einzelnen Typologien getroffen werden. Zu beobachten war auch, dass manche Typologien je nach Priorisierung des Faktors sowohl Vor- als auch Nachteile hatten. Die abgeleiteten Erkenntnisse wurden den Forschungspartnern der Charité zur Diskussion und Einschätzung ihrer Relevanz vorgelegt.

Abbildung 8
Übersicht der verschiedenen Gebäudetypologien, die miteinander verglichen wurden



Quelle: IKE

Abbildung 9
Methodisches Vorgehen zur typologischen Bewertung beispielhafter Bauten



Quelle: IKE

Luftraumkohortierung

Neben der einzelnen Betrachtung von infektionskritischen Funktionsbereichen hinsichtlich der Lüftungstechnik wurde auch die Schadstoffpartikelströmungen in Raumclustern analysiert. Dadurch sollte untersucht werden, inwiefern eine räumliche Kohortierung auch eine Trennung von Lufträumen erforderlich macht. Gleichzeitig sollte betrachtet werden, welche technischen Möglichkeiten dies ermöglichen können. Das IKE stellte dazu dem HRI ein CAD-Modell einer Schule mit Kammstruktur zur Verfügung, deren einzeln erschließbare Trakte inklusive Sanitäranlagen eine räumliche Kohortierung jeder Jahrgangsstufe ermöglicht.

Abgeleitete Entwurfsprinzipien	→ Seite 52
Allgemeine bauliche Empfehlungen	→ Seite 64
Bauliche Empfehlungen Schulen	→ Seite 68
Bauliche Empfehlungen Kindergärten	→ Seite 73
Bauliche Empfehlungen Alten- und Pflegeheimen	→ Seite 77
Bauliche Empfehlungen Arztpraxen	→ Seite 83

Untersuchung des Einflusses von Lüftungsmaßnahmen auf das Risiko luftgetragener Infektionen durch das Institut für Hygiene und Umweltmedizin

Problemstellung

Im Zuge der Pandemie durch das Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2 (SARS-CoV-2), das der Auslöser der COVID-19-Erkrankung ist, wurde das Risiko von luftgetragenen Infektionen in den Fokus des öffentlichen Bewusstseins gerückt. Da Infektionen mit dem Virus in allen Lebensbereichen stattfinden können, war es im allgemeinen Interesse mehr über die Infektionswege und vor allem über infektionspräventive Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu erforschen. Vor der Pandemie war wenig Wissen über den Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Risiko luftgetragener Infektionen in Innenräumen der im SAVE Projekt untersuchten Infrastrukturen Schulen, Kindergärten, Pflege-/ Altenheime und Arztpraxen bekannt. Um einen Teil dieser Forschungslücke zu schließen, wurden durch das Institut für Hygiene und Umweltmedizin Literaturrecherchen durchgeführt und Scoping Reviews zu den Infrastrukturen Schulen, Kindergärten, Pflege-/ Altenheimen und Arztpraxen erstellt (UP2).

Zielstellung

Anhand der in der Literatur beschriebenen Feldstudien sollte wissenschaftlich untersucht werden, ob bzw. in welchem Maße Interventionen in Bezug auf Lüftungsmaßnahmen und damit assoziierte bauliche Faktoren in den vier Infrastrukturen dazu beigetragen haben, das Infektionsrisiko luftgetragener Infektionen zu reduzieren bzw. den Surrogat Endpunkt CO₂-Konzentration effektiv zu beeinflussen. Zusätzliche Maßnahmen wie Masken tragen, regelmäßige Testungen, Impfungen etc., die ebenfalls maßgeblich zur Reduktion des Infektionsgeschehens beitragen, wurden nicht untersucht. Mit dem erworbenen Wissen und Erkenntnissen soll ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Infektionsprävention in systemrelevanten Infrastrukturen erfolgen, um diese in der SARS-CoV-2 Pandemie und auch möglichen zukünftigen Pandemien mit einem luftübertragbaren Erreger anwenden zu können und die Bevölkerung bestmöglich zu schützen.

Forschungsdesign

Das Projektteam bestand aus zwei Ärztinnen des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin. Die Projektkoordination erfolgte durch eine Assistenzärztin in Weiterbildung zur Fachärztin für Hygiene und Umweltmedizin der Charité, die Projektleitung erfolgte durch die Chefärztin und Leiterin des Instituts für

Hygiene und Umweltmedizin der Charité. Die Bearbeitung des Projektes wurde wie folgt organisiert: Die primäre Bearbeitung der Arbeitspakete erfolgte durch die Assistenzärztin, es fand jedoch eine kontinuierliche Abstimmung der weiteren Arbeitsschritte und Evaluation der Ergebnisse im engen Austausch mit der Chefärztin statt. In regelmäßigen interdisziplinären Treffen mit den anderen Forschungspartnern wurden die Ergebnisse berichtet und gemeinsam institutsübergreifende Erkenntnisse und Empfehlungen abgeleitet. Diese wurden beispielsweise in einer Maßnahmenliste mit infektionspräventiven Empfehlungen für die verschiedenen Infrastrukturen zusammengefasst und im weiteren Projektverlauf um neue Ergebnisse ergänzt. Die grundlegende Arbeitshypothese war, dass bei einer luftgetragenen Infektion wie mit SARS-CoV-2 das Infektionsrisiko durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduziert werden kann. Die einzelnen Forschungsfragen bzw. Ziele und Methodik für die verschiedenen Infrastrukturen sind in den untenstehenden Kurzfassungen der Scoping Reviews aufgeführt.

Projektverlauf

Zu Beginn des Projektes wurde das potentielle Infektionsrisiko in verschiedenen Infrastrukturen aus medizinischen und nicht-medizinischen Bereichen anhand von Exposition und Disposition unter Berücksichtigung einrichtungsspezifischer Faktoren analysiert (siehe **Tabelle 12**). Diese Faktoren wurden beim Verfassen der Scoping Reviews berücksichtigt. Die systematischen Literaturrecherchen und Erstellung der Scoping Reviews wurden sukzessive für die vier betrachteten Infrastrukturen durchgeführt. Es wurde mit dem Scoping Review Schulen begonnen. Hierfür waren aufgrund der breiteren Datenlage die umfassendsten Ergebnisse zu erwarten. Anschließend wurden die Scoping Reviews für die Kindergärten, die Pflege-/Altenheime und zum Schluss für die Arztpraxen erstellt. Da nur wenige Studien zur Lüftungssituation in Arztpraxen durchgeführt wurden, war der zu erwartende Umfang des Scoping Reviews für die Arztpraxen als gering eingestuft worden. Im Einzelnen wurden die Scoping Reviews in die im Forschungswesen üblichen Abschnitte Einleitung, Ziele, Methoden, Ergebnisse, Diskussion, Limitationen und Schlussfolgerung gegliedert. Nach Abschluss der Literaturrecherche und Identifikation von Studien gemäß der Ein- und Ausschlusskriterien als erster Meilenstein, wurden im Anschluss die Ergebnisse zusammengefasst. Um die Leserschaft thematisch einzuführen und um ein Verständnis für die Ergebnisse zu schaffen, wurden in der Einleitung entsprechende Grundlagen erläutert. Abschließend wurden die Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext unter Einbeziehung von Ergebnissen aus anderen Publikationen eingeordnet und diskutiert und abschließend entsprechende Schlussfolgerungen gezogen. Erkenntnisse und Schwierigkeiten die bei der Bearbeitung eines Scoping Reviews auftraten, wurden sofern möglich, bei der Bearbeitung der folgenden Scoping Reviews berücksichtigt.

Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst einige Grundlagen zu luftübertragenen Infektionen am Beispiel von SARS-CoV-2 erläutert, im Anschluss wird auf die jeweiligen Infrastrukturen, die im SAVE Projekt untersucht wurden, eingegangen.

SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über Tröpfchen, sowie über virushaltige Aerosole übertragen. Diese werden unter anderem beim Atmen, Sprechen, Niesen und Husten ausgestoßen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; Wang et al., 2021). Die indirekte Kontaktübertragung über kontaminierte Oberflächen oder Gegenständespiel hat nach aktuellem Wissensstand eine eher untergeordnete Rolle (ECDC, 2022). Übertragungen durch Tröpfchen finden vor allem im Nahfeld einer Person (bis ca. 1,5 m) statt, Aerosole und darin enthaltene Viruspartikel können jedoch über längere Zeit im Raum bestehen bleiben, sodass hier ebenfalls eine Infektionsgefahr im Fernfeld (>1,5 m) besteht. Diese bleibt auch nach Verlassen des Raumes einer infektiösen Person bestehen. Allerdings gibt es fließende Übergänge zwischen Tröpfchen- und luftgetragenen Infektionen, sodass eine strikte Unterscheidung für Infektionen im Nah- und Fernfeld nicht möglich bzw. sinnvoll ist (Birmili, 2021).

Luftgetragene Erreger können über längere Zeit im Raum verbleiben, sodass die Verdünnung bzw. Elimination des Erregers maßgeblich zur Reduktion des Infektionsrisikos beitragen können (Umweltbundesamt, 2020). Eine verbesserte Belüftung kann die Zeit, die ausgeatmete Tröpfchen bzw. Aerosole im Raum verbleiben, reduzieren (Somsen et al., 2020). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass in schlecht belüfteten Räumen eine potentielle Infektionsgefahr durch die Einatmung von infektiösen Aerosolen besteht, da luftgetragene Erreger über einen längeren Zeitraum im Raum verbleiben können. Die Belüftung kann durch natürliche Lüftung (NV),

meist über Fenster oder Türen, mechanische Lüftung (MV), meist über Raumluftechnische Anlagen (RLT Anlagen) oder eine Kombination aus beiden in Form von hybrider Lüftung erfolgen.

Kohlenstoffdioxid (CO_2), ein Endprodukt der Atmung, wird zusammen mit weiteren Partikeln, die potentiell virus-/erregertauglich sein können, ausgeatmet. Die CO_2 Konzentration wird deswegen oft als Indikator für die Innenraumlufqualität (IAQ) genutzt und als Surrogatparameter für das Übertragungs- und Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 oder andere luftübertragene Erreger herangezogen (Di Gilio, 2021; Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003; Shendell et al., 2004). Ursprünglich wurde ein Referenzwert der CO_2 Konzentration von 1000 ppm von Max von Pettenkofer als Maximalwert für die Innenraum CO_2 Konzentration vorgeschlagen und daraus abgeleitet, die notwendigen Luftwechselraten pro Person. Er wollte mit diesem Grenzwert vor allem möglichen Konzentrationsstörungen von Schülern und Schülerinnen vorbeugen (Pettenkofer, 1858). In Deutschland werden CO_2 Konzentrationen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich eingestuft, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte, 2018). Die CO_2 Konzentration kann vergleichsweise einfach und günstig mit CO_2 Messgeräten gemessen werden. Die Verwendung der CO_2 Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko hat auch Limitationen. Nach einem gewissen Zeitraum wird ein „steady state“ der CO_2 Konzentration erreicht, die Menge an virushaltigen Partikeln, die eine empfängliche Person einatmet, steigt jedoch kontinuierlich mit der Zeit, auch wenn die Konzentration der Partikel selbst gleichbleibt. Kriegel et al. schlagen deswegen vor, die CO_2 Dosis ($\text{ppm} \cdot \text{h}$) als möglichen Surrogatparameter zur Abschätzung des Infektionsrisikos zu nutzen (Kriegel et al., 2021).

Im Folgenden stehen jeweils kurze Zusammenfassungen der Scoping Reviews der Infrastrukturen Schulen, Kindergärten, Pflege-/ Altenheime und Arztpraxen. Die vollständigen Scoping Reviews sind im Anhang des Endberichtes aufgeführt.

Tabelle 12
Beurteilung des Infektionsrisikos in verschiedenen Bereichen

Bereich	Exposition	Disposition	Bemerkungen
Krankenhaus	Viele Patienten kommen zur Behandlung von Infektionskrankheiten ins Krankenhaus, manche Patienten und Patientinnen bringen als Begleiterkrankungen Infektionen mit oder sie entwickeln nosokomiale Infektionen	Viele Patienten und Patientinnen haben Vorerkrankungen und sind infektionsanfällig	In der Regel eine hohe Kompetenz im Hinblick auf Infektionsrisiken und -management
Arztpraxis	Viele Patienten und Patientinnen kommen zur Behandlung von Infektionskrankheiten in die Arztpraxis und manche Patienten und Patientinnen bringen als Begleiterkrankungen Infektionen mit	Wenige Patienten und Patientinnen infektionsanfällig	In der Regel Kompetenz im Hinblick auf Infektionsrisiken und -management
Pflegeheim	Infektionsrisiken durch Kontakt zu anderen Bewohnern und Bewohnerinnen, Beschäftigte und Besuchende	Viele Bewohner und Bewohnerinnen haben Vorerkrankungen und sind infektionsanfällig	In der Regel weniger Kompetenz im Hinblick auf Infektionsrisiken und -management
Schule	Schüler und Schülerinnen mit Infektionen bleiben in der Regel zu Hause	Schüler und Schülerinnen sind meistens weniger infektionsanfällig	In der Regel weniger Kompetenz im Hinblick auf Infektionsrisiken und -management
Kindergarten	Kinder entwickeln Infektionszeichen oft während des Aufenthaltes in der Kita, enge Kontakte der Kinder untereinander und zu Pädagogische Fachkräfte	Viele Kinder sind infektionsanfällig	In der Regel weniger Kompetenz im Hinblick auf Infektionsrisiken und -management

Quelle: Charité, 2023

Ergebnisse des Systemic Reviews baulicher Interventionen	➔ Seite 87
Scoping Review zu Alten- und Pflegeheimen	➔ Seite 118
Scoping Review zu Arztpraxen	➔ Seite 134
Scoping Review zu Kindergärten	➔ Seite 144
Scoping Review zu Schulen	➔ Seite 161

Lüftungstechnische Untersuchungen des Hermann-Rietschel-Instituts

Problemstellung

Infektionsprävention ist insbesondere in stark frequentierten Räumlichkeiten wie Schulen, Altenheimen, Arztpraxen und Büros aufgrund der anhaltenden COVID-19-Pandemie zu einem kritischen Thema geworden. Es ist entscheidend, wirksame präventive Maßnahmen zu identifizieren, um das Risiko einer Infektionsübertragung in diesen wichtigen Infrastrukturen zu minimieren. Eine solche Maßnahme ist die Belüftung, die zur Verbesserung der Raumluftqualität, Reduzierung des Risikos einer Übertragung über die Luft und zur Sicherstellung der Gesundheit und des Wohlbefindens der Raumnutzenden eingesetzt werden kann.

Der derzeitige Stand von Forschung und Praxis ist jedoch hinsichtlich Belüftungsmaßnahmen zur Infektionsprävention in kritischer Infrastruktur begrenzt. Es besteht ein hoher Bedarf an der Entwicklung wirksamer und evidenzbasierter Strategien zur Verringerung des Risikos einer Infektionsübertragung in stark frequentierten Räumlichkeiten. Daher soll in diesem Projekt durch Berücksichtigung verschiedener Disziplinen gemeinsam an infektionspräventiven Maßnahmen gearbeitet werden.

In diesem Zusammenhang hat eine umfassende Literaturrecherche bestehender Forschungsergebnisse zu Belüftungsmaßnahmen zur Infektionsprävention in kritischer Infrastruktur eine entscheidende Bedeutung. Ziel ist es hierbei auch, Wissenslücken zu identifizieren und Bereiche hervorzuheben, die weiterer Forschung bedürfen. Auf diese Weise kann ein Verständnis für den aktuellen Stand der Praxis in diesem Bereich und die Herausforderungen, denen Planende, Betreibende und Nutzende gegenüberstehen, definiert werden.

Basierend auf der Übersicht aus der Literaturrecherche soll das HRI verschiedene Belüftungsmaßnahmen mithilfe des Wells-Riley-Modells und von Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) entwickeln und bewerten. Das Wells-Riley-Modell ist ein weit verbreitetes mathematisches Modell, das das Risiko einer Infektionsübertragung basierend auf der Anzahl infektiöser Personen in einem Raum, dem Luftwechsel und anderen Parametern berechnet. CFD-Simulationen können Einblicke in die Luftströmungsmuster in Innenräumen und die Verteilung von luftgetragenen Partikeln liefern.

Das Projekt berücksichtigt verschiedene präventive Maßnahmen, wie z. B. die Erhöhung der Lüftungsraten, Luftverteilungssysteme, die Installation von Luftreinigern und die Verbesserung der Filteranlagen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen kann anhand der Reduzierung des Risikos einer Infektionsübertragung bewertet werden. Im Projektverlauf sollen ebenso die effektivsten und praktikabelsten Maßnahmen für verschiedene Arten kritischer Infrastrukturen, unter Berücksichtigung von Faktoren wie Gebäudegestaltung, Belegungsniveau und Lüftungssystemen identifiziert werden.

Zielstellung

Das übergeordnete Ziel des Projekts besteht darin, die besten Praktiken für gesunde Gebäude zu definieren, die das Risiko einer Infektionsübertragung in kritischer Infrastruktur minimieren. Der Beitrag des Projekts zu diesem Ziel besteht darin, evidenzbasierte Strategien zur Infektionsprävention zu entwickeln, die von Planenden, Betreibenden und Nutzenden in verschiedenen kritischen Infrastrukturmgebungen umgesetzt werden können.

Zu diesem Zweck sollen vom HRI Infektionsrisikoberechnungen und Lüftungssimulationen durchgeführt werden.

Darüber hinaus wird vom HRI die Ausbreitung von Tröpfchen und Aerosolen in belüfteten Innenräumen untersucht. Die Ausbreitung dieser Partikel spielt eine wichtige Rolle bei der Übertragung von Atemwegserkrankungen wie COVID-19. Durch den Einsatz von CFD-Simulationen wird angestrebt, verschiedene natürliche Lüftungskonfigurationen und die Querkontamination zwischen benachbarten Räumen zu vergleichen.

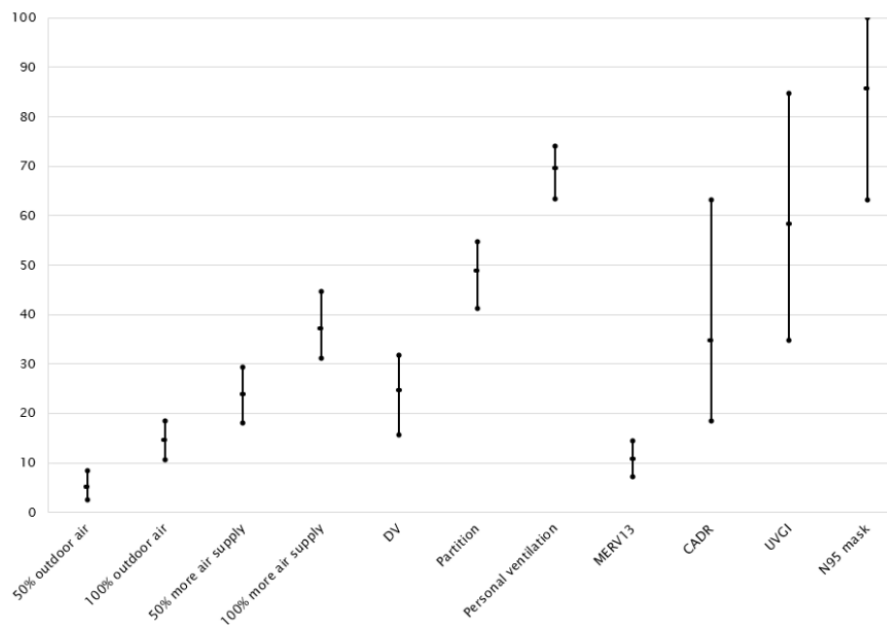
Die spezifischen Ziele des HRI können wie folgt zusammengefasst werden:

- Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche zu bestehenden Forschungen zu Belüftungsmaßnahmen zur Infektionsprävention in kritischer Infrastruktur, Identifikation von Wissenslücken und Hervorhebung von Bereichen, die weitere Forschung erfordern.
- Bewertung der Wirksamkeit verschiedener Belüftungsmaßnahmen zur Infektionsprävention wie natürliche und mechanische Belüftung, verschiedene Luftverteilungskonfigurationen, Abstand halten, Verwendung von partikelfiltrierenden Gesichtsmasken, Erhöhung der Belüftungsrate, Pathogendekontaminationstools wie UVGI, Filtration, Partition und Luftreiniger.
- Verwendung des Wells-Riley-Modells und von CFD-Simulationen, um das Risiko der Infektionsübertragung in verschiedenen Szenarien zu bewerten und die Auswirkungen verschiedener Belüftungsmaßnahmen auf die Reduzierung des Infektionsrisikos zu bewerten.
- Identifizierung der effektivsten und praktikabelsten Belüftungsmaßnahmen für verschiedene Arten von kritischer Infrastruktur unter Berücksichtigung von Faktoren wie Gebäudegestaltung, Belegungsniveau und Lüftungssystemen.
- Bewertung der Auswirkungen von Kohortierung und Fällen von Querkontaminationen für verschiedene Konfigurationen durch CFD-Simulationen.
- Beitrag zur Entwicklung eines interdisziplinären Bewertungsinstruments für Planende, Betreibende und Nutzende, um das Gesundheits- und Wohlbefinden von Nutzenden in stark frequentierten Räumen basierend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und Fachkenntnissen zu gewährleisten.
- Bewertung der Ausbreitung von Tröpfchen und Aerosolen in Innenräumen und Bewertung der Wirksamkeit verschiedener Belüftungsmaßnahmen zur Reduzierung der Partikelausbreitung.

Projektverlauf

Um verschiedene Strategien zur Verhinderung von Infektionen in bestimmten Infrastrukturen zu vergleichen, wurde das modifizierte Wells-Riley-Modell auf verschiedene Räume mit verschiedenen Randbedingungen und Einstellungen angewendet. Hierbei wurden verschiedene Gegenmaßnahmen wie Quellenkontrolle, Belüftung und Luftreinigung bewertet. Insbesondere wurden erhöhte Frischluftzufuhr, erhöhter Gesamtluftstrom, fortschrittliche Luftverteilungssysteme, Filter, Luftreiniger und persönlicher Schutz berücksichtigt. Zur Berücksichtigung möglicher Variationen der Eingabedaten und zur Erhöhung der Repräsentativität der Schätzung wurde die Monte-Carlo-Simulation verwendet. Die Reduzierung des Infektionsrisikos jeder einzelnen Kontrollstrategie wurde im Vergleich zum ursprünglichen Fall bewertet. Die höchste und niedrigste Infektionsrisikoreduzierung für verschiedene Räume ist in Abbildung 10 für jede Gegenmaßnahme dargestellt. Zu erkennen ist, dass eine höhere Risikoreduzierung durch eine Erhöhung der Lüftungsraten erzielt wird. Es wurde auch festgestellt, dass die persönliche Belüftung im Vergleich zum Konzept der Quelllüftung eine höhere Risikoreduzierung erreicht. Schließlich sollte erwähnt werden, dass die Verwendung von N95-Masken in einigen spezifischen Fällen das Infektionsrisiko gegen Null gesenkt werden kann.

Abbildung 10
Variationen der Reduzierung des Infektionsrisikos bei verschiedenen Gegenmaßnahmen



Quelle: HRI, 2021

Der Hauptnachteil der Wells-Riley-Gleichung ist die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung von erregeladenen Partikeln im gesamten Raum. In diesem Fall wird ein Infektionswahrscheinlichkeitswert für den gesamten Raum angegeben, obwohl eine variable Verteilung erwartet wird. Eine realistischere Berechnung kann bereitgestellt werden, wenn die Konzentration dieser Partikel in jedem Punkt des Strömungsbereichs bekannt ist.

Um dieses Problem zu lösen, können in Studien zur Belüftung zwei verschiedene Methoden in Betracht gezogen werden: experimentelle Messungen und numerische Simulationen. Experimentelle Studien können allgemeine Merkmale des Luftstroms wie Luftgeschwindigkeit und Partikelverteilung im Raum liefern, aber diese Art von Untersuchungen ist aus verschiedenen Gründen schwierig und teuer durchzuführen. Fortschritte in der Computertechnologie haben die numerische Strömungsmechanik (CFD) zu einem integralen Bestandteil von Belüftungsuntersuchungen gemacht. CFD-Simulationen können detaillierte Informationen wie Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Partikelverteilung usw. in einem bestimmten Strömungsbereich für mehrere Szenarien und Kombinationen liefern. Diese Methode wurde in den letzten Jahren erfolgreich auf verschiedene Räume angewendet (Qin/Lu 2020; Agirman et al. 2020; Satheesan/Mui/Wong 2020).

Im Allgemeinen besteht eine CFD-Simulation aus verschiedenen Schritten, die als Entwurf, Lösung und Postprocessing-Phasen zusammengefasst werden können. In der Entwurfsphase wird zunächst eine Strömungsdomain mit einer CAD-Software modelliert. Diese wird in diskrete Zellen unterteilt, die als Gitter bezeichnet werden. Im Lösungsschritt werden Eigenschaften wie Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgenerierung innerhalb der Strömungsdomain zugewiesen. Die numerische Lösung wird durch die Lösung der Gleichungen, die den Luftstrom, den Energie- und Massentransport, sowie andere verwandte Variablen, die die Turbulenz des Stroms beschreiben, in einem iterativen Verfahren erreicht. Die Gleichungen der Strömung können in der allgemeinen Form wie folgt ausgedrückt werden:

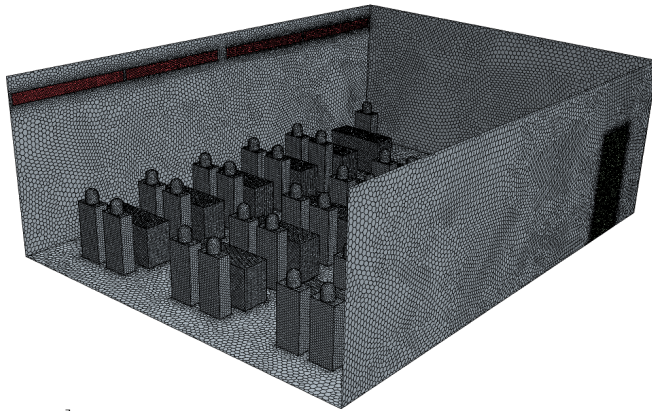
$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(\rho\varphi\vec{V}) = \nabla(\Gamma_\varphi\nabla\varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

wobei ρ die Luftdichte, φ die transportierte Größe, \vec{V} der Luftgeschwindigkeitsvektor, S_φ der Quellterm und Γ_φ der Diffusionskoeffizient von φ ist. Weitere Einzelheiten zur CFD und zu den Lösungsverfahren für die maßgeblichen Gleichungen sind in der Literatur zu finden (Versteeg/Malalasekera 2007; Wendt et al. 2009). In der Post-Processing-Phase werden die simulierten Strömungseigenschaften mit Hilfe von Kontur- oder Vektorplots und Animationen abgeleitet.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts wurden 3D-CFD-Modelle der vordefinierten Infrastrukturen erstellt und Simulationen in der Computational Fluid Dynamics-Software Star CCM+ durchgeführt. Es wurden 39 verschiedene Varianten für die natürlich belüfteten Klassenräume vom IKE vorgeschlagen. Die Simulationsverfahren bestanden aus der Netzgenerierung, wie in Abbildung 11 dargestellt, der Auswahl des Turbulenzmodells, der Partikelverfolgung und anderen Schritten. Für jeden Fall wurden im Allgemeinen drei Luftwechselraten, eine Schadstoffquelle (infizierte Person) sowie drei Partikelgrößen berücksichtigt. Die Ergebnisse wurden für jede Variante für Luftstrom, Temperatur, Schadstoffverteilung, sowie für die Effizienz des Luftwechsels und die Wirksamkeit der Schadstoffentfernung dargestellt.

Abbildung 11
Maschenstruktur eines natürlich belüfteten Klassenzimmers

Simcenter STAR-CCM+

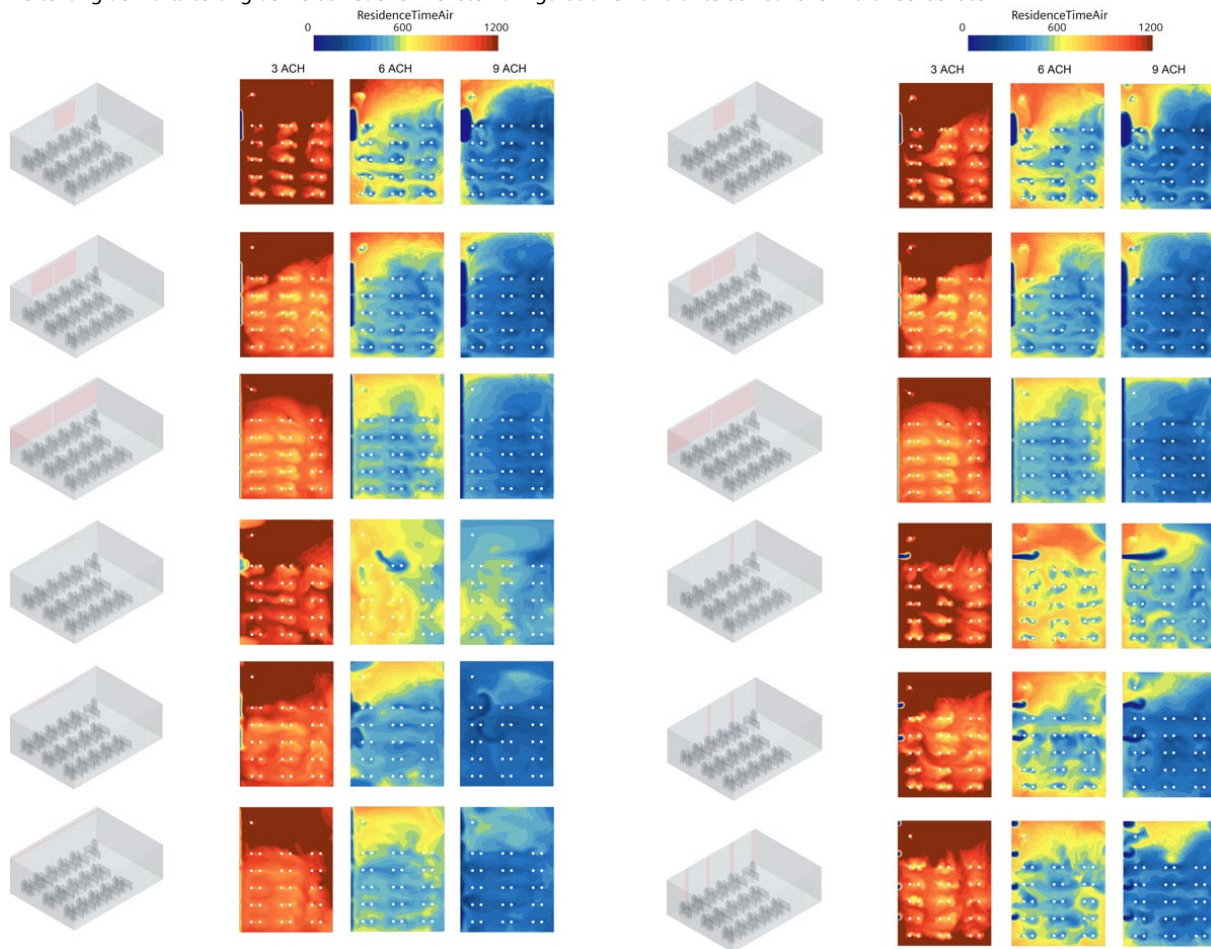


Quelle: HRI, 2021

Außerdem wurde die Auswirkung verschiedener Fensterkonfigurationen und Schadstoffquellenpositionen auf die Verteilung pathogener Partikel analysiert. Als Bewertungsmaßstab für die Belüftung wurde zudem der Luftwechselwirkungsgrad berechnet und für verschiedene Fensterkonfigurationen verglichen.

Abbildung 12

Verteilung der Luftalterung bei verschiedenen Fensterkonfigurationen und unterschiedlichen Luftwechselraten

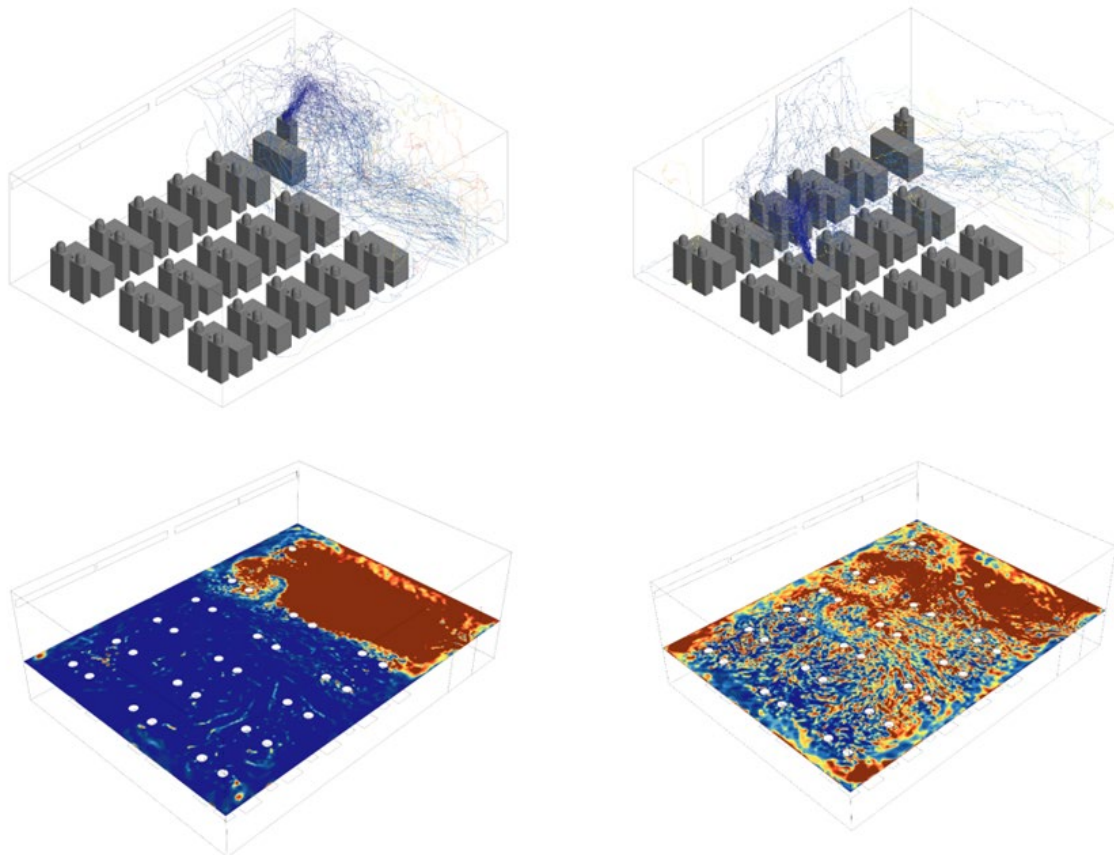


Quelle: HRI, 2021

Es hat sich gezeigt, dass die numerische Strömungsmechanik in der Entwurfsphase ein nützliches Werkzeug sein kann, um mögliche Szenarien zu bewerten. Die Ergebnisse in Abbildung 12 zeigen, dass die Zu- und Abluftpositionen einen entscheidenden Einfluss auf die Schadstoffverteilung haben. Zu erkennen ist, dass gleichmäßig verteilte Zu- und Abluftpositionen dazu beitragen können, dass Verunreinigungen besser abgeführt werden und das Alter der Luft dadurch sinkt. Kurzschlussströmungen müssen bei Nutzung natürlicher Belüftung vermieden werden, indem die Möglichkeit der Querlüftung in Betracht gezogen wird. In Abbildung 13 ist zusätzlich zu erkennen, dass sich die Schadstoffverteilung in Abhängigkeit von der Position der Schadstoffquelle verändert.

Abbildung 13

Die Partikelwege und -verteilungen basierend auf verschiedenen Positionen der Schadstoffquelle. Oben: Strömungslinien, unten: Konzentrationsverteilung auf Atemhöhe.



Quelle: HRI, 2021

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen haben gezeigt, dass das Infektionsrisiko in hohem Maße von der Quelle der Verunreinigung, der Position der Luftzufuhr und -abfuhr und weiteren Faktoren abhängt. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, ein allgemeingültiges Lüftungskonzept zu empfehlen, das in jedem Fall das geringste Infektionsrisiko aufweist. Stattdessen wurde diskutiert und vereinbart, dass eine Bewertungsmatrix oder ein Bewertungsinstrument erstellt werden sollte, das helfen kann, die möglichen Szenarien und Gegenmaßnahmen umfassend zu verstehen.

In der Zwischenzeit wurden zusätzlich zu den identifizierten infektionsmindernden Maßnahmen mehrere Richtlinien verschiedener nationaler und internationaler Organisationen gesichtet und verglichen, um den Umfang der Bewertung zu erweitern. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf Lüftungstechnischen Lösungen, d. h. mechanischer und natürlicher Lüftung, Filteroptionen und zusätzlichen Geräten wie Luftreinigern und UV-Anlagen. Außerdem wurden für jede vorgeschlagene Lösung die Vorteile und Einschränkungen und wichtige Aspekte aufgelistet, beschrieben und benotet.

Neben der Simulation der natürlichen Belüftung für einen Klassenraum wurden auch mögliche Belüftungsstrategien zur Verringerung der Kreuzkontamination zwischen benachbarten Räumen anhand verschiedener Simulationsfälle (siehe Abbildung 14) untersucht.

Abbildung 14
Luftstrommanagement zwischen benachbarten Räumen



Quelle: HRI, 2023

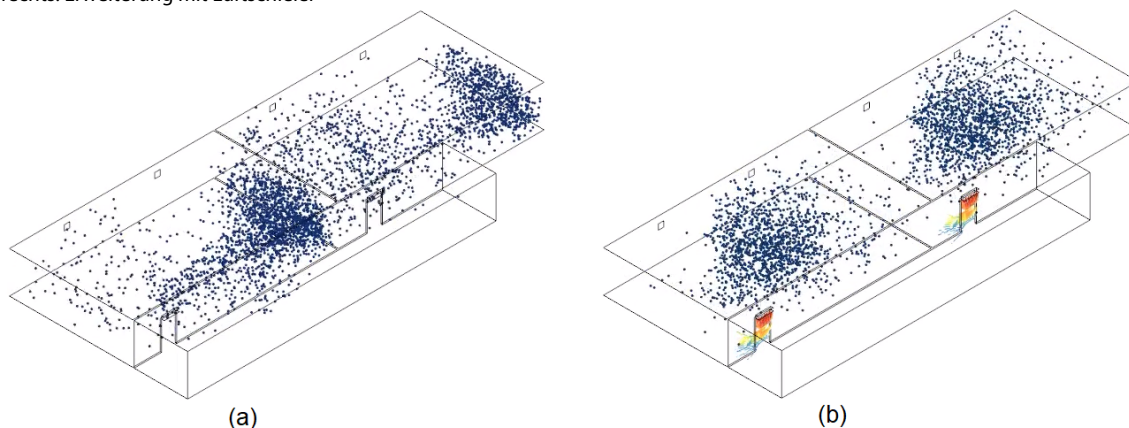
Die vorgeschlagenen Konfigurationen können wie folgt erläutert werden:

(a) Einfache Abluftventilatoren werden in den Räumen aufgestellt, so dass ein Unterdruck entsteht. Die Türen sollten offengehalten oder es sollten andere mögliche Öffnungen definiert werden, um einen angemessenen Luftstrom zu realisieren. In diesem Szenario ist der Hauptströmungsweg von den Fluren zu den Räumen gerichtet. Die Übertragung von Schadstoffen aus den Räumen in die anderen Gebäudeteile wird hierdurch verhindert. Diese Art von Strategie ist von Vorteil, wenn die Hauptschadstoffquelle in den jeweiligen Räumen liegt.

(b) Die Außenluft kann durch einfache Gebläseeinheiten direkt in die Räume geleitet werden. So kann die Schadstoffkonzentration in den Räumen verdünnt und in die anderen Gebäudeteile abgeführt werden. Um einen angemessenen Luftstrom aufrechtzuerhalten, müssen Hilfsöffnungen wie im vorherigen Fall definiert werden.

(c) Jeder Raum verfügt über seine eigenen Zu- und Abluftventilatoren. In diesem Fall ist eine Schadstoffverdünnung und -beseitigung auch in benachbarten Räumen möglich, wie in Abbildung 15 dargestellt. Für diesen Fall wurde zur Beseitigung der Schadstoffübertragung eine Luftschleierlösung in Betracht gezogen. Ein Luftschleier ist eine spezielle Lösung, bei der zwei verschiedene Zonen durch eine aerodynamische Barriere getrennt werden, so dass die Übertragung von Wärme, Flüssigkeit oder Verunreinigungen minimiert wird.

Abbildung 15
Kontaminationsübertragung zwischen Räumen (Konfiguration (c)). Links: jeder Raum verfügt über eigene Zu- und Abluftventilatoren, rechts: Erweiterung mit Luftschleier



Quelle: HRI, 2023

(d) Es ist auch möglich, den Räumen Frischluft zuzuführen und gleichzeitig einen Luftstrom zwischen den Räumen zu bilden. Zu- und Abluftventilatoren können mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten eingesetzt

werden, so dass der Raum mit Unter- oder Überdruck beaufschlagt werden kann. In diesem Fall erfolgt der Hauptluftstrom je nach Druckunterschied von den Fluren zu den Räumen oder umgekehrt.

Ergebnisse der Lüftungstechnischen Untersuchung

→ Seite 90

Materialalterungs- und Reinigbarkeittests des IBMBs

Das Ziel des Projektes ist es, die Auswirkung des Alterungsprozesses von Materialien auf die Reinigbarkeit zu erforschen. Für die Analyse wurden Materialien ausgewählt, die sich häufig in den kritischen Infrastrukturen wie Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Pflege und Altenheime auffinden lassen. Die ausgewählten Materialien wurden künstlichen Alterungsprozessen unterzogen und anschließend mit geeigneten Messverfahren untersucht.

Dazu wurden 50 Materialien aus sechs unterschiedlichen Gruppen ausgewählt (Tabelle 13). Die Materialien wurden dann noch einmal unterteilt in Materialien, die an verschiedenen Stellen in kritischen Infrastrukturen eingesetzt werden können und Materialien, die sich ausschließlich als Bodenbelag eignen. Letztere sind in Tabelle 13 mit „(B)“ markiert. Da Bodenbeläge einer erhöhten mechanischen Belastung ausgesetzt sind, müssen diese gesondert betrachtet werden.

Tabelle 13

Die Probenmaterialien, gegliedert in Kategorien, Material und Probenanzahl. Die Bezeichnung (B) verweist auf die Bodenmaterialien.

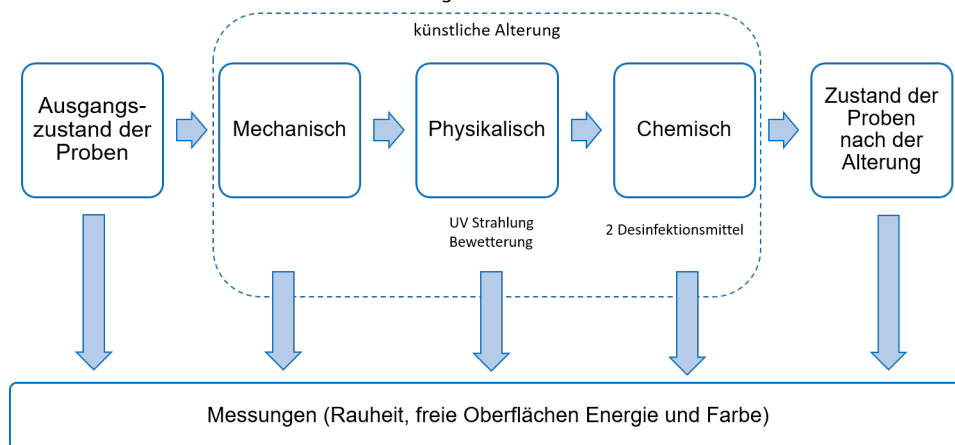
Kategorie	Material	Anzahl Proben
Kunststoff	PA, PP, PU	11
Kunststoff (B)	Linoleum, Kautschuk, Vinyl	15
Schichtstoffe	HPL	3
Holz	Lackierung, Öl, Lasur	5
Metalle	Edelstahl, Aluminium, Beschichtungen	8
Steinzeug/Fliesen (B)	Unglasiert, glasiert	8

Quelle: IBMB

Experimentelles Vorgehen

Die künstliche Alterung wird in die drei Prozesse: mechanische, physikalische und chemische Alterung unterteilt. Um den Einfluss der künstlichen Alterung auf die Materialien ableiten zu können, werden drei Oberflächenparameter (Rauheit, freie Oberflächenenergie und Farbe) mit geeigneten Messverfahren zunächst an ungealterten Proben und anschließend nach den künstlichen Behandlungen bestimmt. Maßgeblich für die Reinigbarkeit sind die Oberflächeneigenschaften (Rauheit und freie Oberflächenenergie). Die Farbe wird als optisches Kriterium hinzugezogen. Die Alterung der Materialien geht oftmals mit der Veränderung der Oberflächeneigenschaften und somit einer veränderten Reinigbarkeit einher. Entsprechend werden die Oberflächeneigenschaften vor und nach der künstlichen Alterung verglichen. Hierfür werden die Alterungsprozesse kombiniert durchlaufen, Abbildung 16.

Abbildung 26
Schematischer Verlauf der Versuche und Messungen



Quelle: IBMB

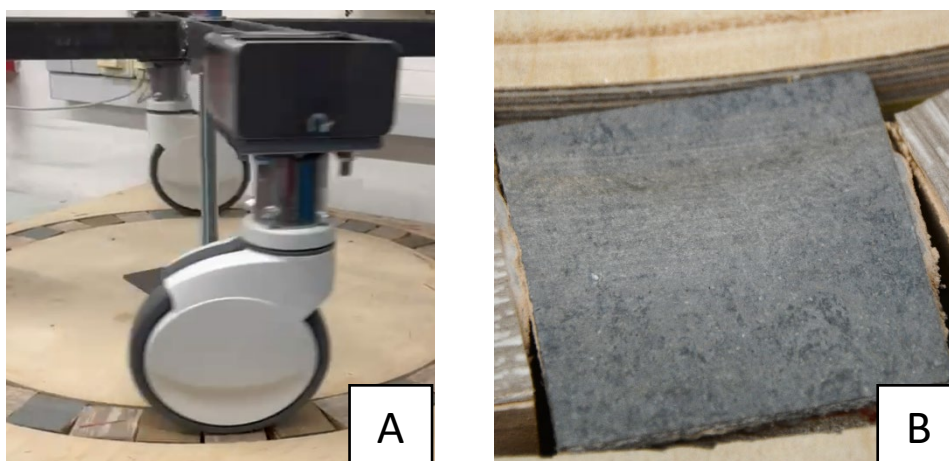
Methoden

Zur künstlichen, mechanischen Alterung der Materialien wurde ein Prüfstand entworfen.

Bei dem mechanischen Prüfstand handelt es sich um ein rotierendes Abnutzungssystem. Dazu können 40 Proben im Kreis positioniert werden. Diese müssen in der Höhe so angebracht werden, dass diese auf der gleichen Höhe wie das umgebende Material sind. Durch das Drehkreuz ist der Einsatz von vier Druckkörpern gleichzeitig möglich (Abbildung 17 A). Unterschiedliche Aufsätze können an dem Prüfstand eingebaut werden und die Flächenpressung kann variiert werden, um die entsprechenden mechanischen Belastungen zu simulieren. Aufsätze, mit denen über die Proben gerieben wird, sind bei diesem Projekt: eine harte Wurzelbürste, zwei Schuhbeläge mit verschiedenen Härten und Krankenhausbettrollen.

Durch Vorversuche wurde eine Umdrehungszahl von 40 U/min für die Durchführung der mechanischen Belastung ermittelt. Dabei konnten die ersten Abnutzungserscheinungen des Materials nach 7 Tagen festgestellt werden. Bei dieser Umdrehungszahl und der Anbringung von vier Druckkörpern wird jede Probe 160-mal in der Minute beansprucht.

Abbildung 17
Probenhalterung für die mechanische künstliche Alterung mit Krankenhausrollen (A), die Folgen der Belastung mit Wurzelbürsten (B)



Quelle: IBMB

Für die künstliche, physikalische Alterung werden die Proben in einen UV-Bewitterungsschrank gegeben. Dort werden diese künstlich bei einer Wellenlänge von 290 nm bis 400 nm bewettert, die Dauer ist nach DIN EN ISO 4892-1 nicht festgelegt. Ein Beanspruchungszyklus besteht aus einer Befeuchtung mit Wasser mit einer Dauer von einer Stunde und einer anschließenden Trocknung von 5 Stunden. Jeder Zyklus soll eine Reinigung der Oberflächen simulieren. In einer 28-tägigen Versuchsdauer wurden 140 Beanspruchungszyklen durchlaufen, diese spiegeln 140 Tage nach DIN 13063:2020-04 – wieder. Nach (EOTA 2004) beträgt die UV-Belichtungs-dosis für ein Jahr im Freien 200MJ/m²: Innerhalb der 28 Tage Bestrahlungszeit im UV-Schrank wird eine Belichtungs-dosis von 100MJ/m² freigesetzt. Dies entspricht einer Beanspruchung von ca. 62 Monaten an natürlicher UV-Strahlung. Fenster sind zu einem Großteil undurchlässig für UV-Strahlung, bei einem Fensterglas aus Floatglas mit ca. 5 mm Dicke wird auch die langwellige UV-Strahlung absorbiert (Schittich et al. 2012). Auch durch geringe UV-Anteile hinter der Glasscheibe können Materialien verspröden oder ausbleichen (Schittich et al. 2012). Entsprechend wird hier von einer deutlich höheren künstlichen Alterung als den genannten 140 Tagen ausgegangen.

Die künstliche chemische Alterung wird durch die Behandlung der Probenoberflächen mit zwei Desinfektionsmitteln simuliert. Es wird ein Desinfektionsmittel auf Ethanolbasis (häufig in kritischen Infrastrukturen eingesetzt) und ein zweites auf Peressigsäurebasis (wird bei Ausbrüchen mit hochansteckenden Erregern eingesetzt) verwendet, um die Wirkung unterschiedlich stark bakterizider, fungizider und viruzider Mittel darzustellen. In der DIN EN ISO 2812-1 [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#) ist die Dauer der Beaufschlagung nicht festgelegt. Es wurde eine Dauer von jeweils 14 Tagen festgelegt. Nach 14 und 28 Tagen werden Messungen durchgeführt um die Zeit abhängigen Einfluss des Desinfektionsmittels beschreiben zu können. Das Desinfektionsmittel wird während der Desinfektionsphase sechsmal aufgetragen und hat eine Einwirkzeit von mindestens 48 Stunden (Tabelle 14).

Für diesen Versuch werden Watte-pads mit einer Größe von 1,8 x 1,8 cm auf die Proben gelegt und 1 ml Desinfektionsmittel darauf aufgetragen. Auf jeder Probe werden zwei Desinfektionsmittel in gesonderten Bereichen gleichzeitig getestet (Abb. 18 A). Um einer Evaporation möglichst entgegenzuwirken, werden die Proben mit Glasdeckeln abgedeckt (Abb. 18 B).

Tabelle 14

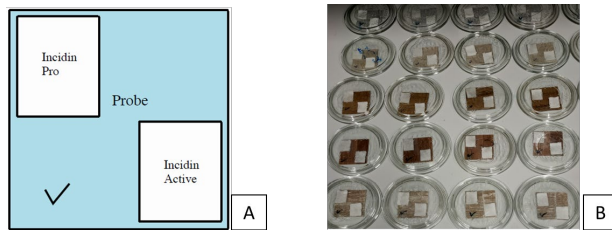
Zeitlicher Ablauf der künstlichen, chemischen Alterung mit Zeitpunkten der Desinfektionsmittel-Beanspruchung und Messungsphasen

Zeitlicher Ablauf der Alterung			
Woche 1	Desinfektionsphase 1	Montag	1.Desinfektion
		Mittwoch	2.Desinfektion
		Freitag	3.Desinfektion
Woche 2		Montag	4.Desinfektion
		Mittwoch	5.Desinfektion
		Freitag	6.Desinfektion
Woche 3	Messung-Phase 1		
Woche 4			
Woche 5	Desinfektionsphase 2	Montag	7.Desinfektion
		Mittwoch	8.Desinfektion
		Freitag	9.Desinfektion
Woche 6		Montag	10.Desinfektion
		Mittwoch	11.Desinfektion
		Freitag	12.Desinfektion
Woche 7	Messung-Phase 2		
Woche 8			

Quelle: IBMB

Abbildung 18

Der Versuchsaufbau während des Desinfektionsmitteltests (A), beide Desinfektionsmittel werden gleichzeitig aufgetragen. Links oben „Incidin Pro“ und rechts unten „Incidin Active“, der Haken markiert die Position links unten auf den Proben um die Orientierung und Position der Desinfektionsmittel dauerhaft nachvollziehen zu können. Die Glasdeckel werden über den Proben positioniert um die Evaporation weitestgehend zu verhindern (B).



Quelle: IBMB

Die Reinigbarkeit wird durch die Berechnung der Restpartikelmenge bestimmt. Ebenfalls findet eine Bewertung der Alterungserscheinungen durch die Reinigbarkeit statt. Diese wird durch die Restpartikelmenge P bewertet. Die Restpartikelmenge gibt die nach der Reinigung auf der initial definiert kontaminierten Oberfläche zurückbleibende Anzahl der Partikeln an. Die Ermittlung der Restpartikelmenge erfolgt auf der Basis des Modells nach (Dreßler 2018). Dieses wird in Gleichung 1 beschrieben.

Dabei werden die Partikelgrößen in drei verschiedene Partikelgrößenkanäle unterteilt (Tabelle 15). Dort sind die Koeffizienten der verschiedenen Größenkanäle für die Rauheit R_a [μm], die freie Oberflächenenergie γ_s [mN/m] sowie den Wechsellparameter $R_a * \gamma_s$ [$\mu\text{m} * \text{N/m}$] enthalten. Für die Konstante gilt $k_0 = 0,1$.

$$P = e_{bi} * R_a + b_j * \gamma_s + b_{ij} * R_a * \gamma_s - k_0 \quad (1)$$

Tabelle 15

Größenkanäle zur Bestimmung der Restpartikelmenge

Größenkanal	0,3 < d ≤ 0,5 μm		0,5 < d ≤ 1,0 μm		1,0 < d ≤ 3,0 μm	
	b	α	b	α	b	α
R_a [μm]	5,0120	0	2,5161	$3 * 10^{-5}$	1,4622	0,02
γ_s [mN/m]	0,2300	0	0,1390	0	0,1123	0
$R_a * \gamma_s$	-0,1291	$2 * 10^{-11}$	-0,044	0,02	-0,0111	0,58

Quelle: IBMB

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Im Zusammenhang mit der im ersten Arbeitspaket (AP1-UP1, UP2 & UP3) zur erfolgenden Erhebung zu bestehenden Maßnahmen und Herausforderungen hatte der Projektverlauf zu neuen Erkenntnissen und Fragestellungen geführt. Diese ergaben sich aus der dynamischen Entwicklung und sich wandelnden Forschungslage der aktuellen Pandemie und komplexen Anforderungen unterschiedlicher zu bedenkender Pathogene und Infektionswege. Dies machte eine Abweichung vom bisherigen Arbeitsplan erforderlich. Auch die Erhebung zur Situation aus Sicht der Nutzenden erforderte einen zeitlichen Mehraufwand. Dies hatte Auswirkung auf die Methodik der Untersuchungen und die Einbindung von zu befragenden Nutzendengruppen. Zudem gab es signifikante Verzögerungen in der Besetzung der Stellen bei den Forschungspartnern. Da mehrere Arbeitsschritte die Vorarbeit oder Nachbereitung der Arbeitsschritte andere Partner erforderten, erfolgte insgesamt eine zeitliche Verzögerung.

Das Institut für Hygiene und Umweltmedizin der Charité konnte erst ab dem 01.06.2021 mit den für das Projekt notwendigen Arbeiten beginnen, weil der notwendige Zuwendungsweiterleitungsvertrag erst im Januar 2021 geschlossen werden konnte. Weitere Zeit war nötig, um die Stelle auszuschreiben und ab dem 01.06.2021 erfolgreich zu besetzen. Das Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin konnte erst ab Frühjahr 2021 mit den für das Projekt notwendigen Arbeiten beginnen, weil der notwendige Zuwendungsweiterleitungsvertrag ebenfalls erst im Januar 2021 geschlossen werden konnte. Weitere Zeit war nötig, um die Stelle auszuschreiben erfolgreich zu besetzen. Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig konnte erst ab dem 01.03.2021 mit den für das Projekt notwendigen Arbeiten beginnen, weil die Stelle erst zu diesem Zeitpunkt erfolgreich zu besetzen war.

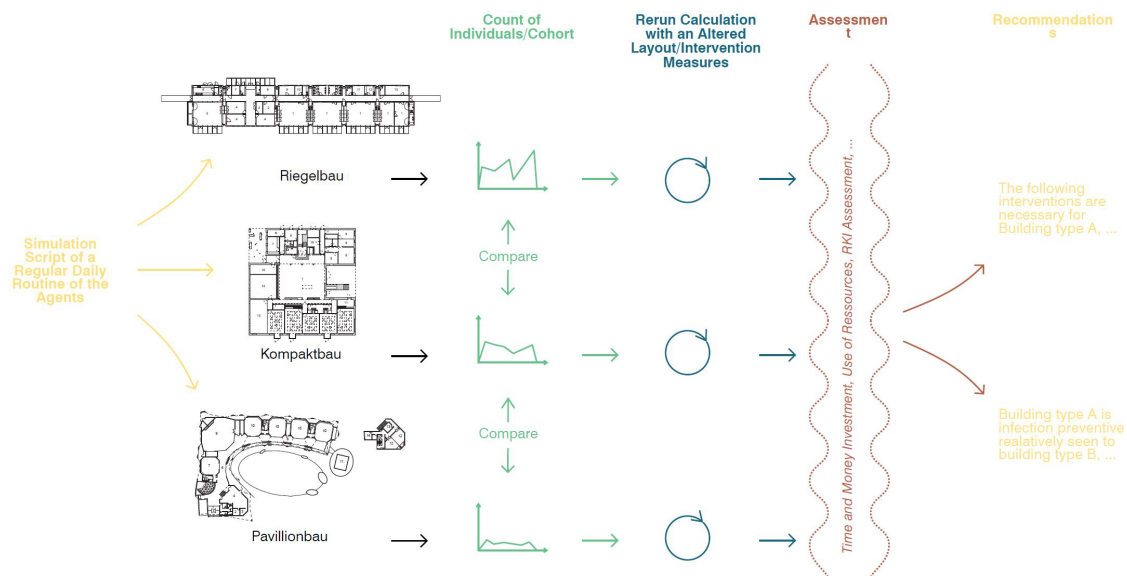
Aufgrund dieser Umstände wurde eine kostenneutrale Projektlaufzeitverlängerung beantragt, der stattgegeben wurde.

Agent-Based-Movement Analysen und architekturpsychologische Betrachtung

Um Knotenpunkte, an denen ein großes Personenaufkommen in den Infrastrukturen zu erwarten ist, zu analysieren, plante das IKE Agent-Based-Movement Analysen durchzuführen. Dadurch sollten relevante Bereiche, an denen eine hohe Kontaktanzahl zwischen Personen erfolgt, und mögliche Intervention und Gegenmaßnahmen simulativ überprüft werden. Aufgrund fehlender Ressourcen, da dieser Arbeitsschritt nicht im Antrag vorgesehen war, konnte diese Methode nicht angewendet werden. Zudem ist zu erwarten, dass über Anweisungen im Betrieb der Infrastrukturen eine Staubildung organisatorisch vorgebeugt werden kann. Da in gut organisierten Transitbereichen die Aufenthaltszeit generell als kurz angesehen wird, ist das Infektionsrisiko dort nicht als kritisch zu bewerten.

Ebenfalls wurde initial vom IKE eine ressourcenschonende Überprüfung von Eingriffen in den Grundriss und in die Innenraumgestaltung mittels VR- oder AR-Simulationen angestrebt. Eine architekturpsychologische Untersuchung konnte jedoch aufgrund fehlender finanzieller und personeller Ressourcen im Antrag nicht durchgeführt werden.

Abbildung 19
Aufbau Methode zur Bewertung von Interventionen zur Reduzierung der Kontaktanzahl



Quelle: IKE

Bewertungsmatrix

Gemeinsam mit den weiteren Forschungspartnern wurde begonnen eine multifaktorielle Bewertungsmatrix zur Einordnung und Überprüfung der möglichen Empfehlungen der Forschungspartner zu entwickeln. Die Bewertungsmatrix umfasste Faktoren aus bautechnischer, soziologischer, betriebswirtschaftlicher, epidemiologischer und infektiologischer Perspektive. Diese sollen auch auf der Wissensplattform des Folgeprojekts Database of Architecture and Health Environment der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden, damit Planende die Verhältnismäßigkeit der möglichen Maßnahmen zueinander einordnen können. Die Matrix wurde jeweils institutsintern anhand exemplarischer infektionspräventiver Maßnahmen geprüft, um die Bewertungsmaßstäbe und Methodik gemeinsam weiterzuentwickeln und zu konkretisieren. Daraus wurde eine zweite, gekürzte Version erstellt. Jedoch musste in der Diskussion festgestellt werden, dass die Bewertungsmaßstäbe nicht zu quantifizieren seien. Dazu müsste für die einzelnen Faktoren ein eigenes Forschungsprojekt durchgeführt werden, um einheitliche Maßstäbe festlegen zu können. Auch war es nicht möglich eindeutig zu bestimmen, ob alle Faktoren gleichwertig oder ungleichwertig behandelt werden. Zunächst wurde erprobt, inwiefern die Bewertungen mittels qualitativer Aussagen durchgeführt werden könnten. Die Gesamtheit der möglichen Maßnahmen sollte dann durch Killerfaktoren, wie beispielsweise eine allzu kleine Infektionsrisikominderung oder statische Undurchführbarkeit im Bau, auf eine relevante Auswahl gekürzt werden. Da die qualitative Bewertung jedoch die Vergleichbarkeit der Effektivität und eine Kosten-Nutzenanalyse für Planende nicht ermöglicht, wurde die Anwendung der Matrix verworfen.

Ergebnisse und Planungshilfe

Generell kann der Einfluss des Baus nur im Kontext mit weiteren Faktoren, die das Infektionsgeschehen beeinflussen, gesehen werden. Der Bau ist nicht der, sondern ein sich bedingender Faktor. Daher sind die unterschiedlichen Bereiche und Tätigkeiten in den einzelnen Infrastrukturen ebenfalls unterschiedlich kritisch zu bewerten. Grundlegende Entwurfsprinzipien müssen folglich individuell hinsichtlich der jeweiligen Gegebenheiten einer Infrastruktur umgesetzt werden. Zudem hat sich gezeigt, dass die Aufklärung zu den Verhaltensregeln im Bau und Betrieb und somit für Planende und Nutzende essentiell ist. Andernfalls kann ein falscher Umgang mit dem Gebäude oder fehlende finanzielle Rücklagen zur kontinuierlichen Wartung der Gebäudetechnik sich kontraproduktiv auf die Unterbrechung von Infektionswegen auswirken.

Tabelle 16
Sich gegenseitig bedingende Faktoren des Infektionsrisikos

Faktoren des Infektionsrisikos

Faktoren der Nutzenden	Faktoren der Mitarbeitenden	Einrichtungsspezifische Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> ■ Alter, Aktivitätsgrad und Grunderkrankungen ■ Gesundheits- & Hygienekompetenz (z.B. korrektes Maskentragen) ■ Impfstatus ■ Kontakte zu Familie, Kollegen etc. ■ Besucherverkehr ■ Aufenthaltszeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ausbildungsgrad, insb. auch Kompetenz in Bezug auf Infektionsprävention ■ Personalmangel ■ Impfstatus ■ Aufenthaltszeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Räumliche Bedingungen (z.B. Größe, Belegung und Möglichkeiten zur Kohortierung) ■ Belüftungsverhältnisse und Monitoring der Belüftung

Quelle: IKE/Charité

Abgeleitete Entwurfsprinzipien

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Nutzendeninterviews und der typologischen Bewertungen wurden 12 Entwurfsprinzipien abgeleitet. Diese wurden interdisziplinär hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit diskutiert und gemeinsam final ausformuliert. Die Entwurfsprinzipien wurden als Leitthemen zur Formulierung der baukonstruktiven Empfehlungen herangezogen. Die Maßnahmen zielen auf die Reduzierung der Kontaktanzahl, der Kontaktzeit, der Anzahl gemeinsam genutzter Objekte und auf eine bessere Luftqualität ab. Den folgenden Entwurfsprinzipien ist neben einer grafischen Darstellung auch ein Best-Practice-Beispiel zugeordnet. Diese wurden während der Expertenworkshops am besten für das jeweilige Entwurfsprinzip bewertet.

Dezentrale und nutzerspezifische Erschließung

Je mehr Zugänge es zu Treppenhäusern und Aufzüge in einem Gebäude und auch zwischen einzelnen Räumen, Flächen und Etagen gibt, desto einfacher können sich getrennte, kohortenspezifische Personenströme umsetzen lassen. Dies ist relevant, falls sich Kohorten oder exponierte und weniger exponierte Personengruppen nicht treffen sollen. Lehrkräfte sind beispielsweise während der COVID-19-Pandemie häufiger Überträger von Infektionen gewesen als es Schüler und Schülerinnen sind [6,7]. Eine Ursache dafür könnte deren häufigerer Kontakt zu unterschiedlichen Kohorten sein. Auch können durch getrennte Erschließungswege Stausituationen vermieden werden, in denen Personen in pandemischen Situationen keinen geeigneten Abstand zueinander wahren können. Darüber hinaus können so Wege durch andernfalls gemeinsam genutzte Flure abgekürzt oder vermieden werden. Eine Kammstruktur mit traktsspezifischen Eingängen und Treppenhäusern kann sich beispielsweise besser zur Umsetzung einer dezentralen Erschließung als Kompaktbauten eignen, erfordert jedoch mehr Grund- und Fassadenfläche. Eine Arztpraxis kann derart geplant werden, dass es für Ärzte und medizinisches Personal einen gesonderten Zugang zu Behandlungs- und Untersuchungszimmer gibt, der mehrere Behandlungszimmer auch direkt miteinander verbinden kann. So lässt sich unnötiger Kontakt zu Patienten vermeiden. Auch Klassen- und Gruppenräume können sowohl mit einem Zugang sowohl zum Flur als auch zum Schulhof gestaltet werden. Diese Maßnahme ist nicht auf Infrastrukturen anwendbar, bei denen ein kontrollierbarer Zugang erfolgen muss und kein Betrieb separater Kontrollstellen gewährleistet werden kann. Mehr Zugänge erfordern auch einen Mehraufwand für den Schließdienst. In Altenheimen muss insbesondere der Zu- und Abgang dementer Bewohnender überwacht werden können.

Abbildung 10

Links: ungeeignete zentrale Erschließung; rechts: geeignete dezentrale und nutzerspezifische Erschließung



Quelle: IKE

Abbildung 21

Grundriss Dezentrale und Nutzerspezifische Erschließung, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld



Quelle: Dietger Wissounig Architekten/IKE

Temporäre Abtrennbarkeit

Je mehr autarke Organisationseinheiten gebildet werden können, desto einfacher lassen sich in pandemischen Situationen Kohorten bilden. Dies betrifft insbesondere Infrastrukturen wie Kitas, Schulen und Altenheime und gilt sowohl für die Bildung von Funktionseinheiten auf der Ebene des Gesamtgebäudes, als auch für die Abtrennung einzelner Räume und Belüftungseinheiten. Dafür sind eine dezentrale Erschließung und eine getrennte, beispielsweise sanitäre Versorgung der jeweiligen Einheiten erforderlich. So sollten jedem Bereich einer Klasse bzw. Kohorte in der Schule ein Zugang, Spielflächen im Außenbereich, eine Sanitäreinrichtung, ein Klassenraum und je nach pädagogischem Konzept ein weiterer Flex- oder Gruppenlernraum zugeordnet sein. Räume wie etwa eine Schulcafeteria oder Sporthalle, die gemeinsam genutzt werden, müssen im Wechselbetrieb und je nach vorherrschendem Erregerprofil mit ausreichender Durchlüftung und Aufbereitung zwischen den Gruppenwechseln benutzbar sein. Eine weitere Möglichkeit stellt die temporäre, räumliche Abtrennung des gesamten Luft- und Raumvolumens in kohortenspezifische Einzelvolumen für eine zeitgleiche Nutzung dar. Alle Funktionseinheiten sollten jedoch getrennt belüftet werden, sodass Erreger nicht durch ein gemeinsames Lüftungssystem von einer Kohorte in eine weitere Kohorte gelangen können.

Abbildung 32

Links: keine Abtrennbarkeit möglich; rechts: temporäre Abtrennbarkeit einzelner Bereiche



Quelle: IKE

Abbildung 43

Grundriss Temporäre Abtrennbarkeit, Elderly Healthcare Centre in Martí i Julià Hospital Park



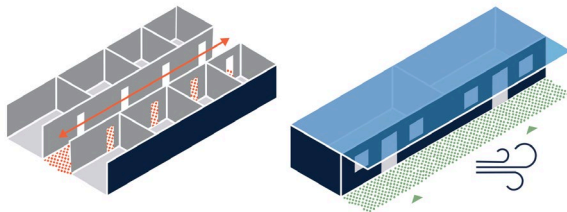
Quelle: Pinearq/IKE

Im Außenbereich liegende Erschließung

Das Risiko sich in gemeinsam genutzten Bewegungsflächen im Innenraum durch aerosolübergreifende Erreger anzustecken kann erhöht sein. Dagegen kann eine Erschließung im Außenbereich durch die dort vorhandene natürliche Belüftung und weitere Umweltfaktoren das Risiko senken. Zur Realisierung dieser Maßnahme eignen sich besonders gut Pavillonstrukturen, Laubengänge, Terrassen und überdachte Innenhöfe. Diese Maßnahme kann jedoch zu einem vermehrten Eintrag von Dreck in Innenräume führen. Eine Prüfung der Umsetzbarkeit in der jeweiligen Gebäudetypologie muss daher individuell geklärt werden. Beispielsweise eignet sich die Maßnahme gut, wenn bereits als infektiös identifizierte Personen zu gesonderten Warte- und Behandlungsräumen geleitet werden sollen, ohne dass diese die Innenraumluft kontaminieren können.

Abbildung 54

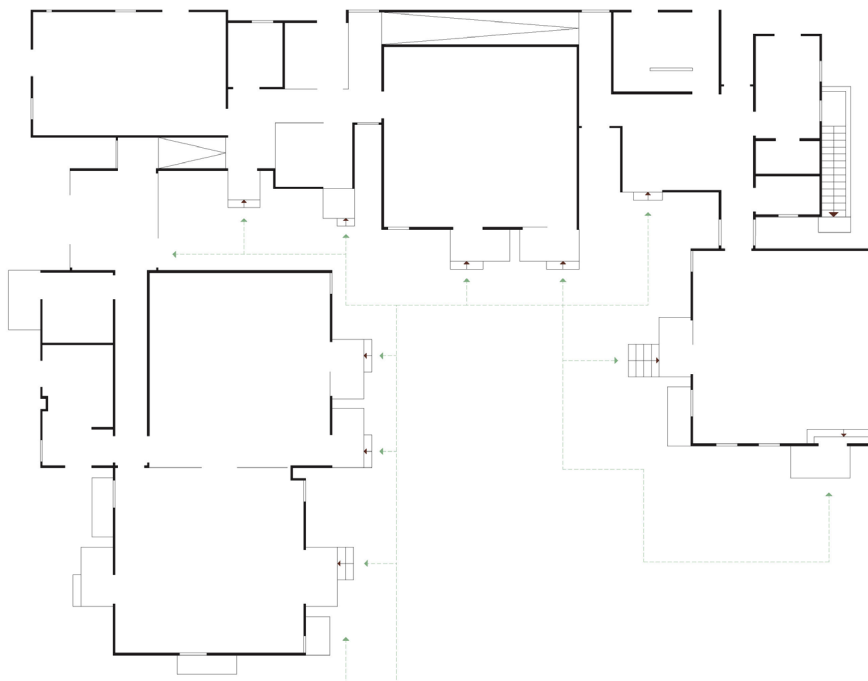
Links: bei rein natürlicher Belüftung ungeeignete innenliegende Erschließung; rechts: im Außenbereich liegende und natürlich belüftete Erschließungen



Quelle: IKE

Abbildung 65

Grundriss Im Außenbereich liegende Erschließungen, Publicnursery, Day Care Glyfada, Greece



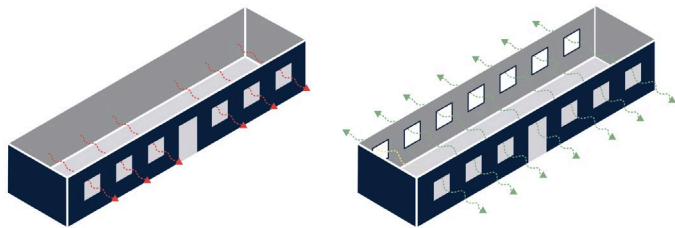
Quelle: KLab/IKE

Querlüftung gewährleisten

Eine hohe Luftaustauschrate kann das Infektionsrisiko verringern. Dabei ist auf eine gleichmäßige Belüftung, die alle Personen und möglichen Infektoren im Raum erreicht, zu achten. Eine mechanische Belüftung kann eine gleichbleibend hohe CO₂ Konzentration bei angenehmer Klimatisierung sicherstellen und je nach Höhe der Luftaustauschrate das Ansteckungsrisiko verringern. Falls eine mechanische Belüftung weder im Bau noch im Betrieb finanzierbar ist, sollte eine natürliche Querlüftung ermöglicht werden. Jedoch muss dann auch ein internes Lüftungsregime während der Raumnutzung sichergestellt werden, sodass die mögliche Anzahl von Erregern geringgehalten werden kann. CO₂-Uhren können dabei als sinnvolles Instrument zur Aufforderung zu Lüften dienen. Die CO₂-Uhr sollte dabei in der Nähe der Emissionsquellen – beispielsweise Schülern – aufgestellt werden. Systeme, die Fenster automatisch öffnen, können auch eine Möglichkeit darstellen, eine annähernd geeignete, natürliche Belüftung sicherzustellen. Mechanische Lüftungssysteme sollten derart gebaut werden, dass Erreger aus einer Funktionszone bzw. dem Bereich einer Kohorte nicht in einen anderen Bereich gelangen und so Infektionsübertragungen vermieden werden können.

Abbildung 76

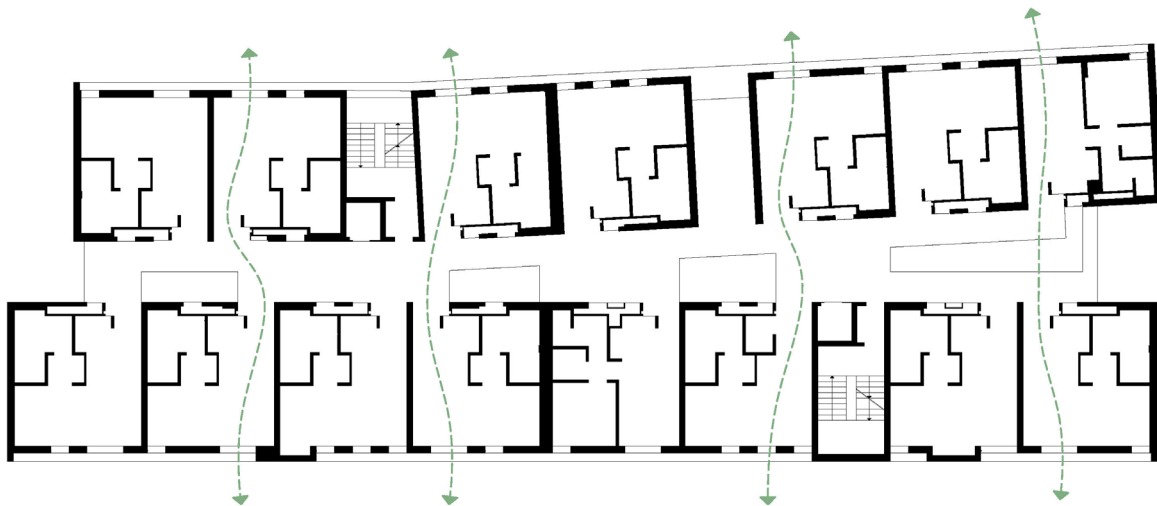
Links: erschwertes Lüften durch einseitige Fenster; rechts: Querlüftung gewährleistet



Quelle: IKE

Abbildung 87

Grundriss Querlüftung gewährleisten, Centro de Apoio à Terceira Idade



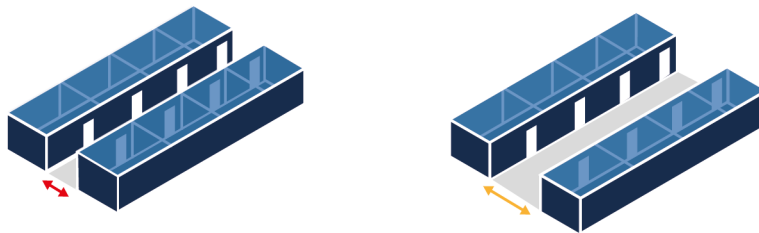
Quelle: CVDB/IKE

Großzügige Bewegungsflächen

In gemeinsam genutzten Fluren kann das Ansteckungsrisiko durch die potenziell höhere Anzahl an infizierten Anwesenden erhöht sein. In großzügig dimensionierten Bewegungsflächen können Personen besser Abstand zueinander halten und eine Staubbildung, in der Personen keinen ausreichenden Abstand während eines Infektionsausbruches halten können, lässt sich folglich vermeiden. Allerdings sind größere Raumvolumen auch aufwändiger zu belüften und zu klimatisieren. Im Bau und bei der Reinigung entstehen zudem Mehrkosten. Diese Maßnahme ist nur in Bereichen mit hohem Verkehrsaufkommen sinnvoll.

Abbildung 98

Links: schmaler Flur; rechts: Grundriss mit großzügigem Bewegungsflächen



Quelle: IKE

Abbildung 109

Grundriss Großzügige Bewegungsflächen, Volksschule Unterdorf, Höchst



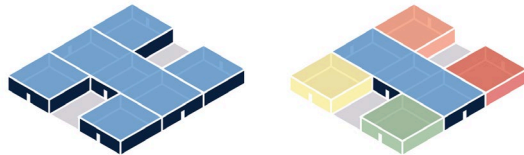
Quelle: Dietrich Untertrifaller Architekten/IKE

Gute Übersichtlichkeit

Da gemeinsam genutzte Flure häufig eine hohe Erregerdichte haben können, sollte ein Gebäude übersichtlich gestaltet werden. Die Nutzenden können dann frühzeitig andere Personen(-gruppen) und den direktesten Weg zu ihrem Ziel erkennen und anderen Personen ausweichen sowie unnötig lange Routen vermeiden. Dies lässt sich beispielsweise durch ein Atrium, eine zentrale Magistrale, Glaswände und eine einfach zu lesende Gebäudestruktur erreichen.

Abbildung 30

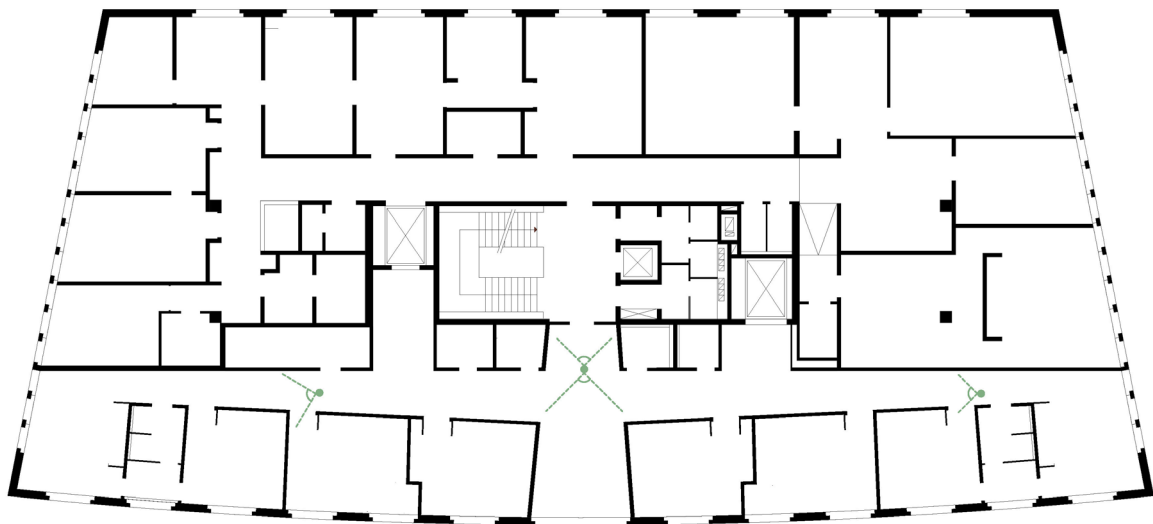
Links: Keine innere oder äußere Erkennbarkeit von einzelnen Gebäudebereichen; rechts: gute Übersichtlichkeit



Quelle: IKE

Abbildung 31

Grundriss Gute Übersichtlichkeit, Kardiologisches Zentrum, Zürich



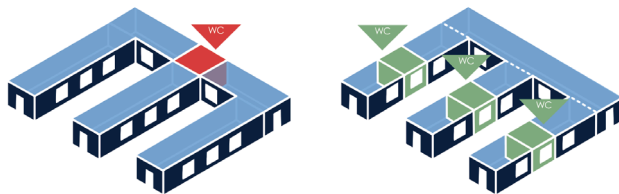
Quelle: Ueberwasser Architektur/IKE

Dezentrale Sanitäranlagen

Sanitäranlagen sollten nach Nutzengruppen und je nach Einrichtungsform auch nach potenziellen Kohorten getrennt werden, sodass das Risiko einer Übertragung von Infektionen zwischen den Gruppen verringert wird. Falls die Nutzenden einer Infrastruktur in einer pandemischen oder lokalen Ausbruchssituation in Kohorten oder Patientengruppen unterteilt werden, benötigt jede Kohorte einen Zugang zu einer eigenen Sanitäranlage. Dadurch kann das Risiko für Kontaktinfektionen, aber auch aerogene Übertragungen verringert werden. Auch werden die Wege über gemeinsam genutzte Flure verkürzt. Diese Maßnahme gilt insbesondere für Infrastrukturen mit viel Personenverkehr. Jedoch bedeuten dezentrale WCs und Nasszellen auch zusätzliche Wasserleitungen und Zapfstellen und können bei Nichtbenutzung eine Verkeimungsgefahr darstellen. Die Notwendigkeit von Duschen und deren dauerhafte und kontinuierliche Nutzung sollte daher individuell bei der Planung geprüft werden. Eine Trennung von Personal- und Patienten/Bewohner-WCs in Arztpraxen oder in Altenheimen ist aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen unabdingbar. Deren Anzahl und Größe sind nach der Arbeitsstättenverordnung bemessen und zu planen.

Abbildung 32

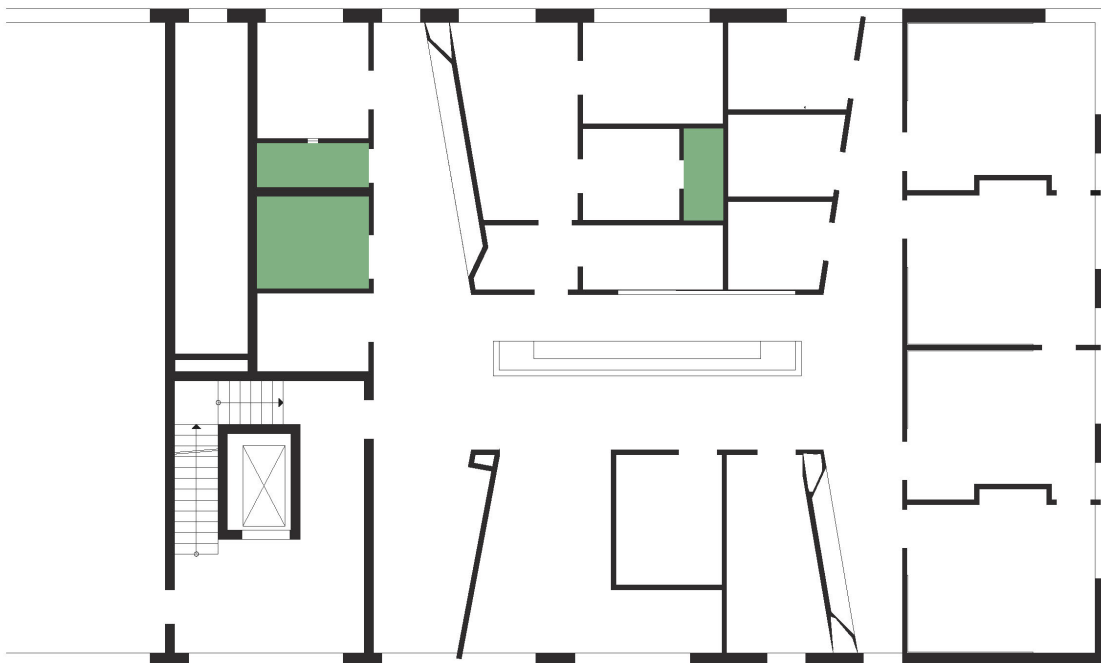
Links: zentrale Sanitäranlage, die zu mehr Kontaktinfektionen führen kann; rechts: dezentrale Sanitäranlagen, die Kontakte reduziert



Quelle: IKE

Abbildung 33

Grundriss Dezentrale Sanitäranlagen, Praxiszentrum Burglengenfeld



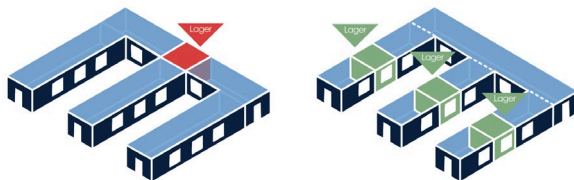
Quelle: PureGruppe/IKE

Dezentrale Lagerflächen

Durch die Nutzung eines einzigen zentralen Lagers können Schmierinfektionen großflächig innerhalb eines Gebäudes verteilt werden. Dies kann durch die Nutzung dezentraler Lager, auf die jeweils nicht alle Beschäftigten Zugriff haben, vermieden werden. Die Anlieferung und Versorgung durch externe Logistiker sollte in Arztpraxen jedoch an ein zentrales Lager erfolgen, da eine direkte Bestückung von Untersuchungs- und Behandlungszimmern die gleichzeitige Nutzung verhindert. Zudem wird so externer Logistikverkehr auf den gemeinsam genutzten Fluren vermieden und das Risiko des Ein- oder Austragens eines Erregers verringert. Außerdem müssten die Zuliefernden andernfalls Zugang zu allen entsprechenden Räumen und Schränken erhalten. Auch muss der gesamte Lagerbestand im Raum bei einer Kontamination durch einen infektiösen Patienten in medizinischen Einrichtungen verworfen werden. Dezentrale Lager vermeiden wiederum, dass beispielsweise Lehrkräfte und andere nutzende lange Laufwege zu einem zentralen Lager auf gemeinsam genutzten Fluren ablaufen müssen. In diesen können Sie sich durch kontaminierte Luft anstecken. Es gilt also bei der Planung, die individuellen Vor- und Nachteile bezüglich der infrastrukturenspezifischen Verordnungen und Arbeitsprozessen im Verhältnis zu den möglichen Lagerflächen herauszuarbeiten.

Abbildung 34

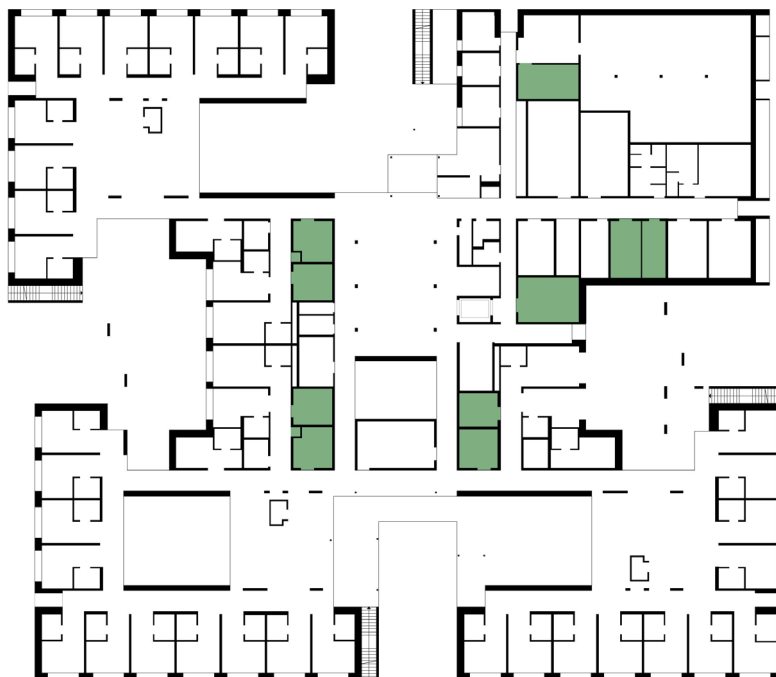
Links: zentrale Lagerfläche, die zu mehr Kontaktinfektionen führen kann; rechts: dezentrale Lagerfläche, die Kontakte reduziert



Quelle: IKE

Abbildung 35

Grundriss Dezentrale Lagerflächen, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld



Quelle: Dietger Wissounig Architekten/IKE

Kurze Wege

Zwischen hochfrequenten Räumen und Bereichen sollten kurze Wege bestehen, sodass Personen möglichst wenig Zeit in gemeinsam genutzten Bewegungsflächen verbringen. In der Pflege oder bei der medizinischen Versorgung erleichtern kurze Arbeitswege die Arbeit des Personals, sodass sie mehr Zeit zur Einhaltung von Maßnahmen wie der Händehygiene haben. Die Definition der hochfrequenten Räume ist je nach Infrastrukturtyp unterschiedlich und muss bei der Planung analysiert werden. Klassenräume, Sanitäranlagen, Cafeteria, Empfangsbereich, Warteräume und Behandlungsräume können dazuzählen.

Abbildung 36

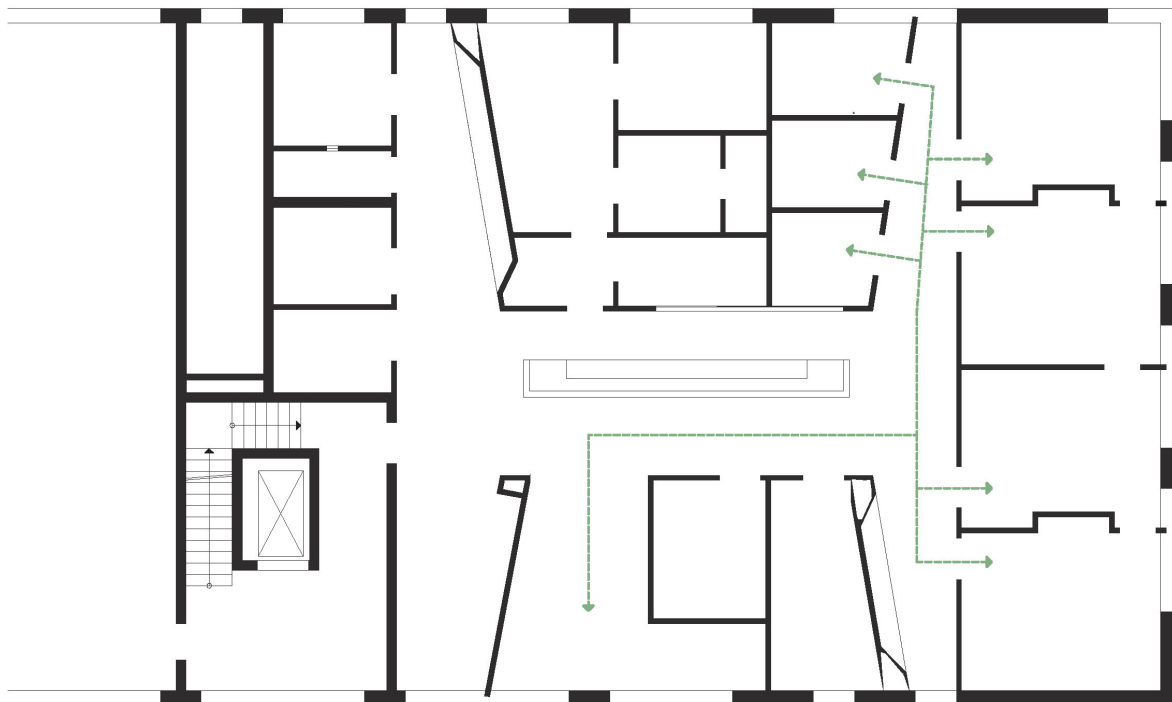
Links: Lange Wege aus allen Bereichen zu einem wichtigen Funktionsbereich, rechts: kurze Wege aus allen Bereichen zu wichtigem Funktionsbereich



Quelle: IKE

Abbildung 37

Grundriss kurze Wege, Praxiszentrum Burglengelfeld



Quelle: PureGruppe/IKE

Überdachter Außenbereich

Falls überdachte Außenbereiche vorhanden sind, können diese bei guter natürlicher Durchlüftung und gleichzeitiger geeigneter Witterung als temporäre Außenräume genutzt werden. Diese Außenbereiche müssen regen- und sonnengeschützt sein und können die Personendichte in Innenräumen wie beispielsweise in Klassenräumen entzerren, sodass dort das Infektionsrisiko sinkt. Auch können diese Bereiche zur Unterbringung spezifischer Patientengruppen in Arztpraxen genutzt werden. Außenflächen können auch temporär während einer Ausbruchssituation überdacht werden.

Abbildung 38

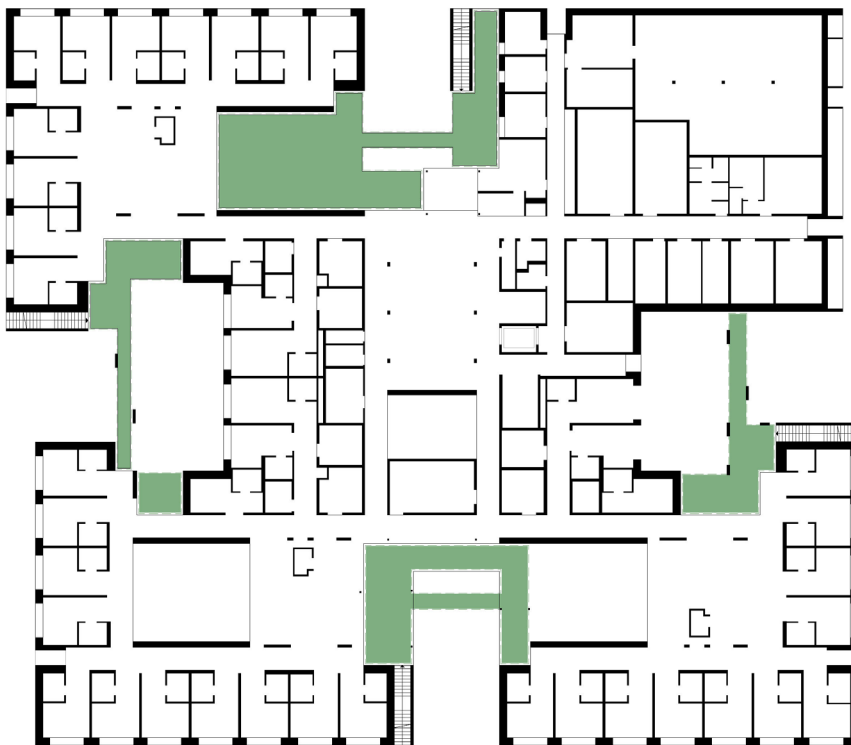
Links: keine Ausweichts- und Ergänzungsflächen, die vor Witterung geschützt sind; rechts: Überdachter Außenbereich



Quelle: IKE

Abbildung 39

Grundriss Überdachter Außenbereich, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld



Quelle: Dietger Wissounig Architekten/IKE

Großzügige An- und Abfahrtsbereiche mit Fahrradstellplätzen

Neben dem Infektionsgeschehen innerhalb einer Infrastruktur ist auch das Infektionsgeschehen während der An- und Abfahrt relevant. Durch großzügige An- und Abfahrtsbereiche lässt sich sicherstellen, dass in pandemischen oder lokal kritischen Infektionsausbruchssituationen Test- und Screeningstationen eingerichtet werden können, um Personen(-gruppen) abweisen oder zielgerichteter durch das restliche

Gebäude leiten zu können. Zudem können temporäre Zelt- oder Containerräume aufgebaut werden, falls die Innenraumsituation entzerrt werden muss.

Während einer infektiöskritischen Situation, egal ob lokal beschränkt, Epidemie oder Pandemie stellt die An- und Abreise mit dem Fahrrad die sicherste Methode dar, da sich die einzelne Person an der frischen Luft und nicht wie etwa in einem Bus in einem geschlossenen und mit weiteren Personen geteilten Raum befindet. Zudem kann das Immunsystem durch die körperliche Tätigkeit gestärkt werden. Um die Wahl dieses Verkehrsmittels zu fördern, sollten großzügige Fahrradstellplätze eingeplant werden. Auch die Nutzung des automobilen Individualverkehrs kann das Infektionsrisiko gegenüber gemeinschaftlich genutzten Verkehrsmitteln senken.

Abbildung 40

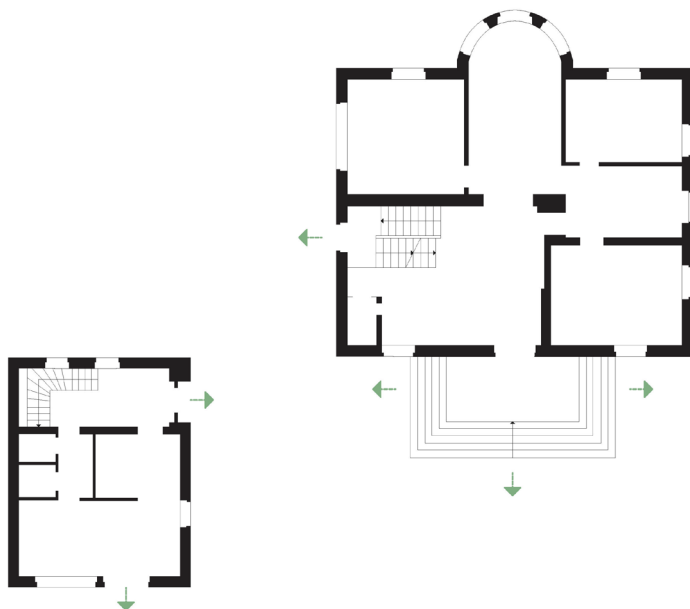
Links: Kleiner Anfahrtsbereich; rechts: großzügige An- und Abfahrtsbereiche mit Platz für Fahrradstellplätze



Quelle: IKE

Abbildung 41

Grundriss Großzügige An- und Abfahrtsbereiche mit Fahrradstellplätzen, Villavita - Zentrum für ganzheitliche Medizin



Quelle: Trinkt+Kreuder/IKE

Bauliche Empfehlungen

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Nutzendeninterviews und der typologischen Bewertungen wurden bauliche und lüftungstechnische Empfehlungen abgeleitet. Diese wurden interdisziplinär hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit diskutiert und gemeinsam final ausformuliert. Die Entwurfsempfehlungen sind infrastrukturübergreifend und infrastrukturenspezifisch zugeordnet. Sie stellen eine mögliche Umsetzung eines Entwurfsprinzips dar.

Weitere Planungshilfen zum infektionspräventiven Bauen sind auf der Webseite von Zukunft Bau abzurufen:



www.zukunftbau.de/programme/infektionspraeventives-bauen

Bauliche Empfehlungen Schulen	→ Seite 68
Bauliche Empfehlungen Kindergärten	→ Seite 73
Bauliche Empfehlungen Alten- und Pflegeheimen	→ Seite 77
Bauliche Empfehlungen Arztpraxen	→ Seite 83
Ergebnisse des Systemic Reviews baulicher Interventionen	→ Seite 87

Tabelle 17
Empfehlungen Infrastrukturübergreifend

Infrastrukturübergreifende Empfehlungen		
Bauliche Maßnahmen der Basishygiene Struktur	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Innenhöfe, Kamm- und Pavillonstrukturen können die natürliche Be- und Entlüftung erleichtern.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Hochfrequentierte Räume sollten sich zur besseren Querlüftung von Fassadenseite zu Fassadenseite erstrecken.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Bei natürlicher Belüftung sollten Räume verschiedener Kohorten nicht in einer Durchzugsachse positioniert werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Hochfrequentierte Räume sollten sich zur besseren Querlüftung von Fassadenseite zu Fassadenseite erstrecken.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich

Bei natürlicher Belüftung sollten Räume verschiedener Kohorten nicht in einer Durchzugsachse positioniert werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Bewegungsflächen sollten zur einfacheren Reinigbarkeit und Desinfektion möglichst ohne Stützpfeiler und ohne Vor-/Rücksprünge gebaut werden.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Fluchtwege sollten für eine dauerhafte Nutzung ausgelegt sein, um als zusätzliche Erschließungswege in pandemischen Situationen zu fungieren.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Bauliche Maßnahmen der Basishygiene Fassade, Fenster und Türen	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Bodentiefe Fenster oder Doppelflügeltüren nach Außen und möglichst auf zwei Seiten des Klassenraumes sollten die Möglichkeit einer guten, natürlichen Durchlüftung bieten. Große Fensterflächen müssen beschattet werden. Die Personensicherheit muss in allen Geschossen gegeben sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Oberlichter zusätzlich zu Drehflügelfenstern sind besonders während Übergangszeiten geeignet, um gute Belüftung und Personenschutz möglichst lange Zeit im Jahr zu realisieren.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Programmierbare Fenster können Räume zwischen Nutzungszeiten hybride belüften.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: mäßig
Bauliche Maßnahmen der Basishygiene Verhaltenshinweise/Prozess	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Eine gute Aufklärung und Hinweise auf Verhaltenshinweisen durch Erklärungsposter und Hinweisschilder kann zu einer guten Infektionsprävention beitragen. (Farben an Schildern, Markierungen etc. können zur Wahrnehmung beitragen.)	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Toilettendeckel sollten während der Spülung geschlossen sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Bauliche Maßnahmen der Basishygiene Ausstattung	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Die Toilettenspülung und Waschbecken sollten automatisch oder kontaktlos funktionieren.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Flurteppiche sollten vermieden werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Lüftungstechnische Empfehlung der Basishygiene (Die Planungsparameter sollten von einer HLK-Fachkraft festgelegt werden.)	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Sanitäreanlagen sollten mechanisch belüftet werden, egal ob sie innen- oder außenliegend sind.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Die Einführung eines mechanischen Lüftungssystems sollte vor der natürlichen Lüftung in Betracht gezogen werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: mäßig

Ein bevorzugtes Luftverteilungssystem ist auch bei der mechanischen Lüftung wichtig. Die höchste Lüftungswirksamkeit kann durch Quellaufströmung erzielt werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Rezirkulationszonen, Kurzschlussströme usw. sollten für eine optimale Effizienz vermieden werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Filtertyp (Klasse G, Klasse F, HEPA, ULPA, Aktivkohle) und Filtermenge (Primär-, Sekundärfilter usw.) sollten entsprechend dem Verwendungszweck des belüfteten Raums festgelegt werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: mäßig
In jedem stark frequentierten Raum bzw. Aufenthaltsraum sollte eine visuelle Anzeige für die Raumluftqualität vorgesehen werden. Die Anzeigen müssen von den Raumnutzenden gut einsehbar sein. Festinstallierte Messgeräte sind mobilen vorzuziehen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Sensoren für Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, CO ₂ , PM usw. sollten kalibriert sein und die Umgebungsbedingungen genau an das Gebäudeautomationssystem (BAS) oder an die lokalen Steuerungen melden.	hoch	Neubau: gering Bestand: mäßig
Die Empfehlungen sollten überwacht werden und akustische Alarmer und visuelle Benachrichtigungen festgelegt werden, die auch digital an Kontrollinstanz übermittelt werden, sobald Grenzwerte überschritten werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 40% und 60% betragen. Eine digitale Überwachung sollte sichergestellt werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Es sollte einen Kaskadendruck von sauberen zu weniger sauberen Räumen geben.	niedrig, (mittel Krankenhaus)	Neubau: gering Bestand: groß
Wenn eine CO ₂ Konzentration von 1000 ppm nicht eingehalten werden kann, sollten tragbare Raumluftreiniger mit HEPA-Filtern erwogen werden. Dies sollte als letzte Option erwogen werden. Die Auswahl und Positionierung des Luftreinigers sollte von einer Fachkraft vorgenommen werden (VDI-EE 4300 Blatt 14), da die Luftfilter die Schadstoffverteilung verschlechtern können.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: mäßig
Ergänzende Lüftungstechnische Empfehlung in pandemischen / Ausbruchssituationen (Die Planungsparameter sollten von HLK-Fachkräften festgelegt werden.)		
Die Belüftung sollte durch Außenluft verstärkt werden. In stark verschmutzten Gebieten müssen die RLT Anlagen mit Außenluftfiltern versehen sein, um z.B. Feinstaub abzufiltern.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollte bis zu 100% Außenluft verwendet werden. Die Umluft muss je nach Erreger reduziert, ausgeschaltet oder gefiltert werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: mäßig

Wenn keine mechanischen Lüftungssysteme vorhanden sind, empfiehlt es sich, die Fenster aktiv zu nutzen, auch wenn dies zu thermischem Unbehagen und erhöhten Wärmeverlusten führt.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Offene Toilettenfenster sollten vermieden werden, wenn es eine mechanische Entlüftung gibt.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Wärmerückgewinnungssysteme in Lüftungsanlagen sollten überprüft werden, um sicherzustellen, dass Leckagen unter Kontrolle sind.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Die bedarfsgesteuerte Lüftung (Demand controlled ventilation-DCV) sollte deaktiviert werden, wenn eine geringe oder keine Raumnutzung vorliegt.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Von der Verwendung von Split-Systemen und Gebläsekonvektoren wird abgeraten.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Es könnten UV-Desinfektionssysteme in Räumen und/oder in RLT-Anlage verbaut werden, um Pathogene zu inaktivieren. Es gibt jedoch keine Standards für die Verwendung zur "Desinfektion" der Raumluft.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Vorhandene Entrauchungsanlagen (insbesondere maschinelle) sollten als Beitrag zur erforderlichen Lüftung berücksichtigt und umgesetzt werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Betriebliche Lüftungstechnische Empfehlung	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Der regelmäßiger Filterwechsel und die Wartungsarbeiten müssen mit den üblichen Schutzempfehlungen und gemäß der VDI 6022 durchgeführt werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Das Leistungsniveau des bestehenden HLK-Systems sollte regelmäßig überprüft werden, um festzustellen, ob die Auslegungsspezifikationen eingehalten werden.	hoch	Neubau: mäßig Bestand: mäßig
Testen, Einstellen und Abgleichen sind die drei wichtigsten Schritte, um den ordnungsgemäßen Betrieb von HLK-Systemen zu gewährleisten. Im Allgemeinen führt die HLK-Fachkraft Luft- und Hydronikmessungen an der HLK-Anlage durch und passt den Durchfluss nach Bedarf an, um eine optimale Leistung der gebäudebezogenen Ausrüstungssysteme zu erreichen (z.B. Energetische Inspektion & VDI 6022).	hoch	Neubau: mäßig Bestand: mäßig

Quelle: IKE

Tabelle 18
Empfehlungen Schule

Empfehlungen Schule		
Entwurfsprinzip Orientierung: Das Gebäude sollte von innen und außen übersichtlich gestaltet werden, sodass ungewollte Kontakte zu anderen Personen (-gruppen) und zu lange Laufwege durch einfachere Orientierung vermieden werden können.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollten Sichtfenster zu hochfrequentierten Räumen wie Klassenzimmer und zur Cafeteria verbaut werden.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Eine äußere Lesbarkeit der Raumanordnung sollte sichergestellt werden.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Zugänge zum Kohortenbereich sollten für Kinder einen hohen Wiedererkennungswert haben.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Die Grundrissstruktur sollte einfach gehalten werden und eine zentrale Magistrale sowie eine klare vertikale und gut sichtbare Erschließung bieten.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Entwurfsprinzip Erschließung: Das Gebäude sollte dezentral und ohne Staubildung erschlossen werden, sodass durch kontaktlose, kontinuierliche und benutzerspezifische Erschließungen der Kontakt bzw. die Kontaktzeit zu anderen Personen oder Kohorten möglichst gering ist.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Hochfrequentierte Funktionsbereiche wie die einzelnen Trakte von Jahrgangsstufen, die Trakte von Fachräumen, die Cafeteria, Bibliothek und Verwaltung sollten jeweils über separate innenliegende Zugänge oder eine gemeinsame außenliegende Zuwegung verfügen.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Die Breite von Bewegungsflächen sollte je nach Frequentierung angepasst sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Entwurfsprinzip Erschließung im Außenraum: Das Gebäude sollte Erschließungswege im Freien anbieten, sodass durch die offene Erschließung ein natürlicher Luftwechsel gegeben ist.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Freistehende Gebäude, insbesondere Pavillon- und Kammstrukturen, Gebäude mit Innenhof, und/oder Außentreppen, bei kompakteren Strukturen aber auch Laubengänge oder Terrassierung erleichtern eine dezentrale, außenliegende Erschließung.	mittel	Neubau: groß Bestand: nicht möglich

Entwurfsprinzip Kohortierbarkeit: Das Gebäude und bestimmte, kritische Räume sollten temporär voneinander abtrennbar sein. Autarke Gebäudeteile ermöglichen die Bildung von Kohorten. Innerhalb der Kohortenbereiche sowie zwischen den Kohortenbereichen und anderen Funktionsbereichen sollten kurze Wege geplant werden, sodass Wegstrecken nicht durch andere Kohortenbereiche abgekürzt werden.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollten getrennte Kohortenbereiche bestehend aus einzelnen Klassenräumen bzw. einem Jahrgangstrakt sowie jeweils dazugehörenden Sanitäranlagen und je nach pädagogischer Relevanz zusätzlichen Räumen geplant werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Die jeweiligen Kohortenbereiche sollten ohne lange Flure angeordnet sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Wichtige und jahrgangsübergreifende Einrichtungen wie die Cafeteria, Bibliothek, Sporthalle, Verwaltung und Lehrerzimmer sollten zentral angeordnet sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Das Abkürzen durch unterschiedliche Kohortenbereiche und Funktionsbereiche sollte verhindert werden, indem beispielsweise Pausenhöfe mit jahrgangsspezifischen Flächen wie Raucherbereich, Spielplatz, etc. unmittelbar neben den jeweiligen Kohortenbereichen angegliedert werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Schulhöfe sollten ausreichend groß und mit verschiedenen Zugängen konzipiert sein, sodass diese temporär in Kohortenbereiche unterteilt werden können.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Der Schulhof sollte leicht zu überblicken sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Das Lehrerzimmer sollte bei einem großen stufenspezifischen Lehrerkollegium entweder durch raumhoch abschließende Trennwände unterteilbar sein oder durch Ausweichräume ergänzt werden, in denen Teile des Kollegiums temporär umsiedeln können. Genügend Waschbecken sollten für die jeweils entstehenden Bereiche vorgehalten werden.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Es sollte ein ausreichend großer Raum für die Nachmittags- und Hausaufgabenbetreuung geplant werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering

Entwurfsprinzip Temporäre Flächen: Es sollten am Gebäude überdachte und gut zugängliche Außen- oder Innenflächen zum Errichten von temporären Räumen vorgehalten werden. Ausweichflächen können die Trennung von Kohorten erleichtern und bieten die Möglichkeit flexibler Reaktionen auf Ausbruchssituationen.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
<p>Es sollten Multifunktionsräume und -flächen, innenliegend und fassadenseitig mit einer mechanischen Entlüftung (bspw. Abluftventilator) oder außenliegend am Eingangsbereich bzw. an den Zugängen auf das Gelände geschaffen werden. Die außenliegenden Flächen sollten eben und trittfest sein sowie mit Stromversorgung bspw. für die Nutzung der Fläche als Teststation ausgestattet sein.</p>	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
<p>Jede Schule sollte eine Innenfläche wie die Sporthalle, Aula, etc. zur Umnutzung für temporäre Test- bzw. Behandlungsstationen oder für getrennten Unterricht und Klausuren definieren.</p>	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
<p>Im Außenraum sollten räumlich, akustisch sowie visuell voneinander getrennte und befestigte Flächen zur barrierefreien und temporären Nutzung vorgehalten werden. Diese können als Außenklassenzimmer eingerichtet oder als Freiluftcafeteria genutzt werden.</p>	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
<p>Es sollten ausreichend große Freiflächen pro Kohortenbereich vorgehalten werden, die auch bspw. durch Segeltücher beschattet werden können.</p>	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Entwurfsprinzip Belüftung: In allen Aufenthaltsbereichen sollte eine hohe Luftwechselrate möglich und überwachbar sein. Je höher die Luftwechselrate ist, desto geringer ist das Infektionsrisiko. Zudem wird einer Hitzebildung bei ausreichend mechanischer Belüftung und Aufmerksamkeitsdefiziten vorgebeugt.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
<p>Wenn möglich sollten Klassen-, Fach-, Pausen- & Gruppenräume, Flure, Lehrerzimmer, Aula, Cafeteria, Sanitäranlagen und die Nachmittagsbetreuung mechanisch belüftet werden.</p>	hoch	Neubau: mäßig Bestand: groß
<p>In einer pandemischen Situation sollte in den genannten Räumen eine CO₂-Konzentration von < 800 ppm bzw. Mindestlüftung > 54 m³/(Stunde.Person) und in einer normalen Situation eine CO₂-Konzentration von < 1000 ppm, Mindestlüftung > 36 m³/(Stunde.Person) bestehen.</p>	hoch	Abhängig von Umsetzungsart

CO2 Messgeräte sollten in allen (statt der Räume Gemeinschaftsräumen) Klassenräumen im Türbereich 1,1m hoch oder unter der Decke aufgestellt werden. In größeren Räumen sind mehrere Messgeräte sinnvoll. Die Displays müssen immer sichtbar sein. Bei Einsatz einer RLT-Anlage müssen die Daten zentral erfassbar sein. Fest installierte Sensoren sind mobilen vorzuziehen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Falls nur eine gemeinsame, innenliegende Erschließung aller Kohortenbereiche vorhanden ist, sollte diese verstärkt belüftet werden können. Korridore sollten generell mit Fenstern oder Oberlichtern bzw. einer RLT Anlage ausgestattet werden. Ist eine bauliche Kohortierung vorgesehen, so ist auch die Belüftung entsprechend vorzusehen, dass Querkontaminationen vermieden werden (Lüftungstechnische Kohortierung).	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Entwurfprinzip Nutzernahe Lagerflächen: Es sollten dezentrale Lagerflächen vorgehalten werden. Die Anordnung der dezentralen Lagerflächen verkürzt die Wege auf gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sodass das Risiko der Übertragung von Infektionen geringer wird.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Bedarfsgerechte Lagerflächen in Form von Regalen, Spints oder Vorräumen sollten pro Kohortenbereich vorgehalten werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
In Klassenzimmern sollten für alle Lehrkräfte zugängliche Schließfächer für Unterrichtsmaterialien zur Verfügung stehen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Entwurfprinzip dezentrale Sanitäranlagen: Es sollten dezentrale Sanitäranlagen vorgehalten werden. Kurze Laufwege auf den gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sowie ausreichend und voll ausgestattete Sanitäranlagen verringern das Infektionsrisiko und steigern die Compliance mit Händehygienerichtlinien.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Die Toilettenspülung sollte automatisch oder kontaktlos funktionieren.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Ausstattung und Infrastruktur:	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Klassenräume sollten mit einem Lehrkraftbereich mit 1,5-2m Abstand zu Schülern und Schülerinnen zониert werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollten Seifen- und Papierspender mit überwachbarem Füllstand verbaut werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Die Küche sollte entsprechend den Anforderungen der Lebensmittelhygiene gebaut werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering

Entwurfsprinzip Digitale Ausstattung: Es sollte durch eine geeignete digitale Infrastruktur die Aufteilung von Klassenverbänden und der (teil-)digitale Unterricht ermöglicht werden. Dadurch kann die Anzahl der Kontaktpersonen reduziert werden.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Klassen- und Multifunktionsräume sollten mit einem Mikrofon, einer Leinwand, einem Projektor bzw. einem Smartboard oder Webcam und einer ausreichend starken Internetverbindung für Streaming ausgestattet sein. Das Übertragen eines Streams sollte in andere Klassenräume und in das Homeschooling möglich sein. Ein LAN-Kabel Anschluss und eine Steckdose muss in der Nähe des Lehrerpults vorgehalten werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Ein Zugriff auf das Wlan und eine Stromversorgung sollten auch in Außenklassenzimmern verfügbar sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Ein Klassenraum sollte ein Mindestmaß an akustischer Qualität haben, sodass eine Lehrkraft sowohl guten Präsenz- als auch digitalen Unterricht abhalten kann.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering

Quelle: IKE

Tabelle 19
Empfehlungen Kindergärten

Empfehlungen Kindergärten		
Entwurfsprinzip Orientierung: Das Gebäude sollte von innen und außen übersichtlich gestaltet werden, sodass ungewollte Kontakte zu anderen Personen(-gruppen) und zu lange Laufwege durch einfachere Orientierung vermieden werden können.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Eine gute Übersicht in die einzelnen Funktionsbereiche sollte für die Betreuende gewährleistet sein. Kinder sollten dagegen eine gute Übersicht nur über ihren eigenen Kohortenbereich haben.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Zugänge zum Kohortenbereich sollten für Kinder einen hohen Wiedererkennungswert haben. Es sollte Farb- und Materialwechsel zwischen Gebäudeabschnitten und einzelnen Kohortenbereichen sowie eine Wegeführung durch das Gebäude mittels Farbe, Bebilderung oder Gegenständen zu einzelnen Kohorten und Funktionsbereichen geben.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Die Grundrissstruktur sollte einfach gehalten werden und eine zentrale Magistrale sowie eine klare vertikale und gut sichtbare Erschließung bieten.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Entwurfsprinzip Erschließung: Das Gebäude sollte dezentral und ohne Staubildung erschlossen werden, sodass durch kontaktlose und benutzerspezifische Erschließungen der Kontakt bzw. die Kontaktzeit zu anderen Personen oder Kohorten möglichst gering ist.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollte eine zentrale Erschließung auf das Gelände mit Schutzschleuse geben. Nach Möglichkeit sollte der Haupteingang bzw. Nebeneingänge von dem jeweiligen gruppenspezifischen Zugang zu überblicken sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Es sollte eine separate außen- und innenliegende Erschließung pro Kohortenbereich geben.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Vom Haupteingang sollten direkte, außenliegende Wege zu den jeweiligen gruppenspezifischen Zugängen zur Übergabe des Kindes angelegt sein. Die Zuwegung sollte einen festen Untergrund aufweisen.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Entwurfsprinzip Erschließung im Außenraum: Das Gebäude sollte Erschließungswege im Freien anbieten, sodass durch die offene Erschließung ein natürlicher Luftwechsel gegeben ist bzw. durch die Belüftung das Infektionsrisiko minimiert wird.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Eine Eingeschossigkeit des Gebäudes ist vorteilhaft.	niedrig	Neubau: groß Bestand: nicht möglich

Freistehende Gebäude, insbesondere Pavillon- und Kammstrukturen, Gebäude mit Innenhof, und/oder Außentreppen, bei kompakteren Strukturen aber auch Laubengänge oder Terrassierung erleichtern eine dezentrale, außenliegende Erschließung.	mittel	Neubau: groß Bestand: nicht möglich
Entwurfsprinzip Kohortierbarkeit: Das Gebäude und bestimmte, kritische Räume sollten temporär voneinander abtrennbar sein. Autarke Gebäudeteile ermöglichen die Bildung von Kohorten. Innerhalb der Kohortenbereiche sowie zwischen den Kohortenbereichen und anderen Funktionsbereichen sollten kurze Wege geplant werden, sodass Wegstrecken nicht durch andere Kohortenbereiche abgekürzt werden.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollten getrennte Kohortenbereiche bestehend aus einem Gruppenraum, einer Sanitäranlage, einer Garderobe und ggf. einer (Tee-)Küche geplant werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Die jeweiligen Kohortenbereiche sollte innerhalb eines Geschosses und ohne lange Flure angeordnet sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Eine räumliche Entzerrung der Übergabesituation sollte geplant werden, sodass bei Übergabe des Kindes und Ablage von Kleidungsstücken im Garderobenbereich Abstände eingehalten werden können.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Der Hof sollte leicht zu überblicken sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Entwurfsprinzip Temporäre Flächen: Es sollten am Gebäude überdachte und gut zugängliche Außen- oder Innenflächen zum Errichten von temporären Räumen vorgehalten werden. Ausweichflächen können die Trennung von Kohorten erleichtern und bieten die Möglichkeit flexibler Reaktionen auf Ausbruchssituationen.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollten Multifunktionsräume und -flächen, innenliegend und fassadenseitig mit einer mechanischen Entlüftung (bspw. Abluftventilator) oder außenliegend am Eingangsbereich bzw. an den Zugängen auf das Gelände geschaffen werden. Die außenliegenden Flächen sollten eben und trittfest sein sowie mit Stromversorgung bspw. für die Nutzung der Fläche als Teststation ausgestattet sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Es sollte ein Raum vorhanden sein, der zur temporären Umnutzung als Warteraum für potentiell infektiöse Kinder bis zur Abholung durch die Erziehungsberechtigten umgenutzt werden kann, sodass ein potentiell infektiöses Kind bis zur Abholung isoliert werden kann. Dieser Raum muss gut belüftet sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Gruppenräume sollten für eine flexible Nutzung dimensioniert werden, sodass Flächen für kohortenspezifisches Schlafen, Essen, regulären Betrieb und Bewegungsspiele vorhanden sind. Es wird Fläche für das Hinlegen auf den persönlichen Matratzen benötigt.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig

Es sollten ausreichend große Freiflächen pro Kohortenbereich vorgehalten werden, die auch bspw. durch Segeltücher beschattet werden können.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Entwurfsprinzip Belüftung: In allen Aufenthaltsbereichen sollte eine hohe Luftwechselrate möglich und überwachbar sein. Je höher die Luftwechselrate ist, desto geringer ist das Infektionsrisiko. Zudem wird bei einer ausreichend mechanischen Belüftung einer Hitzebildung vorgebeugt.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Wenn möglich sollten Multifunktions-, Gruppen-, Schlaf- und Essensräume, Sanitäranlagen und der temporäre Isolationsraum mechanisch belüftet werden.	hoch	Neubau: mäßig Bestand: groß
In einer pandemischen Situation sollte in den genannten Räumen eine CO ₂ -Konzentration von < 800 ppm bzw. Mindestlüftung > 54 m ³ /(Stunde.Person) und in einer normalen Situation eine CO ₂ -Konzentration von < 1000 ppm, Mindestlüftung > 36 m ³ /(Stunde.Person) bestehen.	hoch	Abhängig von Umsetzungsart
Es sollten CO ₂ Messgeräten in allen (statt der Räume Gemeinschaftsräumen) Multifunktions-, Gruppen-, Schlaf- und Essensräumen außer Reichweite der Kinder installiert werden. In größeren Räumen sind mehrere Messgeräte sinnvoll. Die Displays müssen immer sichtbar sein. Bei Einsatz einer RLT-Anlage müssen die Daten zentral erfassbar sein. Fest installierte Sensoren sind mobilen vorzuziehen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Falls nur eine gemeinsame, innenliegende Erschließung aller Kohortenbereiche vorhanden ist, sollte diese verstärkt belüftet werden können. Korridore sollten generell mit Fenstern oder Oberlichtern bzw. einer RLT Anlage ausgestattet werden. Ist eine bauliche Kohortierung vorgesehen, so ist auch die Belüftung entsprechend vorzusehen, dass Querkontaminationen vermieden werden (Lüftungstechnische Kohortierung).	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Aufenthalts- und Erschließungsräume, die für die Übergabe und als Garderobe genutzt werden, sollten ausreichend Fenster mit der Möglichkeit der großflächigen Öffnung zur regelmäßigen Lüftung haben. Oberlichter eignen sich besonders für die Vereinbarkeit von guter Durchlüftung und gleichzeitiger Personensicherheit.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Entwurfsprinzip Nutzernahe Lagerflächen: Es sollten dezentrale Lagerflächen vorgehalten werden. Die Anordnung der dezentralen Lagerflächen verkürzt die Wege auf gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sodass das Risiko der Übertragung von Infektionen geringer wird.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Versorgungsgegenstände wie z.B. Spielsachen und Bettzeug sollten kohortenspezifisch aufbewahrt werden können.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering

Für das persönliche Bettzeug und Matratzen werden im temporären Kohortenbetrieb im jeweiligen Gruppenraum Lagerflächen benötigt werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
In jedem Kohortenbereich muss es sowohl offene wie auch verschließbare Lagerflächen geben.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Entwurfsprinzip dezentrale Sanitäranlagen: Es sollten dezentrale Sanitäranlagen vorgehalten werden. Kurze Laufwege auf den gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sowie ausreichend und voll ausgestattete Sanitäranlagen verringern das Infektionsrisiko und steigern die Compliance mit Händehygienerichtlinien.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Pro Kohortenbereich sollte eine Sanitäranlage vorgehalten werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Für Personal und Kinder müssen getrennte Sanitäranlagen vorgehalten werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
In Abhängigkeit zur räumlichen Situation sollte ein Waschbecken mit Warmwasser bei Gruppenräumen angeordnet sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Zahnputzbecher und Handtücher sollten räumlich entzerrt aufbewahrt werden können, um eine Verwechslung untereinander zu vermeiden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Eine gemeinsame Dusche sollte zentral und gut erreichbar zwischen den einzelnen Kohortenbereichen liegen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Es muss ein Wickeltisch pro Kohortenbereich bei den Krippenkindern vorgehalten werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Ausstattung und Infrastruktur:	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Die Küche sollte entsprechend den Anforderungen der Lebensmittelhygiene gebaut werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Handschuhspender sollten in der unmittelbaren Nähe der Wickeltische bei den Krippenkindern platziert werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollten Ablageflächen in Gruppenräumen vorgehalten werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Sanitäranlagen sollten mit einem sichtbaren und nur für die pädagogischen Fachkräfte erreichbaren Desinfektionsmittelspender ausgestattet werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Für eine Grundreinigung im Zuge einer Ausbruchssituation sollten die Oberflächen von Böden und Mobiliar glatt und gut abwischbar sein, sodass eine Wischdesinfektion suffizient durchgeführt werden kann.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig

Quelle: IKE

Tabelle 20
Empfehlungen Alten- und Pflegeheime

Empfehlungen Alten- & Pflegeheime		
Entwurfsprinzip Orientierung: Das Gebäude sollte von innen und außen übersichtlich gestaltet werden, sodass ungewollte Kontakte zu anderen Personen(-gruppen) und zu lange Laufwege durch einfachere Orientierung und Identifikation vermieden werden können.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Zugänge zu Kohortenbereichen sollten einen hohen Wiedererkennungswert haben. Es sollte Farb- und Materialwechsel zwischen Gebäudeabschnitten und einzelnen Bewohnerzimmern sowie eine Wegeführung durch das Gebäude mittels Farbe, Bebilderung oder Gegenständen zu einzelnen Kohorten und Funktionsbereichen geben. Eine hierarchisierende Beleuchtung sollte Bewohner/innen ebenfalls in der Wegeführung anleiten.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollte ein zentraler Haupteingangskern geplant werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Ein zentraler, individuell gestalteter Aufenthaltsraum sollte pro Kohorte als Orientierungs- und Anlaufpunkt geplant werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Die Breite von Bewegungsflächen sollte je nach Frequentierung angepasst werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Orientierungspunkte sollten durch Fenster mit gerichtetem Bezug zum Außenraum in Bereichen besonders für dementiell veränderte Bewohner/innen gegeben werden. Dagegen sollten möglichst wenige Sichtbezüge durch verglaste Flächen in andere Bereiche im Innenraum geboten werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Entwurfsprinzip Erschließung: Das Gebäude sollte dezentral erschlossen werden, sodass durch kontaktlose und benutzerspezifische Erschließungen der Kontakt bzw. die Kontaktzeit zu anderen Personen oder Kohorten möglichst gering ist.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Jedes Gebäude des Pflegeheims sollte nur überwachte Zugänge aufweisen. Zusätzlich zu einem Haupteingang sollte die innenliegende, separate Erschließung für einzelne Wohnbereiche ermöglicht werden. Alle Zugänge sollten überwachbar sein. Es sollte nur einen zentralen Eingang auf das Gelände geben.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Die separate Erschließung pro Kohortenbereich sollte über einen Aufzug möglich sein.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Die Bewegungsmuster der Bewohnenden sollten mithilfe gut einsehbarer Erschließungskerne,	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich

programmatischen Anziehungspunkten und breiten Hauptachsen unterstützt werden.

Das zentrale Lager und der Gemeinschaftsraum/die Cafeteria der Pflegeeinrichtung sollte zentral erreichbar sein, ohne dass andere Funktionsbereiche und Kohorten durchkreuzt werden müssen. Der Besucherbereich sollte von außen oder direkt vom Haupteingang aus erreichbar und einsehbar sein. Kohorten sollten erreichbar sein ohne andere Kohorten durchkreuzen zu müssen.

niedrig

Neubau: gering
Bestand: nicht
möglich

Die Funktionsbereiche, welche allein die Mitarbeitenden betreffen, sollten einen innenliegenden Zugang und einen direkten Zugang in den Außenraum aufweisen. Die Zutrittsmöglichkeiten sollten durch Schlüssel/Transponder geregelt sein. Der Verwaltungstrakt sollte kompakt auf einer Etage mit zwei Zugängen, einen in den Bewohnendenbereich und einen in den Außenraum, angeordnet sein.

niedrig

Neubau: gering
Bestand: groß

Es sollte einen zentral erreichbaren Abschiedsraum mit unmittelbarem Zugang nach Außen geben.

niedrig

Neubau: gering
Bestand: groß

Übergeordnete Strukturen wie die Küche sollten zentral gelegen sein, um eine direkte Erschließung in alle Wohnbereiche zu ermöglichen, ohne weitere Funktionsbereiche durchqueren zu müssen.

niedrig

Neubau: gering
Bestand: nicht
möglich

Entwurfprinzip Erschließung im Außenraum: Das Gebäude sollte Erschließungswege im Freien anbieten, sodass durch die offene Erschließung ein natürlicher Luftwechsel gegeben ist

**Infektionspräventives
Potential**

**Aufwand in der
Umsetzung**

Freistehende Gebäude, insbesondere Pavillon- und Kammstrukturen, Gebäude mit Innenhof und/oder Außentreppen, bei kompakteren Strukturen aber auch Laubengänge oder Terrassierung erleichtern eine dezentrale, außenliegende Erschließung.

mittel

Neubau: groß
Bestand: nicht
möglich

Entwurfprinzip Kohortierbarkeit: Wohnbereiche und bestimmte, kritische Räume sollten temporär als autark funktionierende Kohorte abtrennbar sein. Zwischen Anlaufpunkten innerhalb des Wohnbereichs sowie zwischen Wohnbereich und häufig gemeinsam genutzten Räumen der gesamten Einrichtung sollten kurze Wege bestehen, sodass die Begegnungen von Personengruppen und die Kontaktzeit minimiert werden.

**Infektionspräventives
Potential**

**Aufwand in der
Umsetzung**

Es sollten getrennte Wohnbereiche bestehend aus allen Zimmern einer Wohngruppe, einem ausreichend großen Aufenthaltsraum und Speiseraum, einem Pflegestützpunkt und ggf. einem Mitarbeitendenpausenraum zum Sitzen mit 1,5m Abstand zueinander, Sanitäranlagen, einer (Tee-)Küche und Lagerräumen geplant werden. Die Größe eines Wohnbereichs sollte jeweils nach Kapazität des Pflegeteams gewählt werden. Sobald mehr als eine

mittel

Neubau: gering
Bestand: nicht
möglich

Wohngruppe infiziert ist, können diese funktional im Betrieb zusammengelegt werden.		
Die Bewohnerzimmer sollten als Einzelzimmer mit eigener Sanitäreinrichtung konfiguriert werden. Für Paare können Zimmer mit verschieb- bzw. herausnehmbaren Wänden oder einem Vorflur/ Vorraum mit Zugang zu den jeweiligen Einzelzimmern geplant werden.	hoch	Neubau: mäßig Bestand: groß
Die Zimmer müssen eine ausreichende Größe vorweisen, damit Pflegende Hilfsmittel wie z.B. Lifter uneingeschränkt nutzen können. Außerdem sollte ausreichend Bewegungsfreiheit und ausreichend Abstellflächen vorhanden sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Die jeweiligen Wohnbereiche sollten innerhalb eines Geschosses und ohne lange Flure angeordnet sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: nicht möglich
Die Tagespflege sollte wie ein Wohnbereich als eigenständige Funktionseinheit geplant werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Vom Pflegestützpunkt aus sollte der Zugang zum Wohnbereich einsehbar sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Pro Geschoss sollte ein gesonderter, nicht einsehbarer Pausenraum für Mitarbeitende geplant werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Umkleiden sollten unmittelbar am Personaleingang oder alternativ auf/vor den einzelnen Wohnbereichen angeordnet sein. Die Dimensionierung der Umkleiden sollte die Einhaltung der Mindestabstände ermöglichen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Entwurfsprinzip Temporäre Flächen: Es sollten am Gebäude überdachte und gut zugängliche Außen- oder Innenflächen zum Errichten von temporären Räumen vorgehalten werden. Ausweichflächen können die Trennung von Kohorten erleichtern und bieten die Möglichkeit flexibler Reaktionen auf Ausbruchssituationen.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollte im Akutfall die Möglichkeit zum Errichten einer temporären Schleuse mit Abwurfeimer, Handschuhspender, Desinfektionsmittelspender, Tütenspender, und Hocker und einer Fläche von ca. 2x2m zum An- und Ablegen der persönlichen Schutzausrüstung vor jedem Wohnbereich und am Personaleingang geben. Andernfalls kann der Vorbereich eines Bewohnendenzimmers dafür genutzt werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Es sollten Multifunktionsräume und -flächen innenliegend und fassadenseitig mit einer mechanischen Entlüftung (Bspw. Abluftventilator) oder außenliegend am Eingangsbereich bzw. an den Zugängen auf das Gelände geschaffen werden. Die außenliegenden Flächen sollten eben und trittfest sein sowie mit einer Stromversorgung bspw. für die Nutzung der Fläche als Teststation oder als temporärer Besucherbereich ausgestattet sein und mit einem Fahrzeug inkl. Wendemöglichkeit erreichbar sein.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig

Es sollten ausreichend große und barrierefreie Freiflächen pro Kohortenbereich vorgehalten werden, die auch bspw. durch Segeltücher beschattet werden können.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Entwurfsprinzip Belüftung: In allen Aufenthaltsbereichen sollte eine hohe Luftwechselrate möglich und überwachbar sein. Je höher die Luftwechselrate ist, desto geringer ist das Infektionsrisiko. Zudem wird einer Hitzebildung durch ausreichende mechanische Belüftung vorgebeugt.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Wenn möglich sollten Speise- & Aufenthaltsräume, Sanitäranlagen, Multifunktionsräume, Flure, Besucherräume, Umkleiden, Pflegestützpunkt und Pausenräume mechanisch belüftet werden.	hoch	Neubau: mäßig Bestand: groß
In einer pandemischen Situation sollte in den genannten Räumen eine CO ₂ -Konzentration von < 800 ppm bzw. Mindestlüftung > 54 m ³ /(Stunde.Person) und in einer normalen Situation eine CO ₂ -Konzentration von < 1000 ppm, Mindestlüftung > 36 m ³ /(Stunde.Person) bestehen.	hoch	Abhängig von Umsetzungsart
Es sollten festinstallierte CO ₂ Messgeräte in allen Gemeinschaftsräumen installiert werden. In größeren Räumen sind mehrere Messgeräte sinnvoll. Die Displays müssen immer sichtbar sein. Bei Einsatz einer RLT-Anlage müssen die Daten zentral erfassbar sein. Fest installierte Sensoren sind mobilen vorzuziehen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
In hochfrequentierten Räumen wie Eingangsbereich, Speiseräumen und Fluren sollte eine Querlüftung oder starke Durchlüftung durch fassadenseitige, großzügige Fensterflächen ermöglicht werden. Oberlichter eignen sich besonders für die Vereinbarkeit von guter Durchlüftung und gleichzeitiger Personensicherheit.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
In den Wohnbereichen ist eine Lüftungstechnische Lösung vorzusehen, die es verhindert, dass es zu Querkontaminationen zwischen Wohnräumen untereinander über den Flur kommt. Dafür sollte der Flur sehr gut be- und entlüftet werden und als Senke fungieren	hoch	Neubau: gering Bestand: groß
Entwurfsprinzip Nutzernahe Lagerflächen: Es sollten dezentrale Lagerflächen vorgehalten werden. Dezentrale Lagerflächen verkürzen die Wege auf gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sodass das Risiko der Übertragung von Infektionen geringer wird und die Compliance mit korrekten Arbeitsprozessen erleichtert wird.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Pro Wohnbereich sollte ein reiner und ein unreiner Lagerraum sowie mindestens ein Aufbereitungsraum für Steckbecken vorhanden sein. Es sollten einem isolierten Wohnbereich auch Lagerflächen zugeschaltet werden können, die eine Lagerung aller erforderlichen Mittel ermöglicht, ohne dass das zugewiesene Personal andere Funktionsbereiche betreten muss.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß

Es sollte eine geschlossene Lagerfläche mit Steckdosen für Gerätschaften und Hilfsmittel wie Lifter, Reinigungsmaschinen, Hebe- und Pflegemittelwagen vorgesehen werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Es sollten flexibel nutzbare Lagerflächen vorgesehen werden, in denen Desinfektionsmittel, PSA und Mobiliar aus Bereichen, die temporär nicht mehr genutzt werden sollen, gelagert werden kann.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Entwurfsprinzip dezentrale Sanitäranlagen: Es sollten dezentrale Sanitäranlagen vorgehalten werden. Kurze Laufwege auf den gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sowie ausreichend und voll ausgestattete Sanitäranlagen verringern das Infektionsrisiko und steigern die Compliance mit Händehygienerichtlinien.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Sanitäranlagen sollten getrennt für Bewohnende wie für Besuchende bei Gemeinschaftsräumen vorgehalten werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Für Personal und Bewohnende müssen pro Wohnbereich getrennte Sanitäreinrichtungen vorgehalten werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Sanitärzellen für Bewohnende sollten ausreichend dimensioniert werden, um einen reibungslosen Pflegebetrieb zu ermöglichen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
In unmittelbarer Nähe zu den Umkleiden sollten WC-Anlagen und Duschen für Mitarbeitende vorhanden sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Ausstattung und Infrastruktur:	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Eine Halterung für Desinfektionsmittelspender (DMS) sollte in jedem Bewohnendenzimmer sichtbar und gut erreichbar am Point of Care vorgehalten werden. Nach Bedarf ist die Desinfektionsmittelflasche anzubringen. In jedem Personalraum sollte ein festinstallierter DMS angebracht werden. In jedem reinen und unreinen Arbeitsraum muss ein DMS vorgehalten werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Küchenbereiche müssen den Anforderungen der Lebensmittelhygiene entsprechen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Ein unreiner Arbeitsraum sollte pro Wohnbereich mit geeigneter Ausstattung (z.B. Reinigungs-Desinfektionsgeräte (RDG)) zur suffizienten Aufbereitung von Pflegematerialien und -gegenständen vorgehalten werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: mäßig
An den Ausgängen der Umkleiden sollte es einen Abwurfimer für unreine Arbeitskleidung geben.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollten Seifen- und Papierspender mit überwachbarem Füllstand verbaut werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering

Entwurfsprinzip Digitale Ausstattung: Es sollte durch eine geeignete digitale Infrastruktur dezentrales Arbeiten und eine kontaktlose Kommunikation ermöglicht werden, um dadurch die Anzahl der Kontaktpersonen zu reduzieren.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Pflegemittel wie Lifter, usw. können über ein Trackingsystem verortet werden	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Die Pflegeeinrichtungen sollten die Möglichkeit der Nutzung einer Wlan-Verbindung haben. Außerdem sollten alle Arbeitsplätze der Pflegeeinrichtung mit LAN-Anschluss ausgestattet sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Ein digitaler Dokumentationsplatz sollte bei den Mitarbeitendenräumen vorhanden sein, besser noch einer pro Wohngruppen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Ein moderner Klingelruf bspw. auf die Smartwatch der Mitarbeitenden kann Laufwege und direkte Kontakte reduzieren.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
<u>Betriebshinweis</u>	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Am Eingang sollte es Hinweise zu Verhaltensweisen und zur Nutzung von Desinfektionsmittelspendern etc. geben.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Falls keine getrennten Mitarbeitendenpausenräume pro Wohnbereich einzurichten sind, sollte eine zeitlich getrennte Nutzung sichergestellt werden.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: mäßig

Quelle: IKE

Tabelle 21
Empfehlungen Arztpraxen

Empfehlungen Arztpraxen		
Entwurfsprinzip Orientierung: Das Gebäude sollte von innen und außen übersichtlich gestaltet werden, sodass ungewollte Kontakte zu anderen Personen (-gruppen) und zu lange Laufwege durch einfachere Orientierung vermieden werden können.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Die zentrale Anmeldung sollte den Eingang, die Wartezimmer (z.B. durch eine Glaswand) und die Zu- und Abgänge der Behandlungszimmer überblicken können und eine gute Übersichtlichkeit sollte durch direkte Sichtbezüge gegeben sein. Bei Glastüren innerhalb der Arztpraxis ist auf die Privatsphäre und den Datenschutz zu achten.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Die Wegführung sollte in Ärztezentren und MVZs klar gekennzeichnet werden (z.B. durch ein Farb(-leit)system, Infektionssprechstunde). Eine hierarchisierende Beleuchtung kann zur Orientierung und Wegführung beitragen.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Die Erschließungskerne sollten in Ärztezentren und MVZs klar einsehbar sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Durch Markierungen auf dem Boden im Anmeldebereich können Mindestabstände eingehalten werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Entwurfsprinzip Erschließung: Das Gebäude und Arztpraxen sollten dezentral erschlossen werden, sodass durch kontaktlose und benutzerspezifische Erschließungen der Kontakt bzw. die Kontaktzeit zu anderen Personen oder Kohorten möglichst gering ist.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Bei Ärztezentren und MVZs sollte es jeweils unterschiedliche Zugänge zum Wartebereich (Isolier-/ Infektionsbereich) für Patienten mit und ohne Infektionsverdacht geben. Bei zwei getrennten Erschließungen, sollte die Anmeldung zentral zwischen den beiden Eingängen liegen. (Ein zweiter Eingang inklusive Sanitäranlagen und weitere Arbeitsbereiche sind sinnvoll und hilfreich während einer Pandemie, diese müssten dann jedoch auch mit doppeltem Personal besetzt werden)	mittel	Neubau: gering Bestand: groß
Es sollte eine nutzerspezifische Erschließung der Behandlungszimmer getrennt für Mitarbeitende & Patienten geplant werden.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Die Bewegungsflächen vor der Anmeldung, im Treppenhaus, vor Aufzügen und dem Zugang zur Arztpraxis sollten ausreichend groß sein, um Wartenden und Vorbeigehenden genügend Platz mit einem Abstand von 1,5m zueinander zu garantieren.	mittel	Neubau: gering Bestand: nicht möglich

Entwurfsprinzip gleichwertige, kurze Wege: Die Arztpraxis sollte kurze Wege zwischen häufig genutzten Räumen und Flächen vorhalten, sodass die Begegnungen von Personen(-gruppen) und Kontaktzeit minimiert werden.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Wartebereich(e)/-zimmer, Anmeldung und Praxiszugang sollten nah beieinander angeordnet sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Erschließungen bspw. durch direkte Türen zwischen Behandlungszimmern, welche den Mitarbeitenden vorbehalten werden, ermöglichen kurze Wege und wenig Kontakt zu Patienten und Patientinnen.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Entwurfsprinzip Kohortierbarkeit: Bestimmte, kritische Räume sollten temporär als autark funktionierende Kohorte abtrennbar sein	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Falls keine zeitliche Staffelnung der Infektsprechstunde und der regulären Sprechstunde besteht, sollte wenn möglich ein getrenntes Wartezimmer für Patienten mit Infektionsverdacht vorgehalten werden. Im Erdgeschoss können bodentiefe Fenster eine temporäre dezentrale Erschließung ermöglichen.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Es sollte ausreichend Wartezimmer und Wartebereiche für Patient*innen geben. Die Wartezimmer sollten ausreichend groß dimensioniert werden, sodass der Abstand in pandemischen Zeiten zwischen Sitzplätzen 1,5m beträgt und Sitzgruppen vermieden werden. Bei nicht ausreichender Belüftung von Fluren sind Wartezimmer Wartebereichen vorzuziehen.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Eine kleinteilige und diverse Struktur von Arztpraxen ermöglicht eine bessere, flexible Kohortierung der Patient*innen. Es sollten Räume in unterschiedlichen Größen vorhanden sein, sodass für flexible Nutzungen wie z.B. Behandlungs- und Sprechzimmer, Labor, EKG, Isolierzimmer etc. unterschiedliche Räumlichkeiten zur Verfügung stehen. In akuten pandemischen Situationen und bei Impfkampagnen sollten Patient*innen direkt auf einzelne Zimmer aufgeteilt werden können.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich
Nach Möglichkeit sollte es mindestens ein Behandlungszimmer mehr als anwesende Ärzte und Ärztinnen geben, sodass während der Nutzung eines Behandlungszimmers das weitere (hygienisch) vor- oder nachbereitet werden kann oder die zusätzlichen Räumlichkeiten zur Kohortierung von Patienten und Patientinnen genutzt werden können.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: nicht möglich

Entwurfsprinzip Temporäre Flächen: Es sollten am Gebäude überdachte und gut zugängliche Außen- oder Innenflächen zum Errichten von temporären Räumen vorgehalten werden, um in pandemischen Situationen räumlich flexibel reagieren zu können.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollten Multifunktionsräume und -flächen am Eingangsbereich bzw. an den Zugängen auf das Gelände geschaffen werden. Die außenliegenden Flächen sollten eben und trittfest sein sowie mit Stromversorgung bspw. für die Nutzung der Fläche als Teststation ausgestattet sein.	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß
Falls Parkplatzflächen verfügbar sind, sollte das Szenario einer temporären Umnutzung einer Teilfläche als Teststation erwogen werden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: gering
Entwurfsprinzip Belüftung: In allen Aufenthaltsbereichen sollte eine hohe Luftwechselrate möglich und überwachbar sein. Je höher die Luftwechselrate ist, desto geringer ist das Infektionsrisiko. Zudem wird einer Hitzebildung durch ausreichende mechanische Belüftung vorgebeugt.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Wenn möglich sollten hochfrequentierte Räume wie Behandlungs- und Wartezimmer, Pausenraum, Sanitäranlagen sowie Flure mit Wartebereich mechanisch belüftet werden.	hoch	Neubau: mäßig Bestand: groß
In einer pandemischen Situation sollte in den genannten Räumen sowie generell in Infektbehandlungszimmern eine CO ₂ -Konzentration von < 800 ppm bzw. Mindestlüftung > 54 m ³ /(Stunde.Person) und in einer normalen Situation eine CO ₂ -Konzentration von < 1000 ppm, Mindestlüftung > 36 m ³ /(Stunde.Person) bestehen.	hoch	Abhängig von Umsetzungsart
Es sollten festinstallierte CO ₂ Messgeräte im Anmeldebereich, Pausenraum, Warte- und Behandlungszimmern installiert werden. In größeren Räumen sind mehrere Messgeräte sinnvoll. Die Displays müssen immer sichtbar sein. Bei Einsatz einer RLT-Anlage müssen die Daten zentral erfassbar sein. Fest installierte Sensoren sind mobilen vorzuziehen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
In hochfrequentierten Aufenthaltsräumen wie Pausenraum, Behandlungs- und Wartezimmer sollte wenn möglich eine Querlüftung ermöglicht bzw. großzügige Fensterflächen verbaut werden. Eckzimmer sind für die Belüftung vorteilhaft. Zusätzliche Oberlichter können zu einer verbesserten natürlichen Belüftung beitragen.	mittel	Neubau: mäßig Bestand: groß
Funktionsräume sollten innenliegend und Behandlungszimmer, Wartezimmer etc. außenliegenden angeordnet sein, damit diese mit großen Fensterflächen ausgebildet werden können.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig
Im Falle einer mechanischen Be-/ und Entlüftung sollten der Wartebereich und die Behandlungszimmer als Luftsenke ausgeführt werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: groß

Entwurfsprinzip Nutzernahe Lagerflächen: Es sollten dezentrale Lagerflächen vorgehalten werden. Dezentrale Lagerflächen verkürzen die Wege auf gemeinschaftlich genutzten Bewegungsflächen, sodass das Risiko der Übertragung von Infektionen geringer wird und die Compliance mit korrekten Arbeitsprozessen erleichtert wird.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Es sollte reine und unreine Lagerflächen geben, die nur für das Personal zugänglich sind.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Entwurfsprinzip dezentrale Sanitäranlagen: Es sollten dezentrale Sanitäranlagen vorgehalten werden. Kurze Laufwege zu den Sanitäranlagen sowie ausreichend und voll ausgestattete Sanitäranlagen verringern das Infektionsrisiko, steigern die Compliance mit Händehygienerichtlinien und können Kontaktinfektionen vermeiden.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Für Patient*innen und Personal müssen getrennte Sanitäranlagen vorgehalten werden.	mittel	Neubau: gering Bestand: gering
Es sollte nach Möglichkeit eine Durchreiche zwischen dem Labor und den Sanitäranlagen der Patient*innen geben, um Transportwege zu vermeiden.	niedrig	Neubau: gering Bestand: groß
Ausstattung und Infrastruktur:	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Reine und unreine Arbeitsplätze (z.B. für die Vorbereitung von Spritzen/Aufbereitung von Medizinprodukten) sollten voneinander getrennt geplant werden. Dazu kann bspw. ein Spritzschutz zw. Waschbecken und reinen Arbeitsplätzen installiert werden.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Händedesinfektionsmittelspender sollten jeweils maximal in Armlängenabstand an allen Arbeitsplätzen der Mitarbeitenden positioniert sein. Zusätzlich sollten sie auch in Sanitäranlagen und am Eingang unmittelbar einsehbar angebracht werden. Alternativ sollte es Kitteltaschenflaschen für Mitarbeitende geben.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
In jedem Behandlungszimmer, bei dessen Nutzung Sekrete entstehen, sollte ein Waschbecken möglichst ohne Überlauf vorhanden sein.	niedrig	Neubau: gering Bestand: mäßig
Das Labor sollte über ausreichend große und leicht zu reinigende sowie desinfizierbare Arbeits- und Lagerflächen verfügen.	hoch	Neubau: gering Bestand: gering
Für eine Grundreinigung sollten die Oberflächen von Böden und Mobiliar glatt und gut abwischbar sein, sodass eine Wischdesinfektion suffizient durchgeführt werden kann.	mittel	Neubau: gering Bestand: mäßig

Entwurfsprinzip Digitale Ausstattung: Es sollte durch eine geeignete digitale Infrastruktur kontaktreduziertes Arbeiten und eine kontaktlose Kommunikation ermöglicht werden, um dadurch die Anzahl der Kontaktpersonen zu reduzieren.	Infektionspräventives Potential	Aufwand in der Umsetzung
Pfleagemittel wie Lifter, usw. können über ein Trackingsystem verortet werden	niedrig	Neubau: mäßig Bestand: groß

Quelle: IKE

Der Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Risiko luftgetragener Infektionen

Kurzfassung Scoping Review Schulen

Ziel des Scoping Review Schulen war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation in Schulgebäuden bzw. Klassenräumen, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Interventionen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention in Schulen anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Hintergrund: In Schulen verbringen viele Individuen jeden Werktag mehrere Stunden zusammen, meist auf relativ engem Raum, sodass unter anderem luftgetragene Infektionserreger wie SARS-CoV-2 leicht übertragen werden können. Als Teil der kritischen Infrastruktur sind gute infektionspräventive Maßnahmen in Schulen deswegen essentiell, um das Infektionsrisiko, insbesondere luftgetragener Infektionen soweit wie möglich zu reduzieren. Eine adäquate Belüftung der Klassenräume kann die Konzentration von den luftgetragenen Infektionserregern reduzieren und somit zur Senkung des Infektionsrisikos in Schulen beitragen.

Methoden: Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect wurde im Zeitraum 09.07.2021 bis 06.05.2022 durchgeführt. Publikationen, welche bis einschließlich 30.04.2022 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Es wurde eine Kombination von folgenden Schlüsselwörtern (übersetzt ins Englische) verwendet: „Schule“, „Klassenzimmer“, „Kind“, „Schüler“, „Lüftung“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Luftfilterung“, „Innenraumluftqualität“, „Architektur“, „Gebäude“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Masern“, „Röteln“, „Respiratorisches Synzytial Virus“, „Infektion“, „Prävention“, „Luftübertragung“. Es wurden Interventions-, Beobachtungs-, und Modellierungsstudien mit den primären Endpunkten (luftgetragenes) Infektionsrisiko und CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für die Belüftungssituation bzw. das Infektionsrisiko eingeschlossen.

Ergebnisse: Wir haben 30 Studien identifiziert, die den Einschlusskriterien entsprachen, davon sechs Interventionsstudien, 16 Beobachtungsstudien mit zum Teil ergänzender Modellierung und acht Modellierungsstudien. Die Belüftungssituation in vielen Klassenräumen war nicht ausreichend, um eine gute Innenraumluftqualität zu garantieren. In vielen Studien wurden CO₂ Konzentrationen über den empfohlenen Grenzwerten (1000 ppm) gemessen. Eine Verbesserung der Belüftungssituation, vor allem durch mechanische Belüftung, aber auch durch natürliche Belüftung konnte die Innenraumluft CO₂ Konzentration senken. In einer Studie zeigten die Autoren, dass das SARS-CoV-2 Infektionsrisiko in Klassenräumen mit mechanischem Belüftungssystem um mindestens 74% geringer war als in natürlich belüfteten Klassenräumen. Verschiedene Umwelt- und Gebäude-assoziierte Faktoren (z. B. Temperaturdifferenz Innen/Außen, Windrichtung/-stärke, Größe und Orientierung von Fenstern, Raumgröße) beeinflussten die Effizienz der Lüftung und das Infektionsrisiko.

Schlussfolgerung: Die Belüftung ist eine wichtige Maßnahme um das Risiko luftgetragener Infektionen in Schulen zu senken, u.a. durch Reduktion der Zeit, die die Pathogene in den Klassenräumen vorhanden sind. Die Belüftungssituation der Klassenräume muss in vielen Schulen verbessert werden, um eine ausreichende Innenraumluftqualität zu gewährleisten. Wenn möglich sollten die Schulen mit einem mechanischen Belüftungssystem ausgestattet sein. Um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen bzw. um den Lüftungserfolg zu überprüfen, sollten die Schulräumlichkeiten mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein. Der Einfluss vom Umwelt- und Gebäude-assoziierten Faktoren sollte bei der Planung der Belüftung von Klassenräumen

berücksichtigt werden. Räume, die weder natürlich noch mechanisch belüftet werden können, sind nicht als Klassenräume geeignet.

Die Ergebnisse des Scoping Reviews zu den Schulen konnten aufgrund der großen wissenschaftlichen Relevanz des Forschungsthemas in einer interdisziplinären Publikation durch das SAVE Konsortium mit dem Titel „The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review“ im International Journal of Environmental Research and Public Health veröffentlicht werden (Jendrossek et al., 2023).

Kurzfassung Scoping Review Kindergärten

Das Ziel des Scoping Reviews Kindergärten war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation in Kindergärten, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Hintergrund: Kindergärten sind ein Teil der kritischen Infrastruktur. Sie gewährleisten einerseits die Betreuung der Kinder, damit die Eltern ihre Berufe ausüben können, andererseits sind es Orte, wo die Kinder soziale Interaktionen mit anderen Kindern und Erwachsenen üben und multiple Fähigkeiten, z. B. das Sprachverständnis, erlernen können. Die Infektionsprävention in Kindergärten stellt eine besondere Herausforderung dar, da enge Körperkontakte zwischen pädagogischen Fachkräften und Kindern, sowie den Kindern untereinander bestehen. Insbesondere jüngere Kinder können viele infektionspräventive Maßnahmen noch nicht verstehen und umsetzen. Dadurch können sich luftgetragene Infektionserreger wie SARS-CoV-2 leicht verbreiten.

Methoden: Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect wurde im Zeitraum 01.11.2022 bis 07.11.2022 durchgeführt. Publikationen, welche bis einschließlich 07.11.2022 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Relevante Studien wurden durch die Kombination von folgenden Schlüsselwörtern (übersetzt ins Englische) identifiziert: „Kindergarten“, „Kindertagesstätte“, „Kita“, „Kinderbetreuung“, „Vorschule“, „Luftübertragung“, „aerogene Infektion“, „Infektionsrisiko“, „Transmissionsrisiko“, „Aerosol“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Influenza“, „Masern“, „Respiratorisches Synzytial Virus“, „Lüftung“, „Raumluftqualität“, „Luftwechselrate“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“). Es wurden Interventions-, Beobachtungs- und Modellierungsstudien mit den primären Endpunkten (luftgetragenes) Infektionsrisiko und CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für die Belüftungssituation bzw. das Infektionsrisiko eingeschlossen.

Ergebnisse: Es konnten zehn Studien identifiziert werden, die den Einschlusskriterien entsprachen, davon zwei Interventionsstudien und acht Beobachtungsstudien mit zum Teil ergänzender mathematischer Modellierung. In vielen der untersuchten Kindergärten war die Belüftungssituation ohne spezifische Lüftungsstrategien nicht ausreichend, um eine gute Innenraumlufte zu gewährleisten (CO₂ Konzentrationen >1000 ppm). Durch Verbesserung der Belüftungssituation (mechanisch oder natürlich) konnte die CO₂ Konzentration in Innenräumen gesenkt werden, trotzdem wurden zum Teil CO₂ Konzentrationen >1000 ppm gemessen.

Schlussfolgerung: Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko von luftgetragenen Infektionen zu reduzieren. Kindergärten sollten deshalb mit einem gut funktionierenden mechanischen oder natürlichen Lüftungssystem ausgestattet sein, wodurch dauerhaft CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm gewährleistet werden können, um luftgetragene Infektionen im Rahmen des Kindergartenalltages weitgehend zu vermeiden. Dazu sollten die Gruppenräume mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu kontrollieren. Die Kombination verschiedener infektionspräventiver Maßnahmen, sowie die Optimierung von Gebäude-assoziierten Faktoren unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen ist nötig, um ein sicheres Umfeld für Kinder und Personal von Kindergärten zu gewährleisten.

Kurzfassung Scoping Review Pflege-/Altenheime

Das Ziel des Scoping Reviews Pflegeheime war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation und die bebaute Umwelt in Pflegeheimen, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention luftgetragener Infektionen bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Hintergrund: Pflegeheime waren vor allem in den ersten Wellen der SARS-CoV-2 Pandemie von vielen positiven Fällen und Ausbrüchen betroffen. Diese gingen mit einer hohen Morbidität und Mortalität einher. Gute infektionspräventive Maßnahmen sind notwendig, um die oft vulnerablen Bewohner und Bewohnerinnen sowie das Personal vor der Infektion durch luftgetragene Pathogene zu schützen. Die Infektionsprävention in Pflegeheimen stellt eine besondere Herausforderung dar, da ein gleichzeitiges Wohnen und Pflegen stattfindet und viele enge physische Kontakte der Personen untereinander innerhalb der Räumlichkeiten bestehen.

Methoden: Das Review von Benbow (Benbow, 2022), in welchem die Fragestellung nach dem Einfluss von baulichen Faktoren und technischen Kontrollen zur Infektionsprävention von Krankheiten wie COVID-19 in Langzeitpflegeeinrichtungen untersucht wurde, wurde als Grundlage für unser Scoping Review herangezogen und zusammengefasst. Darauf basierend wurde eine Literaturrecherche im Zeitraum 06.01.2023-13.01.2023 durchgeführt, um Studien zu identifizieren, die nach der Publikation des Reviews von Benbow erschienen sind. Hierzu erfolgte eine Kombination der Schlüsselwörter (übersetzt ins Englische): „Pflegeheim“, „Altenheim“, „Langzeitpflegeeinrichtung“, „SARS-CoV-2“, „COVID-19“, „Influenza“, „luftübertragen“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Transmission“, „Lüftung“, „Luftqualität“, „Luftwechselrate“.

Ergebnisse: Durch Benbow wurde eine Pyramide der technischen Kontrollen zur Infektionsprävention in Langzeitpflegeeinrichtungen erstellt. Hierbei wurden Studienergebnisse zu den infektionspräventiven Maßnahmen in Bezug auf Lüftung, räumliche Trennung, physikalische Barrieren, Händehygiene, Bewohnerzimmerzonierung und Bereitstellung von Einzelzimmern zusammengefasst. Durch unsere Literaturrecherche konnten vier weitere Beobachtungsstudien identifiziert werden, die den Einschlusskriterien entsprachen. Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der Studien eine nicht ausreichende Belüftungssituation in Pflegeheimen, was in manchen Fällen zu der Verbreitung von SARS-CoV-2 in den Einrichtungen beitrug. Die Lüftung ist essentiell, um die Verbreitung von Aerosolen bzw. luftgetragenen Krankheitserregern innerhalb einer Einrichtung zu reduzieren, verschiedene Räume sollten möglichst individuell belüftet werden. Ein häufiges Problem in vielen Einrichtungen mit SARS-CoV-2 Ausbrüchen waren überfüllte Räume - räumliche Trennungen und physisches Abstandhalten sollten deshalb etabliert werden und hierzu Gruppengrößen bei Gemeinschaftsaktivitäten reduziert werden bzw. die Räumlichkeiten ausreichend groß konzipiert werden. In Pflegeheimen, in denen die Bewohner und Bewohnerinnen zu einem größeren Anteil in Einzelzimmern untergebracht waren, war das Transmissionsrisiko von SARS-CoV-2 geringer.

Die gebaute Umwelt kann das Auftreten von SARS-CoV-2 Fällen bzw. Ausbruchsgeschehen und die Ausbruchsschwere in Pflegeheimen beeinflussen. Im Gegensatz zu den Personen abhängigen Faktoren wie das Alter oder Vorerkrankungen, können Faktoren der gebauten Umwelt, z.B. in Bezug auf Konstruktionsdesign und Lüftung, sowie strukturelle bzw. organisatorische Aspekte, leichter geplant werden und im Rahmen von infektionspräventiven Strategien genutzt werden.

Schlussfolgerung: Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko von luftgetragenen Infektionen zu reduzieren. Pflegeheime, insbesondere Gemeinschaftsräume, sollten deswegen mit einem gut funktionierenden mechanischen oder natürlichen Lüftungssystem ausgestattet sein. Zur Anzeige einer Lüftungsnotwendigkeit bzw. zur Überprüfung des Lüftungserfolges, sollten die Gemeinschaftsräume mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein. Bei der Implementierung von infektionspräventiven Schutzmaßnahmen ist es darüber hinaus essentiell, bauliche und strukturelle Faktoren beim Infektionsschutz zu berücksichtigen. Bewohner und Bewohnerinnenzimmer sollten möglichst als Einzelzimmer konzipiert werden und größere Pflegeheime sollten in kleinen Einheiten, möglichst mit eigenen Gemeinschaftsräumen und Personalzuordnung strukturiert sein. So können einzelne Kohorten isoliert werden und das Risiko einer Verbreitung innerhalb der Einrichtung wird reduziert. Infektionspräventive Maßnahmen sollten zum Schutz der oft vulnerablen Bewohner und Bewohnerinnen unabhängig von einer bestehenden Pandemie etabliert werden.

Scoping Review Arztpraxen

Das Ziel des Scoping Reviews Arztpraxen war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention luftgetragener Infektionen bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration in Arztpraxen anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Hintergrund: Arztpraxen tragen zur Sicherstellung der ambulanten medizinischen Versorgung der Bevölkerung bei. Die SARS-CoV-2 Pandemie zeigte, dass zum Schutz möglicher Erregerübertragungen zwischen Patienten und Patientinnen untereinander oder Patienten und Patientinnen und Personal infektionspräventive Maßnahmen zunehmend essentiell sind. Da viele Praxen nicht auf die Herausforderungen durch die Pandemie vorbereitet waren, sind die Implementierung von organisatorischen und räumlichen Maßnahmen nötig, um eine Weiterverbreitung von Infektionen innerhalb der Arztpraxen bestmöglich zu verhindern.

Methoden: Eine systematische Literaturrecherche wurde in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect am 10.02.2023 durchgeführt. Publikationen welche bis einschließlich 10.02.2023 veröffentlicht wurden, wurden eingeschlossen. Um relevante Studien zu identifizieren, wurde die Recherche durch die Kombination der folgenden Schlüsselwörter (übersetzt ins Englische) durchgeführt: „Arztpraxis“, „Hausarztpraxis“, „Allgemeinarztpraxis“, „Wartezimmer“, „Lüftung“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Innenraumluftqualität“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Masern“, „Influenza“, „Luftübertragung“. Es wurden Interventions-, Beobachtungs- und Modellierungsstudien mit den primären Endpunkten (luftgetragenes) Infektionsrisiko und CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für die Belüftungssituation bzw. das Infektionsrisiko berücksichtigt.

Ergebnisse: Es wurden vier Beobachtungsstudien identifiziert, die den Einschlusskriterien entsprachen. In einer Studie wurden unter anderem in zwei Arztpraxen Messungen der CO₂ Konzentration durchgeführt. Hier zeigte sich eine nicht ausreichende Belüftungssituation der Räumlichkeiten. In zwei Studien wurden Ausbrüche mit dem Masernvirus in Kinderarztpraxen untersucht. Bei beiden Ausbrüchen wurde eine Transmission des Virus über infektiöse Aerosole vermutet, die sich innerhalb der Praxen verteilen und über längere Zeit bestehen blieben.

Schlussfolgerung: Die Belüftungssituation in Arztpraxen ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht ausreichend in Feldstudien untersucht. Praxen sollten im Pandemiefall ein Bündel an infektionspräventiven Maßnahmen wie Lüftung, räumliche und zeitliche Kohortierung von Patienten und Patientinnen, Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung, Aufklärung bzw. Schulung von Patientinnen und Beschäftigte etc. umsetzen und die Maßnahmen in Hygiene-/ Pandemieplänen festhalten. Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko von luftgetragenen Infektionen zu reduzieren. Warte- und Sprechzimmer sollten mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu überprüfen. Infektionspräventive Maßnahmen in Form von Basis-/Standardhygienemaßnahmen sollten zum Schutz von Patienten und Patientinnen und Personal unabhängig von einer bestehenden Pandemie etabliert werden.

Ergebnisse der Lüftungstechnischen Untersuchungen

Im Rahmen des Projekts wurde das Wells-Riley-Modell verwendet, um die Auswirkungen verschiedener Faktoren auf das Übertragungsrisiko von Infektionskrankheiten in unterschiedlichen Räumlichkeiten zu verstehen. Dieses Modell half bei der Ermittlung der kritischen Faktoren, die zur Ausbreitung von über die Luft übertragenen Krankheitserregern beitragen, wie z. B. die Belegung, die Belüftungsrate und die Anfälligkeit von Personen. Darüber hinaus wurden CFD-Simulationen durchgeführt, um die Schadstoffverteilung in verschiedenen Layouts von natürlich belüfteten Klassenräumen zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigten unterschiedliche Resultate, was darauf hindeutet, dass eine Einheitslösung für die Infektionsprävention nicht möglich ist. In diesem Zusammenhang wurden durch einen interdisziplinären Ansatz mehrere Empfehlungen für verschiedene Gebäudetypen im Detail aufgeführt. Das Bewertungsinstrument soll Bauherren und Planenden helfen, die wichtigsten Parameter der Infektionsprävention zu verstehen.

In Zukunft sind neue Lösungen mit ganzheitlicher Betrachtung gefragt, die von den Disziplinen gestaltet werden sollten. Das Potenzial verschiedener Lösungen wie Luftschleier, Luftreiniger und UVGI-Systeme sollte gründlich untersucht werden, um ihre Wirksamkeit bei der Eindämmung der Ausbreitung von über die Luft übertragenen Krankheitserregern zu bewerten. Darüber hinaus wird die Überwachung der Luftqualität in Zukunft eine entscheidende Rolle spielen. Zu diesem Zweck wurde die CO₂-Überwachung als wirtschaftliche und leicht zu implementierende Option empfohlen.

Auch die Belüftung ist ein wesentlicher Aspekt bei der Schaffung gesunder Gebäude. Eine gute Innenraumluftqualität sollte für Konzepte zum Wohlbefinden und nicht nur zur Infektionsprävention berücksichtigt werden. Angemessene Belüftung und Innenraumluftqualität verringern nicht nur das Infektionsrisiko, sondern schaffen auch eine gesunde Gemeinschaft. Studien haben gezeigt, dass eine gute Innenraumluftqualität die Produktivität steigert, die Fälle von Sick-Building-Syndrom (SBS) reduziert, die kognitiven Funktionen verbessert und die Fehlzeiten verringert (Seppänen 2002, Passarelli 2009). Daher sind weitere Studien erforderlich, um die Auswirkungen von Belüftung und Innenraumluftqualität auf Gesundheit und Wohlbefinden vollständig zu verstehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt gezeigt hat, wie wichtig ganzheitliche Überlegungen zur Infektionsprävention sind und dass interdisziplinäre Lösungen erforderlich sind. Das Wells-Riley-Modell und die CFD-Simulationen haben Einblicke in das Übertragungsrisiko luftgetragener Krankheitserreger geliefert, die bei der Entwicklung wirksamer Strategien zur Infektionsprävention von Nutzen sein werden. Darüber hinaus sollte das Potenzial verschiedener Lösungen wie Luftschleier, Luftreiniger und UVGI-Systeme weiter erforscht werden, um ihre Wirksamkeit zu bewerten. Schließlich sollten eine gute Innenraumluftqualität und eine gute Belüftung auch für Konzepte des Wohlbefindens über die Infektionsprävention hinaus in Betracht gezogen werden.

Bauliche Empfehlungen Schulen	→ Seite 68
Bauliche Empfehlungen Kindergärten	→ Seite 73
Bauliche Empfehlungen Alten- und Pflegeheimen	→ Seite 77
Bauliche Empfehlungen Arztpraxen	→ Seite 83
Ergebnisse des Systemic Reviews baulicher Interventionen	→ Seite 87

Reinbarkeitsempfehlungen zur Materialwahl

Die Bewertung der untersuchten Materialien erfolgt über die berechnete Restpartikelmenge. Mit dem Ansatz nach (Dreßler, 2018) wird die Restpartikelmenge mittels Gleichung (1) aus der gemessenen freien Oberflächenenergie γ_s und der Rauheit R_a bestimmt. Zur Bewertung der unterschiedlichen Materialien wird die Veränderung der Restpartikelmengen herangezogen. Dazu erfolgt die Bestimmung der Restpartikelmenge nach den unterschiedlichen künstlichen Alterungsprozessen. Anschließend werden die Restpartikelmengen vor und nach der Behandlung miteinander verglichen. Ist die Restpartikelmenge nach der Behandlung gegenüber dem Ausgangszustand geringer als 100%, so ist davon auszugehen, dass sich an diesen Oberflächen eine geringere Partikelmenge nach der Alterung ansammeln kann. Ein Wert über 100% zeigt hingegen an, dass sich nach der künstlichen Alterung eine höhere Anzahl an Restpartikel auf der Materialoberfläche ansammeln kann. Allerdings stößt der Ansatz nach (Dreßler, 2018) bei Materialoberflächen mit einer sehr hohen freien Oberflächenenergie und Rauheit mathematisch an seinen Grenzen. So kann es vorkommen, dass bei einer Oberflächenenergie > 80 [N/mm] und einer Rauheit > 5 [μm] die Restpartikelmenge einen Wert < 1 annimmt. Diese Restpartikelmengen < 1 werden aus Plausibilitätsgründen bei der Berechnung nicht berücksichtigt und wird mit k. A. angegeben. Die Bewertungsschema mit den entsprechenden Farben ist in erläutert.

Tabelle 22
Bewertungsschema der Restpartikelmenge nach der künstlichen Alterung

Bewertungsschema		
Restpartikelmenge nach der künstlichen Alterung	Erläuterung	Farbe
< 100%	Verringerung der Restpartikelmenge	
100% - 150%	Geringe Erhöhung der Restpartikelmenge	
151% - 200%	Mäßige Erhöhung der Restpartikelmenge	
> 200%	Starke Erhöhung der Restpartikelmenge	
k. A.	Keine Angaben	

Quelle: IBMB

Künstliche chemische Alterung

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen und der freien Oberflächenenergie befinden sich im Anhang in Tabelle 35 und Tabelle 37. Mit den Daten dieser zwei Oberflächeneigenschaften wurde die Restpartikelmenge für drei Größenkanäle berechnet, siehe Tabelle 36. Die Restpartikelmenge der Probe nach zwei und vier Wochen chemischen künstlichen Alterung gegenüber dem Ausgangszustand ist in den Tabellen 23 und 24 zusammengefasst.

Tabelle 23

Differenz der Restpartikelmenge nach zwei und vier Wochen, bezogen auf den Ausgangszustand der künstlichen Alterung mit Incidin Pro.

Probennummer	Restpartikelmenge nach 2 Wochen			Restpartikelmenge nach 4 Wochen		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	31,36%	61,62%	85,85%	22,55%	223,22%	618,73%
B2	149,43%	233,42%	281,86%	145,40%	349,13%	500,41%
B3	13,47%	388,65%	1830,70%	32,59%	285,85%	769,36%
B4	50,44%	65,67%	76,85%	72,66%	183,81%	285,33%
B5	4,52%	36,54%	91,32%	1,61%	12,13%	30,34%
B6	1002,40%	53,81%	20,13%	1483,33%	74,92%	28,71%
B7	0,04%	38,12%	730,25%	0,84%	23,24%	110,38%
B8	152,92%	166,32%	165,13%	36,89%	62,92%	82,45%
B9	13,49%	56,47%	108,18%	24,90%	129,62%	254,28%
B20	1,48%	65,29%	320,45%	0,01%	112,62%	4536,12%
B21	39,45%	271,86%	616,14%	13,18%	199,99%	677,04%
B22	3,89%	24,77%	56,72%	12,40%	38,84%	64,77%
B23	32,09%	38,68%	43,62%	87,91%	65,77%	56,44%
B24	146,12%	120,47%	109,81%	36,81%	32,89%	32,97%
B25	k. A.	k. A.	k. A.	45,11%	232,28%	461,11%
W1	k. A.	k. A.	k. A.	5,11%	97,04%	326,34%
W2	k. A.	k. A.	k. A.	10,72%	148,31%	371,75%
ST1	k. A.	k. A.	80,74%	k. A.	k. A.	5,17%
ST2	5755,68%	44,90%	4,43%	2624,76%	12,38%	1,02%
ST3	16131,38%	166,89%	26,79%	220929,99%	183,04%	10,54%
ST4	k. A.	1974,50%	1,23%	k. A.	8247,14%	3,27%
ST5	k. A.	104,47%	0,24%	k. A.	121,77%	0,26%
ST6	40190,17%	36,20%	1,54%	41302,57%	32,38%	1,30%
ST7	194,23%	29,65%	11,33%	260,90%	24,20%	7,25%
ST8	6,09%	17,61%	23,83%	4,80%	15,13%	21,01%

Dargestellt in Prozent.

Quelle: IBMB

Tabelle 24

Differenz der Restpartikelmenge nach zwei und vier Wochen bezogen auf den Ausgangszustand der künstlichen Alterung mit Incidin Active in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent.

Probennummer	Restpartikelmenge nach 2 Wochen			Restpartikelmenge nach 4 Wochen		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	60,54%	239,26%	465,56%	118,53%	296,76%	445,58%
B2	126,56%	115,99%	110,96%	608,37%	315,78%	227,48%
B3	65,04%	190,57%	313,08%	69,16%	228,36%	392,20%
B4	56,07%	97,46%	133,76%	61,13%	142,80%	227,61%
B5	2,01%	11,68%	26,07%	0,49%	5,74%	17,84%
B6	621,27%	8,23%	1,32%	223,22%	5,33%	1,16%
B7	7,84%	29,49%	54,95%	2,12%	6,57%	11,81%
B8	86,65%	66,87%	61,92%	72,93%	65,11%	64,32%
B9	25,17%	73,92%	119,05%	8,10%	59,31%	144,33%
B20	104,60%	140,66%	156,64%	27,46%	74,24%	113,98%
B21	180,79%	283,78%	336,04%	14,22%	242,43%	833,60%
B22	17,19%	36,48%	52,02%	0,00%	7,24%	729,19%
B23	76,50%	55,83%	47,06%	79,20%	65,38%	59,01%
B24	1359,66%	239,40%	110,31%	13,84%	68,18%	141,19%
B25	k. A.	k. A.	k. A.	80,83%	139,03%	175,63%
W1	k. A.	k. A.	k. A.	0,61%	10,33%	36,95%
W2	k. A.	k. A.	k. A.	20,69%	74,97%	121,89%
ST1	k. A.	k. A.	301,12%	k. A.	k. A.	4,23%
ST2	85,87%	62,25%	48,67%	1316,90%	21,94%	3,30%
ST3	176,43%	62,40%	45,44%	7322,37%	71,18%	12,04%
ST4	79,80%	232,97%	54,34%	k. A.	302,03%	39,21%
ST5	k. A.	198,37%	14,27%	k. A.	109,55%	1,08%
ST6	49,23%	72,04%	76,95%	184,30%	65,85%	37,01%
ST7	1336,03%	950,53%	1118,67%	18,15%	208,88%	609,22%
ST8	62680,91%	5425,92%	2711,28%	134398,63%	8881,03%	4121,92%

Quelle: IBMB

In der Gruppe der Linoleum-Bodenbeläge [B2, B20, B21, B25] zeigen die Proben eine zwei- bis achtfache Steigerung der Restpartikelmenge nach einer Behandlungszeit von vier Wochen. Die Zunahme ist nach der zweiten Woche schon zu erkennen, jedoch gibt es einen deutlichen Anstieg bis zur vierten Woche. Insbesondere wurden in den Größenkanälen 1,0 < d ≤ 3,0 µm eine starke Erhöhung der Restpartikelmenge festgestellt. Generell ist festzuhalten, dass Linoleum empfindlich gegenüber hohen

Desinfektionsmittelkonzentrationen ist, insbesondere im Vergleich zu dem alkalischen Desinfektionsmittel (Incidin Pro).

In der Gruppe der PVC-Bodenbeläge [B1, B3, B4, B5, B6, B7, B22, B23, B24] unterscheiden sich die Proben aufgrund von den Oberflächenvergütungen stark voneinander. Die Gemeinsamkeit aller PVC-Beläge ist, dass unabhängig von dem Desinfektionsmittel, nach vier Wochen eine höhere Veränderung sichtbar ist als nach 2 Wochen.

Die beiden Kautschuk Bodenbeläge B8 und B9 haben nach der Behandlung mit beiden Desinfektionsmitteln eine relativ geringe Veränderung im Vergleich zu den anderen polymerbasierten Bodenbelägen. Dies entspricht auch der Erwartung, dass Kautschukmaterialien eine gute Beständigkeit gegen Säuren und Laugen aufweisen (Wille, 2012)[Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben..](#)

In der Gruppe der Steinzeuge und Fliesen ist die Veränderung der Restpartikelmenge in einer höheren Größenordnung als in den anderen Gruppen. Insbesondere im Größenkanal von 0,3 bis 0,5 μm lässt sich mit fortschreitender Zeit eine starke Veränderung der Restpartikelmenge feststellen. Bei den Proben ST7 und ST8 wurde nach der Behandlung mit dem Desinfektionsmittel (Incidin Active) eine sehr starke Erhöhung der Oberflächenenergie festgestellt. Diese Erhöhung gegenüber dem Ausgangszustand ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die hydrophobierende Schicht der Steinzeuge/Fliesen nach den chemischen Behandlungen ihre Wirkung verliert, wodurch die Oberflächenenergie zunimmt. Die Erhöhung der Oberflächenenergie bei gleichbleibender Rauheit führt bei den Proben zu einer starken Veränderung der Restpartikelmenge.

Künstliche physikalische Alterung

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen und der freien Oberflächenenergie nach der künstlichen physikalischen Alterung mit UV-Licht im Bewitterungsschrank befinden sich im Anhang in 39. Mit den Daten dieser zwei Oberflächeneigenschaften wurde die Restpartikelmenge für drei Größenkanäle berechnet, siehe Tabelle 40. Die Restpartikelmenge der Probe nach der physikalischen künstlichen Alterung nach 28 Tagen gegenüber dem Ausgangszustand ist in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25

Physikalische künstliche Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 28 Tagen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent.

Probennummer	Restpartikelmenge nach physikalischer Alterung		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	13,80%	46,62%	89,87%
B2	70,17%	201,01%	332,36%
B3	28,12%	108,96%	220,72%
B4	74,51%	182,63%	319,34%
B5	0,36%	6,07%	22,32%
B6	875,99%	45,58%	16,46%
B7	0,92%	44,41%	239,09%
B8	45,33%	42,56%	44,64%
B9	5,84%	32,89%	75,90%
B20	7,58%	39,09%	81,68%
B21	70,65%	125,38%	162,36%
B22	0,06%	23,75%	288,80%
B23	99,24%	145,18%	178,35%
B24	0,25%	86,99%	1156,36%
B25	17,35%	50,46%	85,31%
W1	0,84%	15,32%	55,97%
W2	0,01%	0,15%	0,67%
ST1	k. A.	k. A.	3,94%
ST2	30,38%	77,60%	106,98%
ST3	0,33%	31,98%	204,52%
ST4	k. A.	555,47%	23,01%
ST5	k. A.	185,26%	5,69%
ST6	199,17%	77,00%	48,67%
ST7	163,93%	262,06%	364,32%
ST8	17929,75%	2706,76%	1605,38%

Quelle: IBMB

In der Gruppe der Linoleum-Bodenbeläge [B2, B20, B21, B25] zeigen die Proben B2 und B21 die größte Erhöhung der Restpartikelmenge, mit bis zu 300%. In der Gruppe der PVC-Bodenbeläge [B1, B3, B4, B5, B6, B7, B22, B23, B24], stechen die Proben B3, B4, B7, B22, B23 und B24 stark hervor. Die Restpartikelmenge ist doppelt bis 10-mal so hoch wie im Ausgangszustand der Proben.

Der Kautschukbelag B8 hat eine geringe Veränderung der Restpartikelmenge im Vergleich zu den anderen polymerbasierten Bodenbelägen. In der Gruppe der Steinzeuge und Fliesen ist die Verringerung der Restpartikelmenge bei den Proben ST3, ST7 und ST8 in einer höheren Größenordnung als in den anderen Gruppen, insbesondere im Größenkanal von $0,3 < \text{bis } 0,5 \mu\text{m}$.

Künstliche mechanischen Alterung

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen und der freien Oberflächenenergie befinden sich im Anhang in Tabelle 41. Mit den Daten dieser zwei Oberflächeneigenschaften wurde die Restpartikelmenge für drei Größenkanäle berechnet. Die Restpartikelmenge der Probe nach der mechanischen künstlichen Alterung nach 7 Tagen ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26

Mechanische künstliche Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 7 Tagen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent.

Probennummer	Restpartikelmenge nach mechanischer Alterung		
	$0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$	$1,0 < d \leq 3,0 \mu\text{m}$
B1	18,20%	57,85%	104,88%
B2	28,02%	54,31%	80,53%
B3	11,97%	37,51%	71,17%
B4	13,46%	20,74%	27,82%
B5	0,07%	2,28%	12,93%
B6	913,78%	23,42%	5,22%
B7	2,75%	12,13%	25,45%
B8	28,84%	14,81%	12,61%
B9	24,51%	146,14%	300,16%
B20	1,58%	14,11%	40,24%
B21	21,87%	81,29%	153,33%
B22	1,78%	15,68%	42,29%
B23	44,03%	51,50%	57,35%
B24	50,62%	99,29%	132,72%
B25	5,34%	20,01%	42,11%
W1	0,27%	9,33%	46,95%
W2	k. A.	0,01%	0,04%
ST1	k. A.	k. A.	0,17%
ST2	1628,43%	29,44%	4,42%
ST3	7134,02%	48,58%	7,34%
ST4	k. A.	675,00%	5,92%
ST5	k. A.	84,78%	0,30%

Quelle: IBMB

Bei den polymerbasierten Bodenbelägen wurde eine Verringerung der Rauheit und somit eine Verringerung der Restpartikelmenge festgestellt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Materialoberflächen durch die Druckbelastung der Rollaufsätze geebnet werden.

In der Gruppe der Linoleum-Bodenbeläge [B2, B20, B21, B25] zeigen die Proben B20 und 25 die geringste Restpartikelmenge gegenüber dem Ausgangszustand.

In der Gruppe der PVC-Bodenbeläge [B1, B3, B4, B5, B6, B7, B22, B23, B24], stechen die Proben B5 und B22 hervor. Die Verringerung der Restpartikelmenge gegenüber dem Ausgangszustand ist bei den Proben am größten.

Wird die Verwendung eines Kautschuk-Bodenbelags bevorzugt, empfiehlt es sich B8 gegenüber B9 vorzuziehen.

Für die Wahl eines polymerbasierten Wandbelags wird W2 gegenüber W1 empfohlen.

Die Daten der Bodenbeläge aus Steinzeug und Fliesen weisen im Gegensatz zu den polymerbasierten Boden- und Wandbelägen sehr starke Veränderungen infolge der untersuchten Beanspruchungen auf. Besonders in den Größenkanäle $0,3 < d < 0,5 \mu\text{m}$ sind die Erhöhung der Restpartikelmenge sehr stark, am wenigsten verändern sich die Oberflächenparameter der Probe ST2 durch die Untersuchungen.

Künstliche kombinierte Alterung (physikalisch und mechanisch)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wurde ebenfalls die kombinierte Alterung aus physikalischen und mechanischen Einwirkungen an den polymerbasierten Bodenproben B1 – B25 durchgeführt.

In nicht seltenen Fällen kann es vorkommen, dass die Oberflächen in kritischen Infrastrukturen mehreren Einwirkungen gleichzeitig ausgesetzt sind. Diese Untersuchung soll zeigen, ob eine künstliche kombinierte Alterung zu einer erhöhten Restpartikelmenge gegenüber den jeweils einzelnen Einwirkungen führt.

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen und der freien Oberflächenenergie nach 4 Wochen künstlicher physikalischer Alterung mit UV-Licht im Bewitterungsschrank und anschließend 7 Tage künstliche mechanische Alterung im Prüfstand befinden sich im Anhang in Tabelle 43. Mit den Daten dieser zwei Oberflächeneigenschaften wurde die Restpartikelmenge für drei Größenkanäle berechnet, siehe Tabelle 44. Die Restpartikelmenge der Probe nach der physikalischen künstlichen Alterung nach 28 Tagen gegenüber dem Ausgangszustand ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27

Künstliche kombinierte Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanischen Beanspruchungen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent.

Probennummer	Restpartikelmenge 4 Wochen (physikalisch) + 1 Woche (mechanisch)		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	34,87%	403,85%	1105,54%
B2	80,50%	216,55%	343,11%
B3	28,08%	246,64%	694,85%
B4	13,27%	717,51%	4717,48%
B5	0,20%	88,32%	1072,21%
B6	4,25%	188,57%	684,40%
B7	0,00%	24,89%	2905,00%
B8	130,82%	94,77%	83,18%
B9	68,28%	219,46%	339,48%
B20	12,11%	227,43%	709,21%
B21	5,42%	841,02%	5933,17%
B22	0,52%	2376,05%	45918,92%
B23	398,11%	942,62%	1203,24%
B24	k. A.	k. A.	k. A.
B25	0,04%	233,11%	8093,64%

Quelle: IBMB

Die Untersuchung an den Bodenproben nach künstlicher kombinierter Alterung hat gezeigt, dass sowohl die Oberflächenenergie als auch die Rauheit gegenüber den jeweils einzelnen Einwirkungsarten, physikalisch und mechanisch, zugenommen hat. Die Erhöhung der Oberflächenparameter führen dazu, dass die Restpartikelmenge ebenfalls stärker zunimmt. Insbesondere bei den größeren Größenkanälen $0,5 < d < 1,0 \mu\text{m}$ bzw. $1,0 < d < 3,0 \mu\text{m}$ ist die Zunahme signifikant.

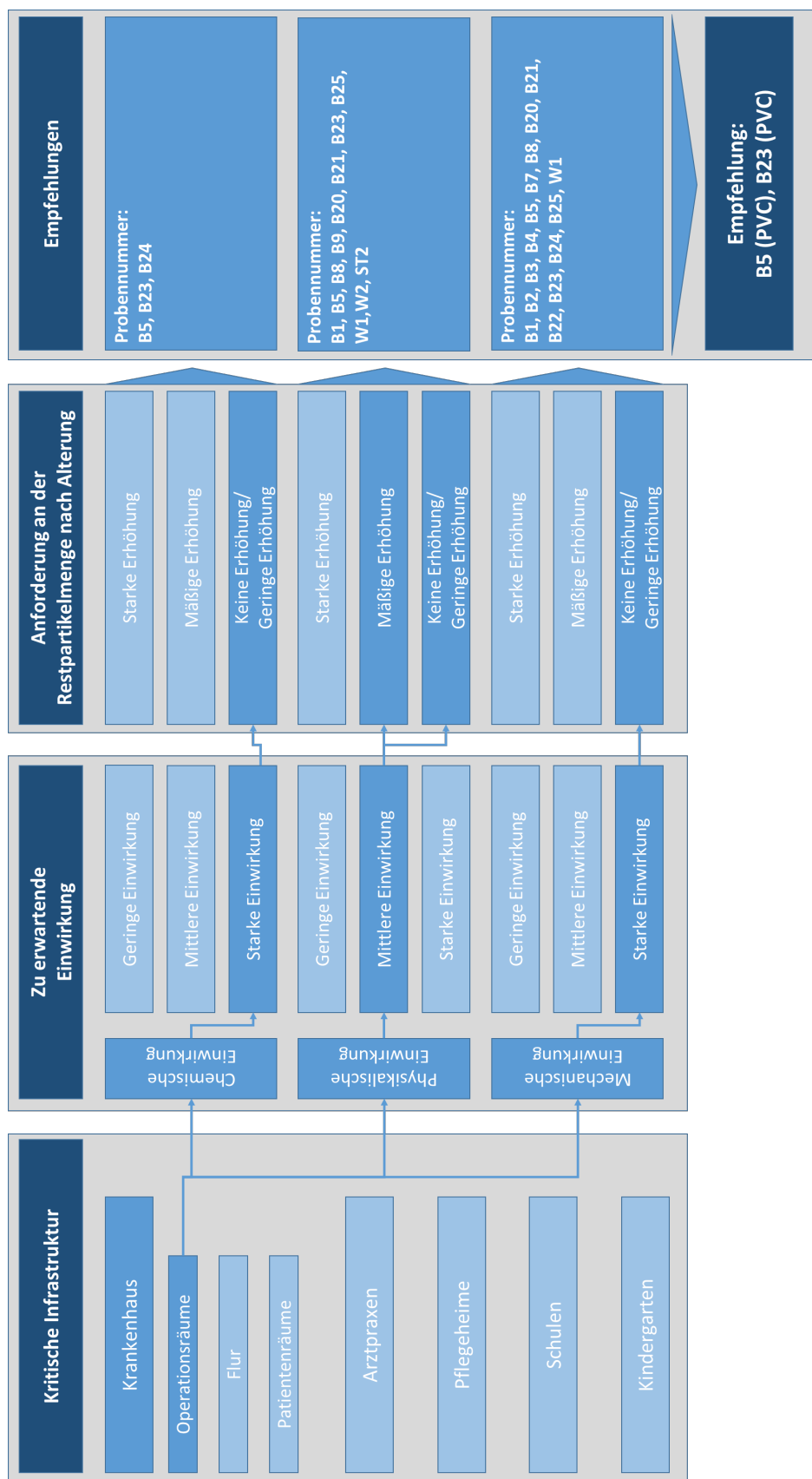
Die Bodenproben B5; B7; B8 zeigten bei dieser Untersuchung die geringste Veränderung in der Restmenge. Bei den Proben B5 und B7 wurden bis zu einen Größenkanal $0,5 < d < 1,0 \mu\text{m}$ keine Veränderung in der Restpartikelmenge festgestellt und bei der Proben B8 verblieb die Restpartikelmenge nach den Beanspruchungen unverändert.

Empfehlungen

Nach den künstlichen Alterungsprozessen wurden die Proben hinsichtlich ihrer Eignung in den kritischen Infrastrukturen überprüft. Die Beurteilung erfolgt in drei Einzelschritten. Zunächst werden die zu erwartenden *chemischen*, *physikalischen* und *mechanischen* Einwirkungen in der zu betrachtenden kritischen Infrastruktur bestimmt. Die drei Einstufungen geringe, mittlere und starke Einwirkung geben im zweiten Schritt die Anforderungen an den zu verwendeten Materialien vor. Beispielsweise resultiert bei einer starken Einwirkung entsprechend eine hohe Anforderung an die Materialien. Die Anforderungen werden auf Grundlage der Restpartikelmenge eingestuft. Bei einer starken Einwirkung darf die Restpartikelmenge des Materials nach der Alterung „keine Erhöhung“ bzw. nur eine „geringe Erhöhung“ aufzeigen. Bei einer geringen Einwirkung dürfen alle Materialien eingesetzt werden, einschließlich Proben mit starker Erhöhung der Restpartikelmenge. Im letzten Schritt werden die untersuchten Materialien den entsprechenden Kategorien zugeordnet. Daraus ergibt sich eine Materialliste, für jede der drei Beanspruchungsarten (chemisch, physikalisch, mechanisch). Die endgültige Empfehlung erfolgt unter Betrachtung der Schnittmenge der einzelnen Materialkataloge.

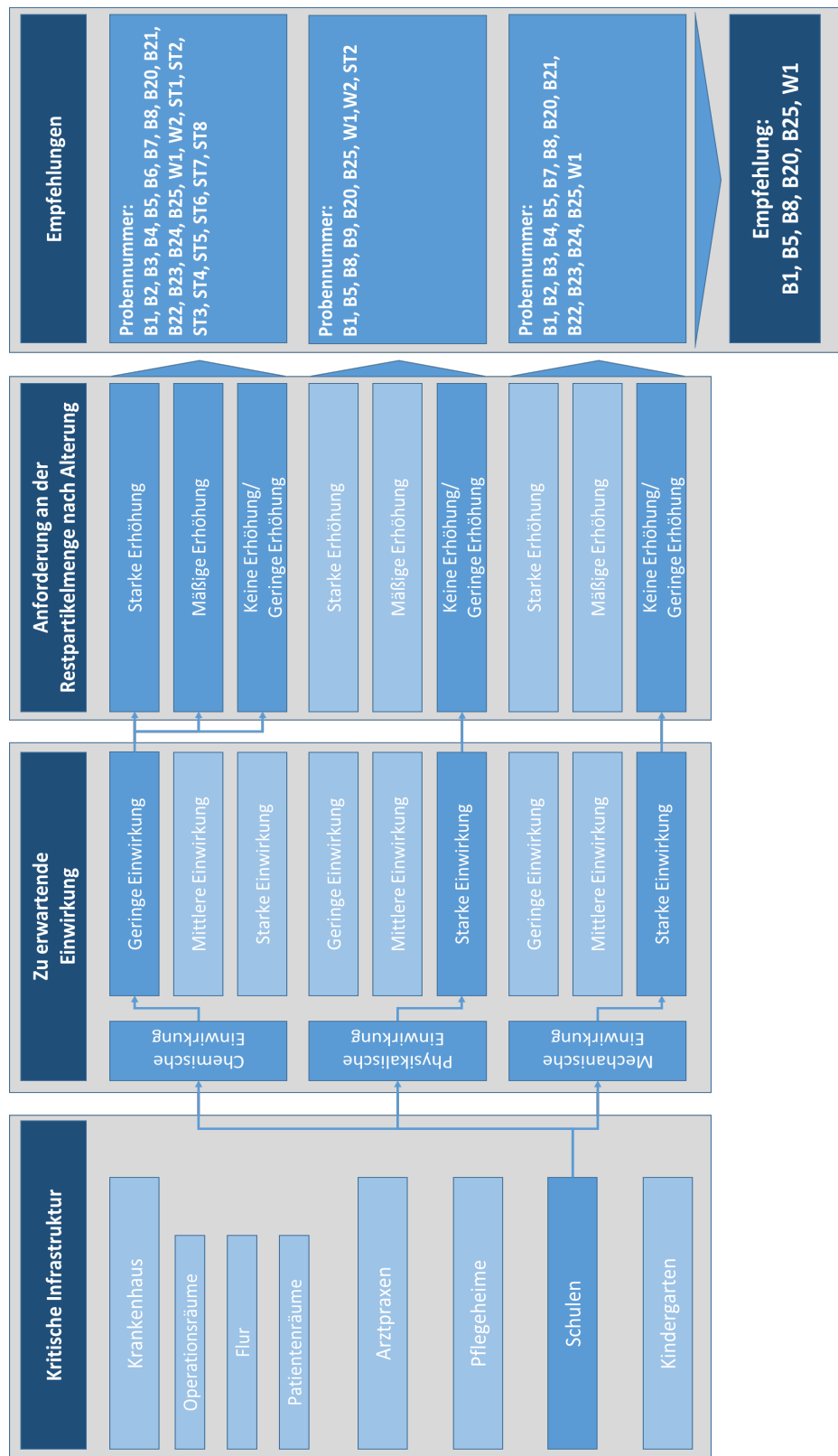
Anhand eines Beispiels der Ansprüche in Operationsräumen von Krankenhäusern und resultierenden Materialempfehlungen kann das Bewertungsschema nachvollzogen werden (Abbildung 42). Die chemische Einwirkung kann dabei als „stark“ eingestuft werden, da in diesen Räumlichkeiten intensiv mit Desinfektionsmitteln gearbeitet wird. Die mechanische Einwirkung kann ebenfalls als „stark“ eingestuft werden, da die Beanspruchung mit Krankenhausbettrollen sehr häufig vorkommt. Die physikalische Einwirkung darf hingegen als „mittel“ eingestuft werden, da die Beanspruchung durch UV-Strahlen und Feuchtigkeit dort nicht sehr ausgeprägt ist. Durch die Einstufung der Einwirkungen erfolgt die Definition der Anforderungen. Bei starker chemischer und mechanischer Einwirkung erfolgt eine hohe Anforderung an die Materialien. Daher dürfen dort nur Materialien mit dem Attribut „keine Erhöhung / geringe Erhöhung“ der Restpartikelmenge eingesetzt werden. Hinsichtlich der mittleren physikalischen Einwirkung dürfen hingegen auch Materialien eingesetzt werden, die eine „mäßige Erhöhung“ der Restpartikelmenge zeigen. Nach der Zuordnung der entsprechenden Testergebnisse der Materialien wird ersichtlich, dass die Proben B5 (PVC) und B23 (PVC) in allen drei Kategorien die jeweiligen Ansprüche erfüllen und somit als Bodenmaterial für Operationsräume empfohlen werden können.

Abbildung 42
Bewertungsschema: Krankenhaus - Operationsräume



Quelle: IBMB

Abbildung 43
Bewertungsschema: Schule



Quelle: IBMB

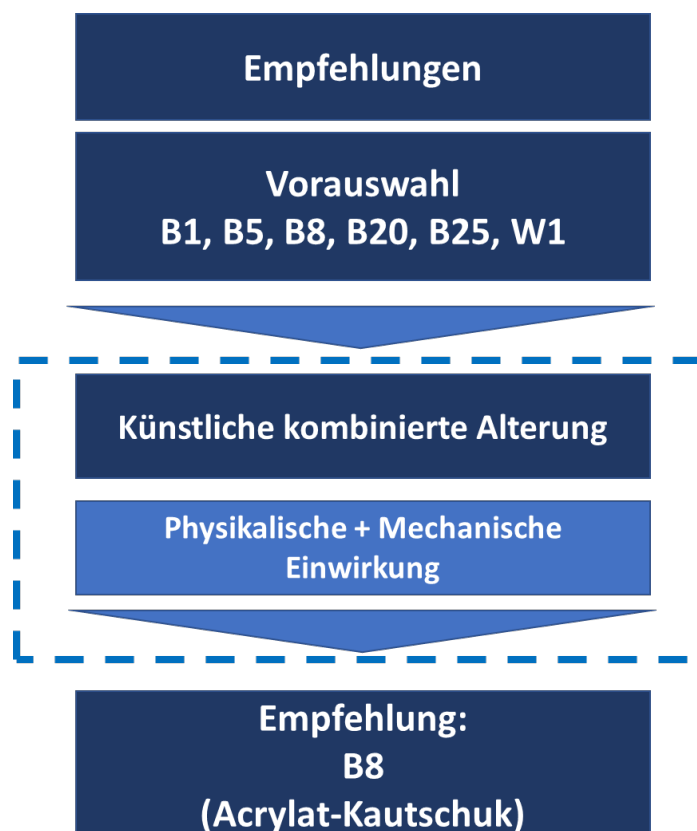
Ein weiteres Beispiel für das Bewertungsschema zeigt die Abbildung 43 für die kritische Infrastruktur Schule. Die zu erwartenden Einwirkungen in den Schulen unterscheiden sich gegenüber denen der Krankenhäuser. Die mechanische Einwirkung ist hier als „stark“ einzuschätzen, da hier eine starke Belastung durch Personenbewegung zu erwarten ist. Außerdem sind die physikalischen Einwirkungen hier ebenfalls als „stark“ zu bewerten, da die Räumlichkeiten aufgrund großflächiger Fensterflächen oft einer UV-Strahlung ausgesetzt sind als auch dem Eintragen von Feuchtigkeit. Die chemischen Einwirkungen hingegen dürfen als „gering“ eingestuft werden, da in Schulen keine regelmäßige Beanspruchung durch Desinfektionsmittel auftritt.

Folgende Materialien können entsprechend des Bewertungsschemas für den Einsatz in Schulen empfohlen werden: B1, B5, B8, B20, B25, W1.

Die Materialempfehlung kann weiterhin spezifiziert werden, wenn darüber hinaus die Ergebnisse der künstlichen kombinierten Alterung herangezogen werden. Für das Beispiel der kritischen Infrastruktur Schule können die Ergebnisse der kombinierten Untersuchung, siehe Tabelle 27, verwendet werden. Die Kombination aus physikalischer und mechanischer Beanspruchung ist in diesem Fall maßgebend für diesen Beispiel. Von den Materialproben in der Vorauswahl: B1, B5, B8, B20, B25, W1 schneidet die Proben B8 (Acrylat-Kautschuk) hinsichtlich der Restpartikelmenge nach künstlicher kombinierter Alterung am besten ab.

Abbildung 44

Bewertungsschema: Schule, Materialempfehlung unter Berücksichtigung der kombinierten Einwirkung



Quelle: IBMB

Fazit / Ausblick

Die Auswirkung des Alterungsprozesses von Materialien auf die Reinigbarkeit kann in einer Pandemie eine entscheidende Rolle spielen und hat einen unmittelbaren Einfluss auf das Infektionsgeschehen. In den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass bei einigen Materialien nach einer künstlichen Alterung die Restpartikelmenge zunimmt. Die Bestimmung der Restpartikelmenge erfolgt in Rahmen dieses Projektes über die Oberflächenparameter Rauheit und Oberflächenenergie. In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass eine Beurteilung bzw. Eingrenzung der Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in kritischen Infrastrukturen anhand der Veränderung der Restpartikelmenge erstellt werden kann.

Allerdings wurde bei der Auswertung der Restpartikelmenge festgestellt, dass mit dem verwendeten Berechnungsmodell bei Materialien mit sehr hoher Oberflächenenergie keine sinnvolle Restpartikelmenge als Ergebnis berechnet werden kann. Die hohe Oberflächenenergie kommt vermutlich bei manchen Materialien aufgrund einer hydrophobierenden Beschichtung zustande. Wenn diese Beschichtung jedoch durch die Alterung beschädigt oder vollständig entfernt wird, kann es zu einer deutlichen Erhöhung der Restpartikelmenge kommen.

Außerdem wurde bei der Bewertung und Auswahl der Materialien allein die Änderung der Restpartikelmenge zugrunde gelegt. Die Änderungen geben jedoch keinerlei Einblick auf die ursprüngliche Restpartikelanzahl. So kann ein Material eine geringe Veränderung aufzeigen, obwohl die ursprüngliche Restpartikelmenge deutlich höher ist. Eine Berücksichtigung des Ausgangszustandes der Materialien in Bezug auf die Restpartikelmenge kann die Bewertung noch verbessern.

Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis

Das Forschungsprojekt profitiert von der interdisziplinären Zusammensetzung der vier beteiligten Forschungsteams. Die zu Beginn der Laufzeit durchgeführte Definierung der Infrastrukturen und infektionskritischen Szenarien hat gezeigt, dass nur eine gemeinsame Betrachtung der vier Disziplinen (Hygiene, Bau, Haustechnik und Material) zur Erarbeitung ganzheitlicher Maßnahmen und der Einordnung ihrer Effektivität zielführend ist. Ebenso konnte nur eine interdisziplinäre Betrachtung der möglichen Maßnahmen zu einer sinnvollen Endauswahl führen, die eine technische, bauliche und finanzielle Durchführbarkeit im Verhältnis zur medizinischen, epidemiologischen Relevanz setzten konnte. Teil dieser Betrachtung war die Festlegung einer Hygiene-Baseline als Zielwert.

Hygiene-Baseline

Eine Vielzahl an infektionspräventiven Maßnahmen ist möglich. Um jedoch eine Sinnhaftigkeit und Relevanz herzustellen, wurden die Lüftungstechnischen Maßnahmen anhand zweier Zielwerte ausgesucht. Dazu wurde von den Forschungspartnern eine Hygiene-Baseline definiert. Diese setzt sich aus einem Zielwert für die CO₂-konzentration (Kontamination) der Luft unter nicht-pandemischen und unter pandemischen Bedingungen zusammen. Ersterer liegt bei 1000 ppm, letzterer bei 800ppm. Die Werte wurden ausgesucht, da sie als Richtwert für eine gesunde Umgebung (1000 ppm) und als Schwellenwert (800 ppm), ab dem eine Infektion sehr unwahrscheinlich ist, gelten.

Bewertung und Zusammenführung der Maßnahmen

Zur Konsolidierung der möglichen Empfehlungen aller Forschungspartner und der gegenseitigen fachlichen Bewertung wurde eine Bewertungsliste der Maßnahmen erstellt. Diese wurde laufend mit neuen Maßnahmen erweitert. In gemeinsamen Diskussionen wurde die Relevanz und Durchführbarkeit jeder einzelnen Maßnahmen bewertet, ihre finale Formulierung konkretisiert, eine Einordnung der Relevanz hinsichtlich der Infektionsprävention und ihrer Durchführbarkeit für Neu- oder Bestandsbauten vorgenommen. Zudem wurde entschieden, ob eine Maßnahme während des Normalbetriebs oder in einer pandemischen Situation angewendet werden soll. Die Endergebnisse mit allen Empfehlungen sind in der Anlage zu finden.

Diskussion

Baukonstruktive, prozessuale, lüftungstechnische und hygienische Maßnahmen können zur Unterbrechung von Infektionswegen beitragen. Sowohl die Systemic Reviews als auch Simulationsanalysen und numerische Modelle konnten den Einfluss einer Vielzahl von Faktoren auf das Infektionsrisiko zeigen. Durch die ganzheitliche interdisziplinäre Betrachtung konnte der Komplexität der Forschungsfrage begegnet werden, Erkenntnisse ergänzt und gegenseitig bestätigt werden. Die sinnvolle Entwicklung und Ergänzung baukonstruktiver und prozessualer Maßnahmen konnte nur durch den Übertrag von Erkenntnissen anderer Disziplinen auf die Architektur durchgeführt werden. Eine Untersuchung weiterer Infrastrukturen wird daher als sinnvoll angesehen.

Eine psychologische, soziologische, energetische und betriebswirtschaftliche Bewertung der entwickelten Empfehlungen konnten aufgrund der Ausrichtung und Zusammensetzung des Forschungsteams und -antrags jedoch nicht durchgeführt werden. Auch fehlen bisher Erkenntnisse aus einer detaillierten Lageauswertung der Meldedaten des RKIs, die zu einer gezielteren Formulierung von Empfehlungen beitragen könnten. Ebenso könnte ein Abgleich mit Standards im Ausland den Empfehlungskatalog bereichern. Als essentiell für die Effektivität der Empfehlungen wird eine breit angelegte Aufklärungskampagne und die weitere Erforschung zur Wissensdissemination innerhalb der Organisationen der betrachteten Infrastrukturen empfohlen. Ebenfalls sollten die Empfehlungen kontinuierlich dem sich dynamisch weiterentwickelnden Wissensstand angepasst werden.

Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit

Ein umfänglicher Katalog von Empfehlungen, welche die intra- wie auch interdisziplinäre Betrachtungen der Forschungsfrage abbilden, konnte erstellt werden. Dieser soll Planende bei zukünftigen (Um-)Bauvorhaben hinsichtlich des infektionspräventiven Bauens unterstützen. Das abgeschlossene Projekt wie auch Zwischenergebnisse wurden bereits bei verschiedenen Vorträgen und Journals der Öffentlichkeit kommuniziert und bei den Projekttagen der Bauforschung sowie auf dem Stand der Förderinitiative Zukunft Bau auf der Messe BAU 23 vorgestellt:

15.01.2021, BAU ONLINE

Prof. Dr. med. Petra Gastmeier: „Der Arbeitsplatz als Hotspot: Übertragungswege in Gebäuden, Hallen und auf Freiflächen“ Dr.-Ing. Wolfgang Sunder: „Infektionsprävention im Gebäude planen und bauen“

03.03.2021, 16. Projekttag der Bauforschung

Dr.-Ing. Wolfgang Sunder: „Effektive Strategien zur Kontrolle und zum Umgang mit Ausbreitungswegen von Erregern zum Schutz kritischer Infrastrukturen“

20.05.2022, CLIMA 2022

Dr.-Ing. Yunus Cetin: „Evaluation of preventive measures in mitigating the risk of airborne infection of COVID-19“ In: Proceeding Clima 2022. Zugriff: <https://doi.org/10.34641/clima.2022.299>.

2022, Veröffentlichung im REHVA Journal

Cetin, Y.E., & Kriegel, M. (2022). Evaluation of preventive measures in mitigating the risk of airborne infection of COVID-19. REHVA J., 7-11. Zugriff: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/evaluation-of-preventive-measures-in-mitigating-the-risk-of-airborne-infection-of-COVID-19>.

2022, Online Veröffentlichung bisheriger Empfehlungen zur Planungshilfe

Lukas Adrian Jurk: Im Rahmen einer Mittelaufstockung wurde eine Übersicht der aktuellen und vergangenen Forschungsergebnisse des IKEs in Form von Empfehlungen zum infektionspräventiven Bauen schriftlich und grafisch erstellt. Diese wurde mit der Öffentlichkeitsarbeit des BBSR für die Veröffentlichung auf der Webseite www.zukunftbau.de/programme/infektionspraeventives-bauen abgestimmt.

2023, Veröffentlichung im International Journal of Environmental Research and Public Health

Jendrossek, S. N., Jurk, L. A., Remmers, K., Cetin, Y. E., Sunder, W., Kriegel, M., & Gastmeier, P. (2023). The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph20043746>

April 2023, BAU 23, Messe München

Ausstellung des Projekts SAVE

Lukas Adrian Jurk und Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel: Talk am Tresen "Infektionspräventives Bauen"

August 2023, Veröffentlichung in der Zeitschrift Moderne Gebäudetechnik

Kopic, C., Remmers, K., Sunder, W., Kriegel, M., & Jurk, L. A. (2023). Nach der Pandemie ist vor der Pandemie: Infektionsschutz in Neu- und Bestandsbauten. <https://www.tga-praxis.de/20231332>

Unter anderem Titel erschienen: Kopic, C., Remmers, K., Sunder, W., Kriegel, M., & Jurk, L. A. (2023). Interdisziplinäres Forschungsprojekt SAVE - Ertüchtigung von Neu- und Bestandsbauten durch präventive, reaktive und adaptive Maßnahmen zur Unterbrechung von Infektionsketten in kritischen Infrastrukturen. Technische Universität Berlin. <https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-18599>

In einem Folgeprojekt wird geplant, auf einer Online-Wissensplattform einen frei zugänglichen und interaktiven Planungsleitfaden aufzubauen. Diese soll zudem mit einer Entscheidungsmatrix angereichert werden, um Planende bei der Einschätzung ihrer Entwürfe hinsichtlich des Infektionsrisikos unterstützen zu können. Weiterhin werden die Nutzenden der jeweiligen Infrastrukturen zu Maßnahmen und dem Umgang mit der gebauten Umgebung aufgeklärt. Dadurch sollen auch Sanierungsvorhaben durch aufgeklärtere Entscheidungsfindungen besser vorbereitet werden können. Es werden Informationen zu den betrachteten Infrastrukturen des SAVE Projekts aber auch anderer Gebäudetypologien aus Vorgängerprojekten oder aktuellen Projekten der Forschungspartner inkludiert.

Ausblick

Maßgeblich für die Sinnhaftigkeit des Forschungsprojekts ist eine Realisierung der Empfehlungen in den betrachteten Infrastrukturen. Auf einer Online-Wissensplattform sollen daher eine Einführung zum Grundlagenwissen und die Empfehlungen selber an Planende sowie Führungskräfte der Infrastrukturen und deren Verbände vermittelt und niedrigschwellig zugänglich gemacht werden. Eine kontinuierliche Pflege der Inhalte und Anreicherung durch Empfehlungen für weitere Infrastrukturen sollen der Thematik breitenwirksame Bekanntheit und Relevanz geben.

Bisherige Ergebnisse sind bereits auf ein reges, öffentliches Interesse gestoßen. Deren Umsetzung hängt zukünftig jedoch nicht nur von der Bereitschaft der Zielgruppen ab, sondern erfordert auch von der Politik und relevanten Verbänden mitgetragen zu werden, um eine Finanzierung und Beantragung zu ermöglichen. Die Erkenntnisse sollten die betrachteten Infrastrukturen nicht nur aufkommende Pandemien vorbereiten, sondern auch im Alltag einen Beitrag leisten, Krankheitsfälle zu verhindern. Gerade bei unseren im Durchschnitt sehr langen Aufenthaltszeiten in Innenräumen ist eine gesundheitsförderlich gebaute Umgebung unverzichtbar.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Lukas Adrian Jurk (TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau, TU Braunschweig)

Dr.-Ing. Wolfgang Sunder (TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau, TU Braunschweig)

Kirsten Remmers (TU Braunschweig, Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau, TU Braunschweig)

Dr.-Ing. Yunus Emre Cetin (TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut)

Dr. med. Sandra Jendrossek (Charité – Universitätsmedizin Berlin, Institut für Hygiene und Umweltmedizin)

Jens Brack (TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig)

Zhuo Chen (TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig)

Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel (TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut)

Prof. Dr. med. Petra Gastmeier (Charité – Universitätsmedizin Berlin, Institut für Hygiene und Umweltmedizin)

Fachliche Betreuung

Guido Hagel

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“



Kurzbiographien



Lukas Adrian Jurk

ist Industrial und Social Designer, studierte Industrie- und Autodesign an der HBK Braunschweig, Architektur an der Universidad de Chile und Social Design an der Design Academy Eindhoven. Schon im Rahmen seiner Bachelorarbeit setzte er sich mit Gestaltung im Krankenhauskontext auseinander. Aktuell arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktives Entwerfen, Industrie- und Gesundheitsbau (IKE). Dort erforschte er in vorherigen Projekten interaktionale und bauliche Maßnahmen der Infektionsprävention sowie Methoden der Patientenaufklärung. Teil seiner Arbeit ist auch die Entwicklung von Virtual-Reality Anwendung zur quantitativen und immersiven Befragung, die Leitung des Innolabs des IKEs und Beratung von Altenheimen zum infektionspräventiven Bauen.



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Sunder

ist diplomierter und promovierter Architekt und hat in Münster, Zürich und Berlin studiert. Seit Oktober 2008 lehrt und forscht er am IKE. Er hat den Gesundheitsbau als zentrales Lehr- und Forschungsgebiet am Department Architektur der TU Braunschweig etabliert. Eine Spezialisierung ist dabei das Themenfeld der baulichen Infektionsprävention. Als Forschungsleiter am Institut initiiert er kontinuierlich nationale und internationale Forschungsprojekte und berät Klinikbetreiber in ihrer strategischen Ausrichtung. Seit 2013 ist er verantwortlich für den Teilbereich Bau im Forschungskonsortium InfectControl. Wolfgang Sunder veröffentlicht regelmäßig die Ergebnisse seiner Arbeit.



Kirsten Remmers

hat Architektur an der TU Braunschweig, sowie der Bergen School of Architecture studiert. Schon im Studium begann sie als studentische Hilfskraft u.a. am IKE der TU Braunschweig im Forschungsbereich Gesundheitsbau mitzuarbeiten. In ihrer Masterthesis setzte sie sich mit demenzsensibler Architektur auseinander. Seit 2022 arbeitet Kirsten Remmers als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Projekt Database of Architecture and Health Environment.



Dr.-Ing. Yunus Emre Cetin

Yunus Emre Cetin ist Postdoktorand am Hermann-Rietschel-Institut. Seine Forschungsinteressen umfassen Lüftung, Energieeffizienz in Gebäuden, Schadstoffausbreitung in kontrollierten Bereichen wie Reinräumen und Operationssälen.



Dr. med. Sandra Jendrossek

Sandra Jendrossek absolvierte ihr Humanmedizinstudium an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Dort promovierte sie 2018 in der Immunologie. Nachdem sie zunächst im klinischen Bereich in der Inneren Medizin in Berlin tätig war, arbeitet sie seit 2021 als Assistenzärztin am Institut für Hygiene und Umweltmedizin der Charité – Universitätsmedizin Berlin.

**Prof. Dr. med. Petra Gastmeier**

Petra Gastmeier studierte Humanmedizin an der Martin-Luther-Universität in Halle und der Charité in Berlin. Nach Promotion 1985 und Weiterbildung zur Fachärztin für Hygiene und Umweltmedizin arbeitete Petra Gastmeier von 1991 bis 2000 als Krankenhaushygienikerin in Potsdam und am Institut für Hygiene der Freien Universität Berlin. Im Jahre 1999 habilitierte sie und erhielt im Jahr 2000 einen Ruf auf eine C3-Schwerpunktprofessur an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH). Nach 7 Jahren Tätigkeit an der MHH als Leiterin der Krankenhaushygiene wechselte sie 2008 auf den Lehrstuhl für Hygiene an der Charité –Universitätsmedizin Berlin. Petra Gastmeier koordiniert seit 1996 die Arbeit des Nationalen Referenzzentrums für Surveillance von nosokomialen Infektionen und seit 2007 die Aktion saubere Hände.

**Jens Brack**

Jens Brack absolvierte sein Masterstudium der Geowissenschaften mit der Vertiefungsrichtung Mineralogie an der Leibniz Universität Hannover. Im März 2020 begann er seine Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz im Fachgebiet Baustoffe.

**Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel**

Martin Kriegel erhielt 2001 sein Diplom Gebäudetechnik von der Technischen Universität Berlin. 2005 schloss er seine Promotion zum Thema experimentelle und numerische Untersuchung von Quellluftsystemen ebenfalls an der TU Berlin ab. Im Anschluss arbeitete er im väterlichen Ingenieurbüro für technische Gebäudeausrüstung (TGA), einem mittelständischen Unternehmen mit dem Schwerpunkt Gesundheitsbauten und Labore. Seit 2011 leitet Martin Kriegel das Hermann-Rietschel-Institut an der TU Berlin, Fachgebiet „Energie, Komfort & Gesundheit in Gebäuden“.

**Zhuo Chen**

Zhuo Chen absolvierte sein Studium in Bauingenieurwesen mit der Vertiefung Baustofftechnologie an der Technischen Universität Braunschweig. Seit 2019 arbeitet er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz im Fachgebiet Baustoffe. Zu seinen aktuellen Arbeitsschwerpunkten gehört insbesondere die Verstärkung von gealterten Bauwerken mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte. (2018). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft- Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 51, 1358-1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Agirman, A., Cetin, Y.E., Avci, M., & Aydin, O. (2020). Effect of air exhaust location on surgical site particle distribution in an operating room. *Build. Simul.* Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0642-1>.
- BBK – Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. (2007). Biologische Gefahren I, Handbuch zum Bevölkerungsschutz, 3. Auflage, Bonn.
- Benbow, W. (2022). COVID-19 in Long-Term Care: The Built Environment Impact on Infection Control. *Herd*, 15(4), 287-298. <https://doi.org/10.1177/19375867221101897>
- Birmili, W. S., H. C.; Moriske, H. J.; Daniels, A.; Straff, W. (2021). [Ventilation concepts in schools for the prevention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 64(12), 1570-1580. <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4> (Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft.)
- Cetin Y.E., & Kriegel M. (2022) Evaluation of preventive measures in mitigating the risk of airborne infection of COVID-19. In: Proceeding Clima 2022. Zugriff: <https://doi.org/10.34641/clima.2022.299>.
- Cetin, Y.E., & Kriegel, M. (2022). Evaluation of preventive measures in mitigating the risk of airborne infection of COVID-19. *REHVA J.*, 7-11. Zugriff: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/evaluation-of-preventive-measures-in-mitigating-the-risk-of-airborne-infection-of-COVID-19>.
- Christian Schittich, Gerald Staib, Dieter Balkow, Matthias Schuler & Werner Sobek. (2012). Glasbau Atlas. Birkhäuser.
- Correia, G., Rodrigues, L., Gameiro da Silva, M., Gonçalves, T. (2020). Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Medical Hypotheses*, 141.
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., de Gennaro, G. (2021). CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of SARS-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- Dreßler, I. (2018). Hygienesichere Oberflächen im nicht-immernierten System.
- ECDC. (2022). *Factsheet for health professionals on Coronaviruses European Centre for Disease Prevention and Control*. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/factsheet-health-professionals-coronaviruses>
- European Organisation for Technical Approvals. (2004). EOTA technical report - Exposure procedure for artificial weathering: TR 010.
- Guo, Z. D., Wang, Z. Y., Zhang, S. F., Li, X., Li, L., Li, C., Cui, Y., Fu, R. B., Dong, Y. Z., Chi, X. Y., Zhang, M. Y., Liu, K., Cao, C., Liu, B., Zhang, K., Gao, Y. W., Lu, B., & Chen, W. (2020). Aerosol and Surface Distribution of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Hospital Wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), 1583-1591. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200885>
- Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., & Kriegel, M. (2020). Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10332>

- Jendrossek, S. N., Jurk, L. A., Remmers, K., Cetin, Y. E., Sunder, W., Kriegel, M., & Gastmeier, P. (2023). The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph20043746>
- Kriegel, M., Hartmann, A., Buchholz, U., Seifried, J., Baumgarte, S., & Gastmeier, P. (2021). SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010220>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*, 139, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Passarelli, G. R. (2009). Sick building syndrome: An overview to raise awareness. *Journal of Building Appraisal*, 5(1), 55–66. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.20>
- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *medRxiv*, 2020.2009.20191676. <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>
- Pettenkofer, M. v. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta'sche Buchhandlung.
- Qin, C., & Lu, W.Z. (2020). Effects of ceiling exhaust location on thermal comfort and age of air in room under impinging jet supply scheme. *J. Build. Eng.*, 35, 101966. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101966>.
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237–245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>
- Satheesan, M.K., Mui, K.W., & Wong, L.T. (2020). A numerical study of ventilation strategies for infection risk mitigation in general inpatient wards. *Build. Simul.* Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0623-4>.
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333–341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>
- Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med*, 8(7), 658–659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)
- Stiller, A., Salm, F., Bischoff, P., Gastmeier, P. (2016). Relationship between hospital ward design and healthcare-associated infection rates: a systematic review and meta-analysis. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 5, 51.
- Stiller, A., Schröder, C., Gropmann, A., Schwab, F., Behnke, M., Geffers, C., Sunder, W., Holzhausen, J., Gastmeier, P. (2017). ICU ward design and nosocomial infection rates: a cross-sectional study in Germany. *Journal of Hospital Infection*, 95 Jg. (1): 71–75.
- Sunder, W., Holzhausen, J., Gastmeier, P., Haselbeck, A., Dreßler, I. (2018). Bauliche Hygiene im Klinikbau. Planungsempfehlungen für die bauliche Infektionsprävention in den Bereichen der Operation, Notfall- und Intensivmedizin.
- Umweltbundesamt. (2020). *Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt* Retrieved August 17, 2022 from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_SARS-CoV-2_0.pdf
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382(16), 1564–1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

- Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2. Hrsg.). Pearson Education Limited, Essex.
- Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. [Review] [Review.]. *Science August*, 373(6558).
<https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftx&AN=00007529-202108270-00002>
- Wendt, J.F., Anderson, J.D., Degroote, J., Degrez, G., Dick, E., Grundmann, R., & Vierendeels, J. (2009). *Computational fluid dynamics: An introduction*. Springer Berlin Heidelberg. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4>.
- Wille, B., & Hoock, M. (2012). Hygienische, ökologische und ökonomische Aspekte zu Fußbodenbelägen im Krankenhaus (Fortsetzung). *Krankenhaus-Hygiene + Infektionsverhütung*, 34 Jg. (5): 197-202. Zugriff: doi:10.1016/j.khinf.2012.09.009.
- WHO – World Health Organization, "Assessing the severity of an influenza pandemic," Pandemic (H1N1) 2009. Zugriff: www.who.int/csr/disease/swineflu/assess/disease_swineflu_assess_20090511/en/, [abgerufen am 05.05.2020, 18:05 Uhr].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorgehen im Projekt	16
Abbildung 2	Anzahl COVID-19-Fälle je nach Infektionsumfeld und Meldewoche	17
Abbildung 3	Beispiel eines Szenario-Raums inklusive Abwandlungen	28
Abbildung 4	Übersicht der 149 Raumvarianten zu den definierten Szenarien zur Berechnung des Infektionspräventionspotenzials mittels Computational Fluid Dynamics	28
Abbildung 5	Vorgeschlagene Methodik des IKEs	29
Abbildung 6	Übersicht der Codes der Nutzerinterviews für Schulen	32
Abbildung 7	Auszug aus der Zusammenfassung der Analyse der Nutzendeninterviews	33
Abbildung 8	Übersicht der verschiedenen Gebäudetypologien, die miteinander verglichen wurden	34
Abbildung 9	Methodisches Vorgehen zur typologischen Bewertung beispielhafter Bauten	34
Abbildung 10	Variationen der Reduzierung des Infektionsrisikos bei verschiedenen Gegenmaßnahmen	41
Abbildung 11	Maschenstruktur eines natürlich belüfteten Klassenzimmers	42
Abbildung 12	Verteilung der Luftalterung bei verschiedenen Fensterkonfigurationen und unterschiedlichen Luftwechselraten	43
Abbildung 13	Die Partikelwege und -verteilungen basierend auf verschiedenen Positionen der Schadstoffquelle. Oben: Strömungslinien, unten: Konzentrationsverteilung auf Atemhöhe	44
Abbildung 14	Luftstrommanagement zwischen benachbarten Räumen	45
Abbildung 15	Kontaminationsübertragung zwischen Räumen (Konfiguration (c)). Links: jeder Raum verfügt über eigene Zu- und Abluftventilatoren, rechts: Erweiterung mit Luftschleier	45
Abbildung 16	Schematischer Verlauf der Versuche und Messungen	47
Abbildung 17	Probenhalterung für die mechanische künstliche Alterung mit Krankenhausrollen (A), die Folgen der Belastung mit Wurzelbürsten (B)	47
Abbildung 18	Der Versuchsaufbau während des Desinfektionsmitteltests (A), beide Desinfektionsmittel werden gleichzeitig aufgetragen. Links oben „Insidien Pro“ und rechts unten „Incidin Active“, der Haken markiert die Position links unten auf den Proben um die Orientierung und Position der Desinfektionsmittel dauerhaft nachvollziehen zu können. Die Glasdeckel werden über den Proben positioniert um die Evaporation weitestgehend zu verhindern (B)	42
Abbildung 19	Aufbau Methode zur Bewertung von Interventionen zur Reduzierung der Kontaktanzahl	51
Abbildung 20	Links: ungeeignete zentrale Erschließung; rechts: geeignete dezentrale und nutzerspezifische Erschließung	53
Abbildung 21	Grundriss Dezentrale und Nutzerspezifische Erschließung, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld	53
Abbildung 22	Links: keine Abtrennbarkeit möglich; rechts: temporäre Abtrennbarkeit einzelner Bereiche	54
Abbildung 23	Grundriss Temporäre Abtrennbarkeit, Elderly Healthcare Centre in Martí i Julià Hospital Park	54
Abbildung 24	Links: bei rein natürlicher Belüftung ungeeignete innenliegende Erschließung; rechts: im Außenbereich liegende und natürlich belüftete Erschließungen	55
Abbildung 25	Grundriss Im Außenbereich liegende Erschließungen, Publicnursery, Day Care Glyfada, Greece	55

Abbildung 26 Links: erschwertes Lüften durch einseitige Fenster; rechts: Querlüftung gewährleistet	56
Abbildung 27 Grundriss Querlüftung gewährleisten, Centro de Apoio à Terceira Idade	56
Abbildung 28 Links: schmaler Flur; rechts: Grundriss mit großzügigem Bewegungsflächen	57
Abbildung 29 Grundriss Großzügige Bewegungsflächen, Volksschule Unterdorf, Höchst	57
Abbildung 30 Links: Keine innere oder äußere Erkennbarkeit von einzelnen Gebäudebereichen; rechts: gute Übersichtlichkeit	58
Abbildung 31 Grundriss Gute Übersichtlichkeit, Kardiologisches Zentrum, Zürich	58
Abbildung 32 Links: zentrale Sanitäranlage, die zu mehr Kontaktinfektionen führen kann; rechts: dezentrale Sanitäranlagen, die Kontakte reduziert	59
Abbildung 33 Grundriss Dezentrale Sanitäranlagen, Praxiszentrum Burglengenfeld	59
Abbildung 34 Links: zentrale Lagerfläche, die zu mehr Kontaktinfektionen führen kann; rechts: dezentrale Lagerfläche, die Kontakte reduziert	60
Abbildung 35 Grundriss Dezentrale Lagerflächen, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld	60
Abbildung 36 Links: Lange Wege aus allen Bereichen zu einem wichtigen Funktionsbereich, rechts: kurze Wege aus allen Bereichen zu wichtigem Funktionsbereich	61
Abbildung 37 Grundriss Kurze Wege, Praxiszentrum Burglengenfeld	61
Abbildung 38 Links: keine Ausweichs- und Ergänzungsflächen, die vor Witterung geschützt sind; rechts: Überdachter Außenbereich	62
Abbildung 39 Grundriss Überdachter Außenbereich, Altenwohnheim und Pflegeheim Steinfeld	62
Abbildung 40 Links: Kleiner Anfahrtsbereich; rechts: großzügige An- und Abfahrtsbereiche mit Platz für Fahrradstellplätze	63
Abbildung 41 Grundriss Großzügige An- und Abfahrtsbereiche mit Fahrradstellplätzen, Villavita - Zentrum für ganzheitliche Medizin	63
Abbildung 42 Bewertungsschema: Krankenhaus - Operationsräume	101
Abbildung 43 Bewertungsschema: Schule	102
Abbildung 44 Bewertungsschema: Schule, Materialempfehlung unter Berücksichtigung der kombinierten Einwirkung	103
Abbildung 45 Pyramide der technischen Kontrollen zur Infektion in der Langzeitpflege nach Benbow	121
Abbildung 46 Flussdiagramm Studienaushwahl	148
Abbildung 47 Flussdiagramm Studienaushwahl	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Abfrage infektiionskritischer Funktionsbereiche in der Schule	19
Tabelle 2 Abfrage infektiionskritischer Tätigkeiten in der Schule	20
Tabelle 3 Abfrage infektiionskritischer Funktionsbereiche in der Kindertagesstätte	21
Tabelle 4 Abfrage infektiionskritischer Tätigkeiten in der Kindertagesstätte	21
Tabelle 5 Abfrage infektiionskritischer Funktionsbereiche in der Arztpraxis	22
Tabelle 6 Abfrage infektiionskritischer Tätigkeiten in der Arztpraxis	22
Tabelle 7 Abfrage infektiionskritischer Funktionsbereiche eines Alten-/Pflegeheimes	23
Tabelle 8 Abfrage infektiionskritischer Tätigkeiten eines Alten-/Pflegeheimes	24
Tabelle 9 Zusammenfassung Infektiionskritischer Funktionsbereiche und Tätigkeiten	25
Tabelle 10 Tabellarische Übersicht der definierten Szenarien zur Berechnung des Infektiionspräventionspotenzials verschiedener Räumvarianten und deren Auswirkung	26
Tabelle 11 Tabellarische Übersicht der definierten Szenarien zur Berechnung des Infektiionspräventionspotenzials verschiedener Räumvarianten und deren Auswirkung	27
Tabelle 12 Beurteilung des Infektiionsrisikos in verschiedenen Bereichen	38
Tabelle 13 Die Probenmaterialien, gegliedert in Kategorien, Material und Probenanzahl. Die Bezeichnung (B) verweist auf die Bodenmaterialien	46
Tabelle 14 Zeitlicher Ablauf der künstlichen, chemischen Alterung mit Zeitpunkten der Desinfektionsmittel-Beanspruchung und Messungsphasen	48
Tabelle 15 Größenkanäle zur Bestimmung der Restpartikelmenge	49
Tabelle 16 Sich gegenseitig bedingende Faktoren des Infektiionsrisikos	52
Tabelle 17 Infrastrukturübergreifende Empfehlungen	64
Tabelle 18 Empfehlungen Schule	68
Tabelle 19 Empfehlungen Kindergärten	73
Tabelle 20 Empfehlungen Alten- und Pflegeheime	77
Tabelle 21 Empfehlungen Arztpraxen	83
Tabelle 22 Bewertungsschema der Restpartikelmenge nach der künstlichen Alterung	92
Tabelle 23 Differenz der Restpartikelmenge nach zwei und vier Wochen, bezogen auf den Ausgangszustand der künstlichen Alterung mit Incidin Pro. Dargestellt in Prozent	93
Tabelle 24 Differenz der Restpartikelmenge nach zwei und vier Wochen bezogen auf den Ausgangszustand der künstlichen Alterung mit Incidin Active in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent	94
Tabelle 25 Physikalische künstliche Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 28 Tagen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent.	96
Tabelle 26 Mechanische künstliche Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 7 Tagen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent	97
Tabelle 27 Künstliche kombinierte Alterung, Differenz der Restpartikelmenge in % nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanischen Beanspruchungen im Vergleich zum Ausgangszustand in den drei Größenkanälen der Restpartikelmenge. Dargestellt in Prozent	99

Tabelle 28 Beobachtungsstudien	124
Tabelle 29 Beobachtungsstudien	137
Tabelle 30 Interventionsstudien	149
Tabelle 31 Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen	150
Tabelle 32 Interventionsstudien	166
Tabelle 33 Beobachtungs- und Modellierungsstudien	169
Tabelle 34 Materiallisten	188
Tabelle 35 Chemische Alterung mit Incidin Pro; Freie Oberflächenenergie und Rauheit	189
Tabelle 36 Chemische Alterung mit Incidin Pro; Restpartikelmenge	190
Tabelle 37 Chemische Alterung mit Incidin Active	191
Tabelle 38 Chemische Alterung mit Incidin Active; Restpartikelmenge	192
Tabelle 39 Physikalische Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 28 Tagen Bestrahlung	193
Tabelle 40 Physikalische Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 28 Tagen Bestrahlung	194
Tabelle 41 Mechanische Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 7 Tagen Belastung	195
Tabelle 42 Mechanische Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 7 Tagen Belastung	196
Tabelle 43 Kombinierte Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanische Belastungen	197
Tabelle 44 Kombinierte Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanischen Belastungen	198

Anlagen

Scoping Review zu Alten- und Pflegeheimen	➔ Seite 118
Scoping Review zu Arztpraxen	➔ Seite 134
Scoping Review zu Kindergärten	➔ Seite 144
Scoping Review zu Schulen	➔ Seite 161

Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Alten- und Pflegeheimen

Einleitung

In Deutschland existierten im Jahr 2021 16.115 Pflegeheime, davon 11.358 mit vollstationärer Dauerpflege und es gab ca. 5,0 Mio. pflegebedürftige Personen von welchen ungefähr 16% in vollstationären Pflegeeinrichtungen untergebracht waren (Statistisches Bundesamt, 2022a, 2022b). Im Jahr 2019 gab es ca. 814.000 Personen als beschäftigtes Personal in stationären Pflegeeinrichtungen (Statistisches Bundesamt, 2023). Alten- und Pflegeheime, im Folgenden nur noch als Pflegeheime bezeichnet, waren vor allem in den ersten Wellen der Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2 (SARS-CoV-2) Pandemie stark von Fällen und Ausbrüchen betroffen (Gorges & Konetzka, 2020; Hamilton et al., 2021). Eine Analyse des Zeitraumes der Meldewochen 10/2020 - 06/2021 des Robert Koch Institutes ergab, dass ca. 19% der SARS-CoV-2 Gesamtfälle in der Altersgruppe >65 Jahre auftraten, davon erforderten ca. 33,7% eine Hospitalisierung. 93% der Todesfälle aufgrund der durch SARS-CoV-2 ausgelösten Coronavirus Krankheit 2019 (COVID-19), waren in der Altersgruppe >65 Jahre. In dem Betrachtungszeitraum gab es insgesamt 4.937 gemeldete Ausbrüche in Pflegeheimen. Der Anteil der Fälle im Rahmen eines Ausbruches in einem Pflegeheim an der Gesamtzahl von Fällen betrug 5,7% (Robert Koch Institut, 2021).

Um insbesondere die oft vulnerablen Bewohner und Bewohnerinnen zu schützen wurden die Pflegeheime zu Beginn der Pandemie im Rahmen eines Lockdowns für Besuchende geschlossen. Man wollte durch die Maßnahmen verhindern, dass das SARS-CoV-2 Virus in die Pflegeheime durch Besuchende eingetragen und verbreitet wurde. Wenn das Virus durch eine andere Quelle, zum Beispiel das Pflegepersonal, eingetragen wurde, führte dies in vielen Fällen zu Ausbrüchen (Dykgraaf et al., 2021; Piet et al., 2021) und vor allem bevor die SARS-CoV-2 Impfung etabliert war auch bedauerlicherweise zu sehr vielen Todesfällen. Gerade die älteren Menschen und Menschen mit (chronischen) Vorerkrankungen, hatten oft einen schwereren COVID-19 Verlauf mit hohen Mortalitätsraten (Hamilton et al., 2021; Mills et al., 2020; Roth et al., 2021; Shahid et al., 2020). Die Bewohner und Bewohnerinnen von Pflegeheimen hatten im Vergleich zu Personen gleichen Alters, die nicht in einer Pflegeeinrichtung wohnten, sogar ein noch höheres Morbiditäts- und Mortalitätsrisiko bei SARS-CoV-2 Infektionen (Brown et al., 2021; Fisman et al., 2020). Dies hatte den Hintergrund, dass wenn es Infektionen in einer Pflegeeinrichtung gab, eine rasche Weiterverbreitung innerhalb der Einrichtungen erfolgen konnte und es schnell zu lokalen Ausbrüchen kam. Begünstigende Faktoren hierfür waren beispielweise die räumliche Nähe und enge physische Kontakte zwischen Bewohner und Bewohnerinnen bei nicht ausreichender Belüftungssituation, durch Unterbringung in Mehrbettzimmern, Nutzung von Gemeinschaftsräumen und Teilnahme an Gruppenaktivitäten. Zudem bestand ebenfalls ein enger physischer Kontakt zwischen dem Pflegepersonal und Bewohner und Bewohnerinnen, da diese oft Hilfe bei der Durchführung von Alltagsfunktionen (Essen, Waschen, Transfer, etc.) benötigen. Insbesondere Bewohner und Bewohnerinnen mit Demenz oder anderen Gründen für eine Einschränkung der kognitiven Fähigkeiten konnten bestehende Symptome ggf. nicht äußern, sodass die Symptome erst verzögert wahrgenommen wurden und Maßnahmen wie Testung, Isolation und der Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) verzögert umgesetzt werden konnten (Brainard et al., 2021; Burki, 2020; Robert Koch Institut, 2021). Verstärkt wurde dies zu Beginn der Pandemie mit der limitierten Verfügbarkeit von PSA, vor allem von „filtering face piece“ (FFP2) Masken und

dem medizinischen Mund Nasen Schutz (MNS), sowie nicht ausreichenden Testkapazitäten zur frühzeitigen Erkennung von SARS-CoV-2 Infektionen.

Die Schutzmaßnahmen durch Abschirmung der Bewohner und Bewohnerinnen von der Außenwelt hatten jedoch auch Nebeneffekte. So vereinsamten viele Bewohner und Bewohnerinnen durch die fehlenden Besuche ihrer Angehörigen. Viele Menschen mussten alleine bzw. ohne Anwesenheit ihrer Angehörigen sterben. Auch soziale Aktivitäten mit anderen Bewohnern und Bewohnerinnen, wie Spielegruppen, gemeinsames Singen oder Musizieren, fanden lange Zeit nicht oder nur sehr eingeschränkt statt. Dies führte zur sozialen Isolation, Langeweile und zu psychischen Krankheiten oder Nebeneffekten wie Depression, Agitiertheit, aggressivem Verhalten und Ängsten (Elsbernd, 2021; Yang et al., 2022). Die körperliche Aktivität wurde durch den Wegfall von Gruppenaktivitäten oder eingeschränkte Nutzung von Gymnastikhallen reduziert, was bei manchen Bewohnern und Bewohnerinnen zu Mobilitätsverlusten geführt hat (Mills et al., 2020).

Weiterhin darf auch das Personal, welches in Pflegeheimen arbeitet, nicht vergessen werden. Durch die Pandemie stieg in vielen Pflegeheimen die Arbeitsbelastung durch kranke Bewohner und Bewohnerinnen, die mehr Pflegebedarf benötigten, durch erkranktes Personal und durch die zusätzlich nötigen Schutzmaßnahmen. Auch stieg die emotionale und psychische Belastung des Personals durch die Maßnahmen sowie durch die vielen Todesfälle unter Bewohner und Bewohnerinnen. Zudem war das Personal selbst einer hohen Infektionsgefahr ausgesetzt, was möglicherweise zu Ängsten/emotionaler Belastung führte (Blanco-Donoso et al., 2021).

Die oft engen räumlichen Gegebenheiten in Pflegeheimen begünstigen die Verbreitung von beispielsweise luftgetragenen Infektionen wie mit SARS-CoV-2. SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über Tröpfchen, sowie über virushaltige Aerosole übertragen. Diese werden unter anderem beim Atmen, Sprechen, Niesen und Husten ausgestoßen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; Wang et al., 2021). Die indirekte Kontaktübertragung über kontaminierte Oberflächen oder Gegenstände spielt nach aktuellem Wissensstand eine eher untergeordnete Rolle (ECDC, 2022). Übertragungen durch Tröpfchen finden vor allem im Nahfeld einer Person (bis ca. 1,5 m) statt, Aerosole und darin enthaltene Viruspartikel können jedoch über längere Zeit im Raum bestehen bleiben, sodass hier ebenfalls eine Infektionsgefahr im Fernfeld (>1,5 m) besteht. Diese bleibt auch nach Verlassen des Raumes einer infektiösen Person bestehen. Allerdings gibt es fließende Übergänge zwischen Tröpfchen- und luftgetragenen Infektionen, sodass eine strikte Unterscheidung für Infektionen im Nah- und Fernfeld nicht möglich bzw. sinnvoll ist (Birmili, 2021).

Eine verbesserte Belüftung kann die Zeit, die ausgeatmete Tröpfchen bzw. Aerosole im Raum verbleiben, reduzieren (Somsen et al., 2020). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass in schlecht belüfteten Räumen eine potentielle Infektionsgefahr durch die Einatmung von infektiösen Aerosolen besteht, da luftgetragene Erreger über einen längeren Zeitraum im Raum verbleiben können. Die Belüftung kann durch natürliche Lüftung (NV), meist über Fenster oder Türen, mechanische Lüftung (MV), meist über Raumlüftungstechnische Anlagen (RLT Anlagen) oder eine Kombination aus beiden in Form von hybrider Lüftung erfolgen.

Kohlenstoffdioxid (CO₂), ein Endprodukt der Atmung, wird zusammen mit weiteren Partikeln, die potentiell virus-/erregerhaltig sein können, ausgeatmet. Die CO₂ Konzentration wird deswegen oft als Indikator für die Innenraumluftqualität (IAQ) genutzt und als Surrogatparameter für das Übertragungs- und Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 oder andere luftübertragene Erreger herangezogen (Di Gilio, 2021; Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003; Shendell et al., 2004). Ursprünglich wurde ein Referenzwert der CO₂ Konzentration von 1000 ppm von Max von Pettenkofer als Maximalwert für die Innenraum CO₂ Konzentration vorgeschlagen und daraus abgeleitet, die notwendigen Luftwechselraten pro Person. Er wollte mit diesem Grenzwert vor allem möglichen Konzentrationsstörungen von Schüler und Schülerinnen vorbeugen (Pettenkofer, 1858). In Deutschland werden CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich eingestuft, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte, 2018). Die CO₂ Konzentration kann vergleichsweise einfach und günstig mit CO₂ Messgeräten gemessen werden. Die Verwendung der CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko hat jedoch auch Limitationen. Nach einem gewissen Zeitraum wird ein „steady state“ der CO₂ Konzentration erreicht, die Menge an virushaltigen Partikeln, die eine empfängliche Person einatmet, steigt jedoch kontinuierlich mit der Zeit, auch wenn die Konzentration der Partikel selbst

gleichbleibt. Kriegel et al. schlagen deswegen vor, die CO₂ Dosis (ppm*h) als möglichen Surrogatparameter zur Abschätzung des Infektionsrisikos zu nutzen (Kriegel et al., 2021).

Im Verlauf der Pandemie wurde viel zu möglichen Schutzmaßnahmen der Pflegeheim Bewohner und Bewohnerinnen und des Personals geforscht, um weitere Schließungen mit den negativen Konsequenzen und Ausbrüche zu verhindern, jedoch ist insbesondere über die Belüftungssituation in Pflegeheimen nur wenig bekannt. Als Faktoren, die einen SARS-CoV-2 Ausbruch begünstigen können, wurden u.a. die Schwierigkeit symptomatische Bewohner und Bewohnerinnen zu identifizieren, Personal, welches trotz Symptomen arbeitet bzw. in verschiedenen Einrichtungen arbeitet und so die Weiterverbreitung zwischen verschiedenen Pflegeheimen begünstigt, beschrieben. Neben der Bereitstellung der PSA ist ebenfalls die Schulung der richtigen Verwendung, das An- und Ablegen, essentiell (Brainard et al., 2021).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass gute infektionspräventive Konzepte für Pflegeheime nötig sind, um Bewohner und Bewohnerinnen und Personal von Pflegeheimen vor SARS-CoV-2 Infektionen und möglicherweise zukünftigen Pandemien bestmöglich zu schützen und um weitere Lockdowns zu verhindern.

Ziel des Scoping Reviews

Das Ziel dieses Scoping Reviews war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation und die bebaute Umwelt in Pflegeheimen, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention luftgetragener Infektionen bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Methoden

Bezüglich der Literaturrecherche wurde vom Vorgehen der Scoping Reviews zu den Schulen und Kindergärten abgewichen: In dem Literatur Review von Benbow (Benbow, 2022), wurde ebenfalls die Fragestellung nach dem Einfluss von baulichen Faktoren und technischen Kontrollen zur Infektionsprävention von Krankheiten wie COVID-19 in Langzeitpflegeeinrichtungen untersucht. In dieser Publikation wurde eine Literaturrecherche durchgeführt mit den in das Englische übersetzten Suchbegriffen: „Langzeitpflegeeinrichtungen“, „Pflegeheime“, „Merkmale von Pflegeheimen“, „Gemeinschaftsunterkünfte“, „bauliche Umgebung“, „COVID-19“, „Infektionskontrolle“, „Kohortierung“, „nichtpharmakologische Maßnahmen“ und „technische Kontrollen“. Bei den technischen Kontrollen wurden die Faktoren „Lüftung“, „räumliche Trennung“, „physikalische Barrieren“, „Händehygiene“, „Zonierung“ und „Einzelzimmer“ betrachtet. Zudem wurde zur Identifikation weiterer Studien zur baulichen Umwelt eine Auswertung mehrerer Reviews vorgenommen. Die meisten Studien untersuchten Faktoren wie Isolation, Kohortierung und Personal. Es wurden wenige Studien zu Gebäude- und Umweltfaktoren identifiziert.

Aufgrund der großen Relevanz haben wir unsere Literaturrecherche basierend auf diesem Review durchgeführt und haben in unserer Recherche den Recherchezeitraum nach der Publikation von Benbow (Onlinepublikation am 09.06.2022) betrachtet. Zusätzlich wurden zwei Studien eingeschlossen, die 2022 veröffentlicht wurden und nicht in dem Review von Benbow berücksichtigt wurden, möglicherweise aufgrund eines sich überschneidenden Peer-Review-Verfahrens. Unsere Literaturrecherche wurde in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect im Zeitraum 06.01.2023-13.01.2023 durch eine Person durchgeführt. Publikationen, welche im Zeitraum 12.03.2022 - 06.01.2023 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Die Kombination der folgenden Schlüsselwörter (übersetzt in Englische) wurde verwendet: „Pflegeheim“, „Altenheim“, „Langzeitpflegeeinrichtung“, „SARS-CoV-2“, „COVID-19“, „Influenza“, „luftübertragen“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Transmission“, „Lüftung“, „Luftqualität“, „Luftwechselrate“.

Ergebnisse

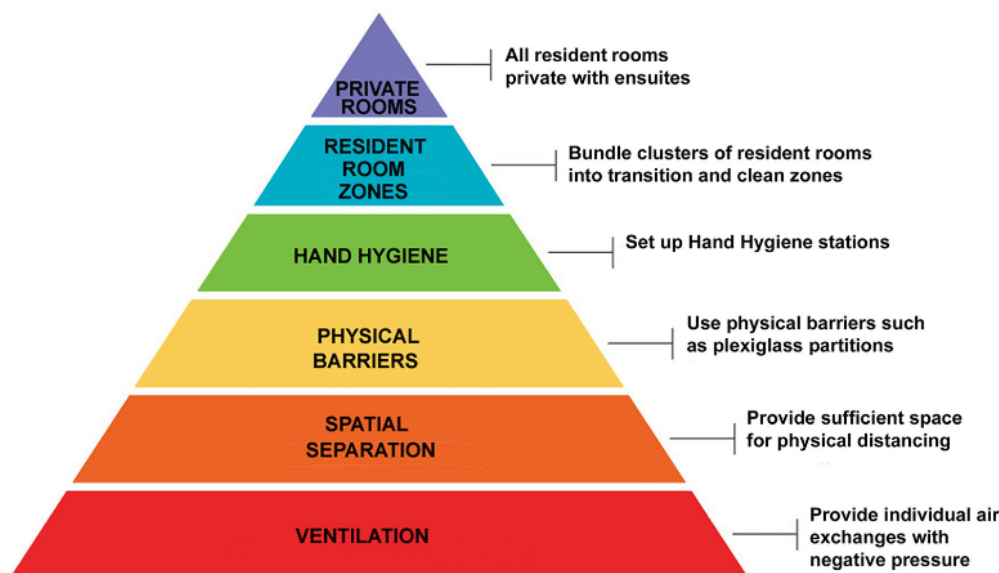
Da unser Review auf der Publikation von Benbow aufbaut, erfolgt zunächst eine ausführliche Zusammenfassung der Ergebnisse von Benbow (Benbow, 2022). Im Folgenden wird auf die zusätzlich identifizierten Studien eingegangen.

Der Autor hat eine Pyramide der „Occupation Safety and Health Administration“ (OSHA), die aus drei Verteidigungsprinzipien gegen Gefährdungen am Arbeitsplatz aufgebaut ist, weiterentwickelt: An der Spitze stehen technische Kontrollen, gefolgt von administrativen Kontrollen und Kontrollen der Arbeitspraktiken und

als Basis die persönliche Schutzausrüstung. Untenstehend in der Pyramide sind breiter verfügbare, aber in der Umsetzung von Einzelpersonen abhängige Maßnahmen, die dadurch weniger wirksam sein können, aufgeführt. Obenstehend die technischen Kontrollen, die durch die Integration in die Infrastruktur des Gebäudes als am wirksamsten angesehen wurden. Durch den Autor wurde entsprechend dieser Hierarchie eine Pyramide der technischen Kontrollen zur Infektionsprävention in Langzeitpflegeeinrichtungen erstellt (Abbildung 45). Mit technischen Kontrollen sind hier mechanische oder physikalische Maßnahmen bezeichnet, die das Infektionsrisiko für Bewohner und Bewohnerinnen, Personal und Besuchende reduzieren können, indem sie den Gefahrenstoff eliminieren oder eine Barriere zwischen Individuum und Gefahrenstoff darstellen (Benbow, 2020). Die (vorläufige) Hierarchie innerhalb dieser Pyramide wurde in Kombination aus einer Literaturrecherche, der Erfahrung bzw. Einschätzung des Autors und aus Ergebnissen einer Umfrage innerhalb von Langzeitpflegeeinrichtungen erstellt.

Im Folgenden werden die sechs Bestandteile der in der von Benbow entwickelten Pyramide, sowie die genannten Studien zusammengefasst.

Abbildung 45
Pyramide der technischen Kontrollen zur Infektion in der Langzeitpflege nach Benbow



Quelle: Benbow, 2020

1) Lüftung

Der Autor betrachtete die Lüftung als Basismaßnahme der technischen Kontrollen und verwies auf die Notwendigkeit der fachgerechten Nutzung und Wartung, vor allem bei der mechanischen Lüftung. Insbesondere bei älteren Einrichtungen bestünden oft niedrige Luftwechselraten. Zur Verbesserung der Belüftung könnten bestehende Systeme aufgerüstet werden und verschiedene Räume sollten separat mit Außenluft belüftet werden, mit risikoadaptierter Einstellung der Belüftungsraten. Es wurde beschrieben, dass Luftreinigungsgeräte zusätzlich in hochfrequentierten Räumen wie Speisesaal, Aktivitätsraum und Lounge genutzt werden könnten (Benbow, 2022; Mousavi et al., 2020).

Beispielhaft wurde ein SARS-CoV-2 Ausbruch in einem niederländischen Pflegeheim beschrieben, in welchem ein Großteil der Bewohner und Bewohnerinnen und die Hälfte des Personals von nur einer Station mit SARS-CoV-2 infiziert waren und das Virus auf Objekten der Klima-/Lüftungstechnik nachgewiesen wurde. Auf dieser Station gab es ein neues Lüftungssystem, das rezirkulierte, nicht gefilterte Luft in Kombination mit Außenluft zuführte, sodass vermutet wurde, dass hier eine aerogene Übertragung durch nicht adäquate Belüftung erfolgte. Auf den anderen Stationen hingegen, auf denen die Lüftung mit reiner Außenluft erfolgte, traten keine Fälle auf (Benbow, 2022; de Man et al., 2021). Zudem nannte der Autor eine Studie, in welcher die mechanische Lüftungsanlage („Heating, Ventilation and Air-Conditioning“/ HVAC) Anlage in einer speziellen Isoliereinheit einer Fachpflegeeinrichtung u.a. mit zusätzlichen Filtern nachgerüstet wurde, sowie ein

konstanter Unterdruck in den Isolierzimmern herrschte. Hier wurde keine Übertragung von SARS-CoV-2 zwischen den Bewohner und Bewohnerinnen oder Personal festgestellt (Benbow, 2022; Miller et al., 2021).

2) Räumliche Trennung

Die räumliche Trennung und das Einhalten einer physischen Distanz wurde von Benbow auf der zweiten Stufe der Pyramide dargestellt. In Bezug auf die Pflegeheime bedeutet dies, eine Reduzierung der engen Kontaktsituationen zwischen den Bewohner und Bewohnerinnen zum Beispiel durch Vermeidung der Mahlzeiteinnahme in großen Gruppen, Reduktion der Gruppenaktivitäten und ggf. der Isolierung einzelner Bewohner und Bewohnerinnen zu gewährleisten. Der Autor verwies hier auf eine schon vor der Pandemie veröffentlichte Studie, in der beschrieben wurde, dass in Speiseräumen und v.a. in Aktivitätsräumen viele Bewohner und Bewohnerinnen auf sehr engem Raum zusammensaßen, wodurch Übertragungen ermöglicht werden konnten. Begrenzt große Räume könnten zeitlich versetzt genutzt werden bzw. Menschenansammlungen sollten durch geeignetes Arrangieren des Mobiliars vermieden werden (Algase et al., 2011; Benbow, 2022). Während der Pandemie wurde das Prinzip der räumlichen Trennung in vielen Einrichtungen umgesetzt. Der Autor nahm hier Bezug auf eine chinesische Veröffentlichung, in der beschrieben wurde, dass die Bewohner und Bewohnerinnen die Mahlzeiten nur in kleinen Gruppen einnahmen bzw. möglichst in den Bewohnerzimmern alleine essen sollten. Darüber hinaus sollten Außenbereiche genutzt werden, die gut zugänglich sein müssen. Statt Gruppenaktivitäten könnten Tele-Angebote bereitgestellt werden um soziale Interaktionen ohne direkten Kontakt zu ermöglichen (Benbow, 2022; Wang, 2021). Gruppenaktivitäten sollten nur innerhalb einer Einheit bzw. von Bewohner und Bewohnerinnen einer Ebene durchgeführt werden und es sollten so wenige Personen wie möglich teilnehmen. Zudem sollte ein Abstand von mindestens 1 bis 2 m eingehalten werden. Um dies zu gewährleisten sollten Räume, die gemeinschaftlich genutzt werden, ausreichend groß konzipiert werden (Benbow, 2022; Chu et al., 2020). Weiterhin ist es wichtig, dass das Personal ausreichend Platz zur Verfügung hat, um beispielsweise in Pausenräumen Abstand halten zu können.

3) Physikalische Barrieren

Im Folgenden Abschnitt beschrieb der Autor Beispiele physikalischer Barrieren, welche in Pflegeheimen implementiert wurden. Es gab Einrichtungen, die den Speiseraum beispielsweise durch eine Plexiglaswand geteilt haben, um die Kohorten zu verkleinern. Hier wurde allerdings darauf hingewiesen, dass bei solchen Maßnahmen die Belüftung aller Bereiche weiterhin gewährleistet werden muss (Benbow, 2022; Parker-Pope, 2021). Darüber hinaus wurden Maßnahmen zur räumlichen Trennung von Besuchende und Bewohner und Bewohnerinnen beschrieben. So wurden beispielsweise neue Besucherräume geschaffen, indem Container oder kleine „Sommerhäuser“ mit Plexiglastrennwänden oder Ähnlichem aufgestellt wurden, sodass Begegnungen ermöglicht wurden ohne dass direkter Kontakt bestand (Benbow, 2020, 2022).

4) Händehygiene

Auf der vierten Stufe der Pyramide beschrieb der Autor die Notwendigkeit ausreichend viele, gut sichtbare und gut erreichbare Stationen zur Durchführung der Händehygiene zu errichten. In Studien wurde gezeigt, dass die Händehygiene Compliance stieg, wenn ausreichend Möglichkeiten zur Durchführung der nötigen Händedesinfektion (HD) in unmittelbarer Nähe verfügbar waren. Die Spender mussten darüber hinaus gut sichtbar sein, sodass die richtige Platzierung evaluiert werden sollte (Benbow, 2022; Cai et al., 2021; Hammerschmidt & Manser, 2019).

Im Kontext der SARS-CoV-2 Pandemie nahm der Autor hier weiterhin Bezug auf eine Studie, in der gezeigt wurde, dass in Einrichtungen, in denen die COVID-19 Prävalenz niedrig war, die HD Compliance signifikant höher war als in Einrichtungen mit höheren COVID-19 Prävalenzen (Benbow, 2022; Telford et al., 2021).

5) Bewohnerzimmerzonen – Kleine separate, eigenständige Einheiten

Der Autor nannte hierzu verschiedene Publikationen, in welchen empfohlen wurde, die Bewohner und Bewohnerinnen zu kohortieren oder Quarantäne-/kontaminierte-, Übergangs- und reine Bereiche zu schaffen (Benbow, 2022; Wang, 2021; Yen et al., 2020). Im Folgenden Abschnitt wurde das „Haushaltsmodell“ vorgestellt: Die Unterbringung von Bewohner und Bewohnerinnen in sich geschlossenen kleinen

Gruppen/Kohorten, mit Einzelzimmern und Gemeinschaftsbereichen, die sich, wenn nötig, räumlich separieren lassen, ermöglichte eine bessere Infektionsprävention und ein leichteres Ausbruchsmanagement. Darüber hinaus sollte ein gut erschlossener Zugang zu einem Außenbereich bestehen (Anderson, 2020; Benbow, 2022). Benbow nannte noch weitere Autoren, die beschrieben, dass in Heimen mit Haushaltsmodellen („Green houses“) weniger SARS-CoV-2 Infektionen und Todesfälle auftraten als in traditionellen Häusern mit großen Einheiten (Benbow, 2022; Margolies, 2020; Zimmerman et al., 2021).

Durch das Design in verschiedenen Zonen können infektiöse Bewohner und Bewohnerinnen bzw. das Personal einer Einheit isoliert und von den nicht Infizierten getrennt werden. Größere Einheiten sollten in kleinere, eigenständige Einheiten unterteilt werden (Kohorten Bildung) (Benbow, 2022).

6) Einzelzimmer

An der Spitze der Pyramide stellte der Autor die Unterbringung der Bewohner und Bewohnerinnen in Einzelzimmern. In einer kanadischen Studie waren die Inzidenz von SARS-CoV-2 Infektionen, sowie die Todesrate bei Pflegeheim Bewohner und Bewohnerinnen, die in Mehrbettzimmern untergebracht waren höher als wenn diese Einzelzimmer bewohnten. Die SARS-CoV-2 Inzidenz in Einrichtungen mit hohem „Überfüllungsindex“, basierend auf der Anzahl an Bewohner und Bewohnerinnen pro Zimmer im Vergleich zu Einrichtungen mit niedrigem „Überfüllungsindex“ lag bei 9,7% vs. 4,5% und die Mortalitätsrate bei 2,7% vs. 1,3% (Benbow, 2022; Brown et al., 2021). In einer anderen Publikation, die dieselbe Studienkohorte von Pflegeheimen umfasste, wurden in Pflegeeinrichtungen, die ältere Konstruktionsstandards mit Mehrbettzimmern und zentralen Gemeinschaftsräumen aufwiesen, ein höheres Risiko für einen COVID-19 Ausbruch festgestellt (Benbow, 2022; Stall et al., 2020). Der Autor beschreibt weitere Studien, in denen die Wahrscheinlichkeit für eine SARS-CoV-2 Infektion bzw. einen COVID-19 Ausbruch in Pflegeheimen mit Mehrbettzimmern größer war (Ibrahim et al., 2021; Liu et al., 2020) bzw. die meisten Pflegeheimbewohner und -bewohnerinnen bevor sie an COVID-19 erkrankten, dem Virus durch einen infizierten Zimmernachbarn exponiert waren (Kain et al., 2021). Auch die Sanitäreinrichtungen sollten nicht durch mehrere Bewohner und Bewohnerinnen geteilt werden (Benbow, 2022).

Darüber hinaus wurden durch unsere Literaturrecherche vier weitere Studien identifiziert, die den Einschlusskriterien entsprachen. Die identifizierten Studien sind allesamt Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen und sind in **Tabelle 28** zusammengefasst. In der Studie von Baudet et al. erfolgten CO₂ Messungen in Gemeinschaftsräumen bzw. Schlafzimmern von Bewohner und Bewohnerinnen. Die durchschnittlichen CO₂ Konzentrationen lagen zwar unter 1000 ppm, allerdings lagen die Maximalwerte insbesondere während der Nutzung der Räume bei fast 2000 ppm. Dies spricht für eine nicht ausreichende Belüftung der Räume. In der Studie wurde nicht beschrieben wie viele Personen sich zum Zeitpunkt der Messung in den Räumen befanden bzw. welcher Aktivität sie nachgingen (Baudet et al., 2022). In einer anderen Studie wurden basierend auf einem realen Ausbruchsgeschehen bei dem eine Luftübertragung von SARS-CoV-2 vermutet wurde, die Luftwechselraten (air change rates/ ACR) anhand der CO₂ Tracer Gas Methode in verschiedenen Räumen eines Pflegeheimes berechnet. Die ACR war in einem Gemeinschaftsraum am höchsten (6,8 h⁻¹), insgesamt waren die Luftwechselraten jedoch niedrig. Durch Fensteröffnung konnte sie um den Faktor 2,2 - 5,7 erhöht werden (Ishigaki et al., 2022). Auch in der Studie von Vuylsteke et al. wurde im Rahmen einer Ausbruchsanalyse in einem belgischen Pflegeheim die Lüftungssituation anhand von CO₂ Messungen und Berechnungen der Luftwechselraten anhand der CO₂ Tracer Gas Methode vorgenommen. Die berechneten Luftwechselraten lagen zwischen 2,9 - 3,6 h⁻¹ bei zwei Räumen, die zum Zeitpunkt der Messungen natürlich belüftet wurden bzw. zwischen 1,8 - 2,3 h⁻¹ in Räumen ohne Außenluftzufuhr. Die Autoren postulieren, dass die nicht ausreichende Lüftungssituation zu dem Ausbruchsgeschehen beigetragen hat (Vuylsteke et al., 2022). Hurras et al. vermuten die Verbreitung von SARS-CoV-2 in einem Ausbruch über das Lüftungssystem. Hier könnte ein möglicher Kurzschluss zwischen Zu- und Abluft, sowie eine Verteilung von kontaminierter Zuluft über den Flur in Bewohner und Bewohnerinnenzimmer zum Ausbruch beigetragen haben (Hurras et al., 2022).

Tabelle 28
Beobachtungsstudien

Referenz	Studientypus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse
(Baudet et al., 2022)	Beobachtungsstudie	4 Pflegeheime, Frankreich, 2018 und 2019 in Sommer und Winter	Mechanische Belüftung. Luftwechselrate in Gemeinschaftsräumen: 0,4 +/- 0,4 Vol/h (Bereich 0,1-1,0) und in Schlafzimmern: 0,4 +/- 0,3 Vol/h (Bereich 0,2-1,0). Messung der CO ₂ Konz. (1) während Nutzung und (2) während nicht-Nutzung. Messungen der CO ₂ Konzentration 10 minütlich über einen Zeitraum von 4,5 Tagen.	CO ₂ Konzentration	<u>Durchschnittliche CO₂ Konz +/- SD (Min.-Max.):</u> 624 +/- 198 ppm (334-1871 ppm). <u>Gemeinschaftsräume:</u> (1) 600 +/- 162 ppm (361-1871 ppm); (2) 503 +/- 144 ppm (334-1843 ppm). <u>Schlafzimmer:</u> (1) 762 +/- 203 ppm (365-1451 ppm); (2) 629 +/- 174 ppm (345-1322). Deutlich niedrigere CO ₂ Konzentration während nicht-Nutzung. Anzahl der Personen und Aktivität wurde nicht beschrieben.
(Ishigaki et al., 2022)	Beobachtungsstudie	1 Pflegeheim, Japan, August 2021	Basierend auf realem Ausbruchsgeschehen 04-05/21: CO ₂ Messungen mit Tracer Gas Methode zur Schätzung der ACR in 5 Räumen. Untersuchung der Luftströmung zwischen einem Einzelzimmer (EZ) und Gemeinschaftsraum. Verifizierung der gemonitorten Aerosol Advektion mittels numerischer Computer Simulationen. Mechanische Ventilation, zusätzlich natürliche Ventilation möglich.	CO ₂ Konzentration	ACR zwischen 2,0 – 6,8 h ⁻¹ . Niedrigste Werte in einem Mehrbettzimmer, höchste Werte in einem Gemeinschaftsraum. Durch vermehrte Fensteröffnung wurde die ACR um den Faktor 2,2 - 5,7 erhöht. Aerosol Advektion von einem EZ, welches teilweise nur durch einen Vorhang vom Flur abgetrennt wurde in einen angrenzenden Gemeinschaftsraum. Zum Zeitpunkt des Ausbruches war ein SARS-CoV-2 positiver Bewohner in diesem EZ isoliert, sodass die Transmission durch infektiöse Aerosole aus dem EZ, die u.a. in den angrenzenden Flur und Gemeinschaftsraum gelangten, beeinflusst wurde.
(Vuylsteke et al., 2022)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Pflegeheim, 4 Gemeinschaftsräume, Belgien Dezember 2020 bzw. Sommer 2021	Ausbruchsanalyse (Winter 2020). Im Verlauf CO ₂ Messungen im Sommer 2021 vor und nach Einbringung von CO ₂ Tracer Gas und Berechnung der Lüftungsrate. 2 Räume mit MV und möglicher NV, 2 Räume ohne direkte Zufuhr von Außenluft. Während Messungen keine oder wenige Personen anwesend.	SARS-CoV-2 Infektion, CO ₂ Konzentration	127 (77%) der Bewohner und Bewohnerinnen und 40 Beschäftigte infiziert. Infektionen größtenteils i.R. Superspreading Event. Durchschnittliche Basis CO ₂ Konz. 657-846 ppm, Maximalwerte 708 – 897 ppm. Berechnete Luftwechselraten 2,9 – 3,6 h ⁻¹ bei NV bzw. 1,8 – 2,3 h ⁻¹ in Räumen ohne Außenluftzufuhr.
(Hurras et al., 2022)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Pflegeheim, Deutschland, Jan- Feb. 2021	Ausbruchsanalyse: 2 Gebäudeblöcke, das Personal war einem Gebäudeblock zugeteilt. FFP2 Pflicht für Personal, regelmäßige Screeningtestungen für Personal und Bewohner und Bewohnerinnen. Keine Gruppenaktivitäten. Kontakte während Mahlzeiten (vor Ausbruch). Probenentnahme von diversen Stellen des Belüftungssystems 3 Monate nach Ausbruch. Lüftungssystem mit Zufuhr von 100% filtrierter Außenluft, Zu- und Abluftöffnung auf dem Dach in räumlicher Nähe. Abluft jeweils über Sanitärzelle der Bewohnerzimmer durch Unterdruck; Zuluft über Flure, darüber Verteilung in Bewohnerzimmern und Gemeinschaftsräume.	SARS-CoV-2 Infektion	64 von 67 Bewohner und Bewohnerinnen und 27 von ca. 60 Beschäftigten infiziert. Wahrscheinliche Verbreitung des Virus über Lüftungssystem. Möglicher Kurzschluss zwischen Ab- und Zuluft bei ungünstigen Wetterbedingungen, welche kurz vor und während des Ausbruches bestanden, sowie mögliche Kontamination der Bewohner- und Gemeinschaftsräume über Verteilung der Zuluft über Flur. Möglicher Eintrag über asymptomatisches Personal.

Notiz: CO₂ Konz.= CO₂ Konzentration, NV= natürliche Lüftung, MV= mechanische Lüftung, SD= Standardabweichung, Min.= Minimum, Max.=Maximum, ACR= air change rate, EZ= Einzelzimmer
Quelle: Charité

Diskussion

Besonders in den ersten Wellen der SARS-CoV-2 Pandemie waren viele Pflegeheime besonders schwer betroffen (Gorges & Konetzka, 2020; Hamilton et al., 2021). Die oft multimorbiden, älteren Bewohner und Bewohnerinnen waren insbesondere vor Einführung der Impfung sehr suszeptibel für eine Infektion mit dem Virus und es kam zu vielen lokalen Ausbrüchen mit hoher Morbidität und Mortalität der Bewohner und Bewohnerinnen. Im Zeitraum März 2020 bis Dezember 2021 wurden insgesamt 7794 Ausbrüche mit 177.696 Fällen bei den >60-Jährigen in Pflegeheimen gemeldet. Der Fall-Verstorbenen Anteil lag hier bei den >60-Jährigen bei 19,5%. In den ersten beiden Pandemiewellen waren die Zahlen der Fälle pro Ausbruch sehr hoch und sanken in den Wellen 3 und 4 trotz hoher SARS-CoV-2 Inzidenzen in der Gesamtbevölkerung ab, ebenso sank der Fall-Verstorbenen Anteil im Verlauf (Said et al., 2022).

Es wurden viele Schutzmaßnahmen, wie Schließungen der Pflegeheime für Besuchende etabliert, um einen Eintrag des Virus in die Pflegeheime zu verhindern. Dies hatte jedoch auch negative Auswirkungen, wie emotionale, psychische und physische Belastungen der Bewohner und Bewohnerinnen und des Personals (Elsbernd, 2021; Mills et al., 2020; Yang et al., 2022). Im Vergleich zu anderen systemrelevanten Infrastrukturen war zu Beginn der Pandemie das Risiko einer SARS-CoV-2 Infektion für Personal oder Bewohner und Bewohnerinnen von Pflegeeinrichtungen noch höher als beispielsweise für Kinder und Pädagogische Fachkräfte in Kindergärten. Im Zeitraum 09.10.2020 bis 08.01.2021 infizierten sich 3611 bzw. 1652 pro 100.000 Bewohner und Bewohnerinnen bzw. Personal von Pflegeeinrichtungen, wohingegen 75 und 464 von je 100.000 Kindern und Erzieherinnen aus Kinderbetreuungseinrichtungen infiziert wurden (Heudorf & Gottschalk, 2021). Pflegeheime stellen im Vergleich zu den anderen betrachteten Infrastrukturen (Schulen, Kindergärten, Arztpraxen) ein besonderes Setting für mögliche Erregerübertragungen dar. Es handelt sich um Wohnunterkünfte, in denen Alltagsaktivitäten wie Wohnen, Schlafen, Essen, soziale Interaktionen stattfinden, jedoch ist gleichzeitig je nach Allgemeinzustand der Bewohner und Bewohnerinnen eine intensive pflegerische Versorgung nötig. Bewohner und Bewohnerinnen sind meist sehr alt, oft multimorbide und vulnerabel für viele Infektionskrankheiten. Dies sollte bei der Umsetzung von infektionspräventiven Maßnahmen berücksichtigt werden. Viele Pflegeheimbewohner und -bewohnerinnen müssen zudem zeitweise in ein Krankenhaus verlegt werden und können sich dort potentiell mit verschiedenen Erregern infizieren. In einer Studie wurden 67,7% von 694 Pflegeheimbewohner und -bewohnerinnen mindestens einmal während der ca. 10-wöchigen Studienperiode in der SARS-CoV-2 Pandemie ins Krankenhaus aufgenommen (Hamilton et al., 2021), sodass Transmissionen, insbesondere durch asymptomatische Carrier oder präsymptomatisch infizierte Bewohner und Bewohnerinnen bei Rückverlegungen ins Pflegeheim möglich waren. Auch Personal, welches Kontakt zu mehreren Pflegeheimen hatte, konnte zu Übertragungen zwischen den Einrichtungen beitragen (Hamilton et al., 2021). Manche Bewohner und Bewohnerinnen sind bei Bettlägerigkeit oder Demenz nicht fähig bestimmte Maßnahmen umzusetzen oder verstehen nicht die Notwendigkeit sich selbst durch den Einsatz von Masken zu schützen und sind so auf den einseitigen Schutz durch das Personal oder ihre Mitbewohner und -bewohnerinnen angewiesen. Bei einem Ausbruch zu Beginn der Pandemie in einem deutschen Pflegeheim hielten sich 3 Bewohner und Bewohnerinnen aufgrund ihrer Demenz nicht an die Quarantänenvorgaben im Rahmen des Ausbruchmanagements und trafen sich weiterhin mit anderen Bewohnern und Bewohnerinnen des benachbarten Pflegeheimes. Dies konnte zur Virusübertragung beitragen (Roth et al., 2021). Die Bewohner und Bewohnerinnen konnten sich bei einer Unterbringung in Mehrbettzimmern oftmals nicht separieren. Zudem finden viele Aktivitäten in Gruppen statt, wodurch viele enge Kontaktsituationen entstehen.

Die gebaute Umwelt kann das Auftreten von SARS-CoV-2 Fällen bzw. Ausbruchsgeschehen und die Ausbruchsschwere in Pflegeheimen beeinflussen. Im Gegensatz zu den Personen abhängigen Faktoren wie das Alter oder Vorerkrankungen, können Faktoren der gebauten Umwelt, zum Beispiel in Bezug auf Konstruktionsdesign und Lüftung, sowie strukturelle bzw. organisatorische Aspekte, leichter geplant werden und im Rahmen von infektionspräventiven Strategien genutzt werden. Die Strategien können in Maßnahmen, die den Eintritt von SARS-CoV-2 in Pflegeeinrichtungen reduzieren, Maßnahmen, die die Weiterverbreitung innerhalb einer Einrichtung reduzieren und Maßnahmen zum Management von Infizierten und Erkrankten gegliedert werden (Wang, 2021). Manche Maßnahmen beeinflussen gleichzeitig mehrere infektionspräventive Strategien, sodass eine strikte Unterteilung nicht möglich ist. Die infektionspräventiven Maßnahmen müssen so gut wie möglich dem Schutz der oft vulnerablen Bewohner und Bewohnerinnen, sowie dem Personal

angepasst werden, allerdings sollten negative Effekte, die durch einige Schutzmaßnahmen selbst entstehen, bestmöglich vermieden werden.

Im Rahmen dieses Scoping Reviews wurde eine Literaturrecherche zur Lüftungssituation bzw. zu Lüftungsmaßnahmen und baulichen Faktoren zur Verringerung des Infektionsrisikos mit SARS-CoV-2 oder anderen luftgetragenen Infektionserregern durchgeführt. Hierbei wurde die Literaturrecherche basierend auf das Literatur Review von Benbow (Benbow, 2022) aufgebaut, da hier eine ähnliche Forschungsfrage untersucht wurde, sodass die Publikation als gute Grundlage für unser Scoping Review angesehen wurde. Zusammengefasst beschrieb Benbow verschiedene Faktoren der bebauten Umwelt bzw. technischer Kontrollen als Bestandteile der Infektionsprävention in Pflegeheimen. Die Lüftung sei essentiell, um die Verbreitung von Aerosolen innerhalb einer Einrichtung zu reduzieren, verschiedene Räume sollten möglichst individuell belüftet werden. Ein häufiges Problem in vielen Einrichtungen mit SARS-CoV-2 Ausbrüchen seien überfüllte Räume gewesen – räumliche Trennungen und physisches Abstandhalten sollten deshalb etabliert werden und hierzu Gruppengrößen bei Gemeinschaftsaktivitäten reduziert werden bzw. die Räumlichkeiten ausreichend groß konzipiert werden. Die Unterbringung sollte möglichst in Einzelzimmern, bzw. kleinen Wohneinheiten erfolgen. Weiterhin müssten sichere Strukturen für Besuche und Dienstleistungen geschaffen werden. Darüber hinaus seien die Implementierung von gut erreichbaren und gut sichtbaren Händehygienestationen wichtig zur Infektionsprävention. Die technischen Kontrollen müssten ein Gleichgewicht zwischen Infektionsprävention und Lebensqualität bieten (Benbow, 2022).

In unserer Literaturrecherche wurden vier zusätzliche Studien identifiziert, die den Einschlusskriterien entsprachen. Aufgrund der kleinen Anzahl von Studien, war es nicht möglich generelle Aussagen für Pflegeheime zur Prävention luftgetragener Infektionen abzuleiten. Eine gute und ausreichende Belüftung, kann die Zeit, die potentiell virushaltige Aerosole in einem Raum verbleiben, reduzieren und somit zur Verringerung des Transmissionsrisikos von luftgetragenen Pathogenen beitragen (Somsen et al., 2020). In zwei der Studien wurde eine direkte Messung der CO₂ Konzentration vorgenommen. In einer dieser Studien waren die untersuchten Räume mechanisch belüftet. Die durchschnittliche CO₂ Konzentration lag hier zwar <1000 ppm, allerdings wurden Maximalwerte bis fast 2000 ppm gemessen, was trotzdem für eine nicht ausreichende Belüftung sprach (Baudet et al., 2022). In der anderen Studie mit CO₂ Messungen in vier Gemeinschaftsräumen eines Pflegeheimes lagen die „Basis“ CO₂ Konzentrationen bei weitgehend ungenutztem Zustand <1000 ppm, die Maximalwerte der CO₂ Konzentration variierten zwischen 708 und 897 ppm und die durchschnittlichen Werte zwischen 657 und 846 ppm. Allerdings wurden die Messungen im Sommer mit Fensterlüftung in zwei der vier Räume durchgeführt, wodurch bei einer guten Belüftungssituation (fast) ohne anwesende Personen laut der Autoren niedrigere CO₂ Konzentrationen in diesen Räumen zu erwarten gewesen wären. Zum Zeitpunkt des Ausbruches im vorangegangenen Winter, vermuten die Autoren eine schlechtere Belüftungssituation aufgrund der kalten Außentemperaturen mit verminderter natürlicher Belüftung, was sicherlich zur massiven Ausbreitung innerhalb des Pflegeheimes mit der Vielzahl an Infektionen beigetragen habe (Vuylsteke et al., 2022). Die CO₂ Konzentration kann relativ einfach und vergleichsweise kostengünstig mittels CO₂ Messgeräten bestimmt werden. Eine Studie hat gezeigt, dass durch den Einsatz von CO₂ Messgeräten im Krankenhaus signifikant kürzere Zeiträume mit CO₂ Konzentrationen > 1000 ppm, sowie niedrigere Maximalwerte vorlagen als zur Ausgangslage bzw. in der Postinterventionsphase (Laurent & Frans, 2022). Hoch frequentierte Bereiche in Pflegeheimen (Gemeinschaftsräume) sollten deswegen vor allem bei natürlicher Belüftung mit CO₂ Messgeräten mit gut sichtbarem Display ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit schnell anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu überprüfen.

In der Studie von Ishigaki wurde basierend auf einem realen Ausbruchsgeschehen in einem japanischen Pflegeheim gezeigt, dass architektonische Faktoren Einfluss auf die Verbreitung von luftgetragenen Infektionserregern haben können: Ein SARS-CoV-2 positiver Bewohner wurde in einem Einzelzimmer isoliert, welches über einen kurzen Flur mit einem Gemeinschaftsraum verbunden war. Allerdings gab es hier keine vollständige räumliche Trennung bzw. Trennung des Luftraumes - zum Teil war das Patientenzimmer nur durch einen Vorhang vom angrenzenden Flur getrennt. Die Autoren postulierten, dass infektiöse Aerosole aus dem Patientenzimmer in den Gemeinschaftsraum gelangten und zur weiteren Virusausbreitung beitrugen. Zusätzlich wurden anhand der CO₂ Tracer Gas Methode die Luftwechselraten in verschiedenen Räumen gemessen. Der Vergleich mit Messungen mit geöffneten Fenstern zeigte, dass durch Fensteröffnung die

Luftwechselraten um den Faktor 2,2 – 5,7 erhöht werden konnten. Dies sollte zur Reduktion von infektiösen Aerosolen in den Innenräumen genutzt werden (Ishigaki et al., 2022).

Die Auswertung einer Studie, in der die Etablierung von infektionspräventiven Maßnahmen in Pflegeheimen in Colorado untersucht wurde, ergab, dass nur 33% der Gemeinschaftsräume bzw. 26% der Wohneinheiten der Pflegeheime mit einer HVAC Anlage ausgestattet waren, mit welcher der Anteil der zugeführten Außenluft reguliert werden konnte. Zwar waren 78% der Einrichtungen mit öffenbaren Fenster ausgestattet, jedoch gaben nur 41% der Pflegeheime an die Fenster zur natürlichen Belüftung zu nutzen. Die Autoren zeigen, dass in vielen Pflegeheimen die Lüftungsempfehlungen der ASHRAE und CDC nicht oder nur teilweise umgesetzt wurden (Goldman et al., 2022). Zusammenfassend ist die Belüftungssituation in vielen Pflegeheimen nicht ausreichend, um das Risiko einer Verbreitung von luftgetragenen Infektionserregern suffizient zu verringern und sollte verbessert werden. Viele weitere Autoren untersuchten den Einfluss verschiedener Maßnahmen auf die Verbreitung von SARS-CoV-2 in Pflegeeinrichtungen bzw. deren Umsetzung. Da jedoch in der Pandemie meistens mehrere Maßnahmen gleichzeitig von den Pflegeheimen angewandt wurden, ist es schwierig spezifische Effekte einer speziellen Maßnahme zuzuschreiben.

Wie auch in dem Review von Benbow beschrieben, beeinflussen bauliche Faktoren wie die Größe bzw. Bettenanzahl einer Einrichtung, sowie das Vorhandensein von Einzel- versus Mehrbettzimmern ein mögliches Infektionsgeschehen. In einer Metaanalyse von 41 Studien zeigten die Autoren, dass Infektionsraten mit SARS-CoV-2 bei Bewohner und Bewohnerinnen in Einrichtungen mit kleineren, getrennten Gebäuden geringer waren als in Einrichtungen in einem großen alleinstehenden Gebäude. Zudem war das Risiko für eine Infektion in insgesamt größeren, städtisch gelegenen Einrichtungen und Einrichtungen mit älteren Gebäudestandards höher. Die Autoren schlussfolgerten, dass Pflegeheime kleiner, aber mit ausreichend Platz zur sozialen Distanzierung designt werden sollten (Kunasekaran et al., 2022). Yang et al. erläutern in ihrem Review von 30 Studien über Faktoren, die mit COVID-19 unter Pflegeheim Bewohner und Bewohnerinnen einhergehen, dass mit einer größeren Bettenanzahl das Risiko für das Auftreten eines COVID-19 Falls steige. Zugleich war bei einer höheren Anzahl an Betten, die als Einzelzimmer konzipiert waren und Pflegeheimen mit mehreren separaten (Unter-) Einheiten das Risiko für eine SARS-CoV-2 Infektion geringer (Yang et al., 2022). Auch Chow postuliert, dass das Gebäudedesign einen Einfluss auf Ausbruchsgeschehen darstelle. So waren in Heimen mit offener Grundrissgestaltung, wo die Zimmer nur durch niedrige Holzwände abgegrenzt werden, die Ausbrüche gravierender, als in Heimen mit vielen separaten, baulich getrennten Schlafräumen. Wenn diese jedoch als Mehrbettzimmer konzipiert waren, kam es zu mehreren Infektionen innerhalb des Mehrbettzimmers (Chow, 2021).

In einer Studie von Preuß et al. wurde eine mögliche Assoziation von strukturellen Faktoren und der Inzidenz von COVID-19 Fällen und Todesfällen in Pflegeheimen zu Beginn der Pandemie untersucht. Durch Auswertung zweier Umfragen von 1067 Pflegeheimen in der ersten bzw. zweiten Welle der Pandemie, zeigten die Autoren, dass das Risiko für einen Ausbruch bzw. für das Auftreten von Fällen und assoziierten Todesfällen mit steigender Inzidenz von SARS-CoV-2 in der Allgemeinbevölkerung, der Größe der Einrichtung und der Anzahl an Personal im Verhältnis zu den Bewohnern und Bewohnerinnen anstieg. In der zweiten Welle war die Wahrscheinlichkeit höher in Pflegeheimen, die Probleme mit der Durchführung von Antigen Schnelltests hatten. Die Autoren postulieren, dass mit einem höheren Personalschlüssel zwar infektionspräventive Maßnahmen besser umgesetzt werden können, aber es dadurch ebenfalls zu vermehrten Kontakten zwischen Personal und Bewohner und Bewohnerinnen kam, sodass das Risiko für Transmissionen stieg. Es wurde nicht beschrieben, ob es eine feste Personalzuordnung zu bestimmten Bewohnergruppen gab (Preuß et al., 2022).

Telford et al. haben die Implementierung verschiedener infektionspräventiver Maßnahmen in einer Gruppe von 13 Pflegeheimen mit hoher SARS-CoV-2 Prävalenz (>39%) mit einer Gruppe von 13 Pflegeheimen mit niedriger (<39%) SARS-CoV-2 Prävalenz verglichen. Hier zeigte sich, dass in der Gruppe mit niedriger Prävalenz die infektionspräventiven Maßnahmen deutlich häufiger bzw. zu einem höheren Anteil umgesetzt wurden. So wurden beispielweise in der Hochprävalenz vs. Niedrigprävalenzgruppe die soziale Distanzierung; z.B. Personenbegrenzung in sehr kleinen, geschlossenen Räumen in 54% vs. 74% und Einsatz von PSA in 41% vs. 72% umgesetzt. Eine Sanitärzelle mit Waschbecken innerhalb der Bewohnerzimmers war in 70% vs. 100% vorhanden. In der Gruppe mit niedrigeren Prävalenzen wurde zudem öfter Schulungen zum richtigen Gebrauch der PSA durchgeführt und es gab seltener Knappheit von PSA (Telford et al., 2021).

In einer Studie konnten die Weiterverbreitung von SARS-CoV-2 Infektionen innerhalb eines Pflegeheimes und die Übertragung in ein benachbartes Pflegeheim, mit vielen bestehenden Kontakten zwischen den Heimen durch die Implementierung von infektionspräventiven Maßnahmen wie das regelmäßige Testen von Personal und Bewohner und Bewohnerinnen, Trennung der verschiedenen Flure des Pflegeheimes in Kohorten, Kohortierung von positiven Fällen in bestimmten Bereichen, Kontaktreduktion, fester Personalzuordnung, Quarantänemaßnahmen, PSA für das Personal, Besucherverbot und Verzicht auf Neuaufnahmen, Bereitstellung von Informationsmaterial u.a. zur richtigen Anwendung von PSA deutlich reduziert werden (Roth et al., 2021).

In Hong Kong wurden Lehren aus früheren Epidemien oder Pandemien, wie mit SARS-CoV-1, gezogen. Beispielweise musste das Pflegeheimpersonal, seit 2003 bei Influenzaausbrüchen umgehend einen medizinischen MNS tragen. Auf diese Weise konnte auch zu Beginn der SARS-CoV-2 Pandemie das Infektionsgeschehen in dortigen Pflegeheimen reduziert werden. Transmissionen durch asymptomatisch Infizierte wurden hier reduziert, da sowohl Personal als auch die Bewohner und Bewohnerinnen einen MNS trugen. (Chow, 2021).

Neben SARS-CoV-2 sind im Pflegeheim auch andere Erreger relevant, die zu lokalen Ausbrüchen führen können. Barrett et al. beschrieben einen Ausbruch mit dem Respiratorischen Synzytial Virus (RSV) in einer Langzeitpflegeeinrichtung für Veteranen (Barrett et al., 2020). Dieses wird vor allem durch Tröpfcheninfektion übertragen, jedoch ist auch eine Übertragung über kontaminierte Gegenstände oder Hände möglich (Robert_Koch_Institut, 2018). Bei dem Ausbruch waren insgesamt 20 Bewohner und Bewohnerinnen von zwei Stationen mit insgesamt 80 Betten betroffen. Die Autoren beschrieben, dass die Exposition zu symptomatisch Infizierten und zu asymptomatischen Carriern zum Infektionsrisiko beigetragen hat. Bei den Beschäftigten gab es wenige leicht symptomatische Beschäftigte, die aber keine PCR Testung auf RSV erhielten. Kranke Beschäftigte hatten jedoch die Vorgabe nicht zur Arbeit zu erscheinen. Um neue Fälle frühzeitig zu identifizieren, wurden symptomatische Bewohner und Bewohnerinnen, sowie asymptomatische Bewohner und Bewohnerinnen mit Kontakt zu bestätigten Fällen frühzeitig mittels PCR getestet. Der Ausbruch konnte ca. 1 Monat nach der Implementierung von infektionspräventiven Maßnahmen wie Verbesserung der Händehygiene, Tragen von Masken durch das Personal und Besuchende, Isolierung von Fällen mit erweiterter Nutzung von persönlicher Schutzausrüstung, Aussetzen von Gruppenaktivitäten und Verzicht der Aufnahme neuer Bewohner und Bewohnerinnen beendet werden (Barrett et al., 2020).

Weitere relevante Krankheitserreger innerhalb von Pflegeeinrichtungen sind darüber hinaus das Influenza Virus (Gallagher et al., 2018), oder andere respiratorische Pathogene, Noroviren und andere Gastroenteritis Erreger (Utsumi et al., 2010). Die Einhaltung von Standardhygienemaßnahmen ist essentiell, um die Verbreitung von diesen Erregern zu verhindern. Bei Erregern, die vornehmlich durch Kontakt übertragen werden, wie viele Gastroenteritis Erreger oder auch multiresistente Erreger ist dabei vor allem die Umsetzung der Indikationen zur Händedesinfektion essentiell. Maßnahmen zur Prävention der Verbreitung dieser Erreger standen nicht im Fokus dieses Reviews.

Limitationen

Dieses Review hat einige Limitationen. Die Literaturrecherche wurde größtenteils basierend auf der Publikation von Benbow durchgeführt. Möglicherweise relevante Studien, die vor 2022 veröffentlicht wurden und nicht in diesem Review erwähnt sind, wurden nicht berücksichtigt. Auch wurden nach dem Recherchezeitraum möglicherweise weitere Studien veröffentlicht, welche im Rahmen des Reviews nicht berücksichtigt wurden, aber potentiell relevant sind. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden insbesondere Lüftungsstrategien und Gebäude-assozierte Faktoren zur Vermeidung von Infektionen von luftgetragenen Pathogenen bzw. zur Senkung der CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko betrachtet, andere infektionspräventive Strategien wie regelmäßiges Testen, das Tragen von Masken etc. standen nicht im Fokus des Reviews. Insgesamt wurden nur wenige zusätzliche Studien identifiziert, die nach dem Review von Benbow erschienen und den Einfluss von Lüftungs- und Gebäude-assozierten Faktoren untersuchten. Es bedarf in Zukunft noch weiterer Forschung zu infektionspräventiven Maßnahmen u.a. gegen luftübertragene Erreger, um Pflegeheime in Zukunft bestmöglich vor Infektionen zu schützen.

Schlussfolgerung

Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko von luftgetragenen Infektionen zu reduzieren. Pflegeheime, insbesondere Gemeinschaftsräume, sollten deswegen mit einem gut funktionierenden mechanischen oder natürlichen Lüftungssystem ausgestattet sein. Zur Anzeige einer Lüftungsnotwendigkeit bzw. zur Überprüfung des Lüftungserfolges, sollten die Gemeinschaftsräume mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein. Bei der Implementierung von infektionspräventiven Schutzmaßnahmen ist es darüber hinaus essentiell, bauliche und strukturelle Faktoren beim Infektionsschutz zu berücksichtigen. Bewohner und Bewohnerinnenzimmer sollten möglichst als Einzelzimmer konzipiert werden und größere Pflegeheime sollten in kleinen Einheiten, möglichst mit eigenen Gemeinschaftsräumen und Personalzuordnung strukturiert sein. So können im Einzelfall einzelne Kohorten isoliert werden und das Risiko einer Verbreitung innerhalb der Einrichtung wird reduziert. Infektionspräventive Maßnahmen sollten zum Schutz der oft vulnerablen Bewohner und Bewohnerinnen unabhängig von einer bestehenden Pandemie etabliert werden.

Quellen

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte. (2018). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft- Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 51, 1358-1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Algase, D. L., Antonakos, C., Beattie, E., Beel-Bates, C., & Song, J. A. (2011). Estimates of crowding in long-term care: comparing two approaches. *Herd*, 4(2), 61-74. <https://doi.org/10.1177/193758671100400206>
- Anderson, D. C., Grey, T., Kennelly, S., O'Neill, D. (2020). Nursing Home Design and COVID-19: Balancing Infection Control, Quality of Life, and Resilience. *J Am Med Dir Assoc*, 21(11), 1519-1524. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2020.09.005>
- Barrett, N., Bailey, L., Ford, F., Thorne, M., Azab, N., Lemaitre, B., Lobo, Z., & Psevdos, G. (2020). Respiratory syncytial virus outbreak in a veterans affairs long-term care facility. *Infectious Diseases in Clinical Practice*, 28(4), 200-203. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1097/IPC.0000000000000844>
- Baudet, A., Baurès, E., Blanchard, O., Le Cann, P., Gangneux, J. P., & Florentin, A. (2022). Indoor Carbon Dioxide, Fine Particulate Matter and Total Volatile Organic Compounds in Private Healthcare and Elderly Care Facilities. *Toxics*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/toxics10030136>
- Benbow, W. (2020). Engineering controls for long term care facilities to prevent and manage infectious diseases such as COVID-19. *Canadian Nursing Home*, 31(2), 4-13.
- Benbow, W. (2022). COVID-19 in Long-Term Care: The Built Environment Impact on Infection Control. *Herd*, 15(4), 287-298. <https://doi.org/10.1177/19375867221101897>
- Birmili, W., Selinka, H. C.; Moriske, H. J.; Daniels, A.; Straff, W.. (2021). [Ventilation concepts in schools for the prevention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 64(12), 1570-1580. <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4> (Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektiöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft.)
- Blanco-Donoso, L., Moreno-Jimenez, J., Amutio, A., Gallego-Alberto, L., Moreno-Jimenez, B., & Garrosa, E. (2021). Stressors, Job Resources, Fear of Contagion, and Secondary Traumatic Stress Among Nursing Home Workers in Face of the COVID-19: The Case of Spain. *J Appl Gerontol*, 40(3), 244-256. <https://doi.org/10.1177/0733464820964153>
- Brainard, J., Rushton, S., Winters, T., & Hunter, P. (2021). Introduction to and spread of COVID-19-like illness in care homes in Norfolk, UK. *J Public Health (Oxf)*, 43(2), 228-235. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdaa218>
- Brown, K., Jones, A., Daneman, N., Chan, A., Schwartz, K., Garber, G., Costa, A., & Stall, N. (2021). Association Between Nursing Home Crowding and COVID-19 Infection and Mortality in Ontario, Canada. *JAMA intern. med.*, 181(2), 229-236. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.6466>

- Burki, T. (2020). England and Wales see 20 000 excess deaths in care homes. *Lancet*, 395(10237), 1602. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)31199-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)31199-5)
- Cai, H., Tyne, I. A., Spreckelmeyer, K., & Williams, J. (2021). Impact of Visibility and Accessibility on Healthcare Workers' Hand-Hygiene Behavior: A Comparative Case Study of Two Nursing Units in an Academic Medical Center. *Herd*, 14(2), 271-288. <https://doi.org/10.1177/1937586720962506>
- Chow, L. (2021). Care homes and COVID-19 in Hong Kong: how the lessons from SARS were used to good effect. *Age Ageing*, 50(1), 21-24. <https://doi.org/10.1093/ageing/afaa234>
- Chu, D. K., Akl, E. A., Duda, S., Solo, K., Yaacoub, S., & Schünemann, H. J. (2020). Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*, 395(10242), 1973-1987. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)31142-9)
- de Man, P., Paltansing, S., Ong, D., Vaessen, N., van Nielen, G., & Koeleman, J. (2021). Outbreak of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in a Nursing Home Associated With Aerosol Transmission as a Result of Inadequate Ventilation. *Clin. infect. dis.*, 73(1), 170-171. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1270>
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., de Gennaro, G. (2021). CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- Dykgraaf, S. H., Matenge, S., Desborough, J., Sturgiss, E., Dut, G., Roberts, L., McMillan, A., & Kidd, M. (2021). Protecting Nursing Homes and Long-Term Care Facilities From COVID-19: A Rapid Review of International Evidence. *J Am Med Dir Assoc*, 22(10), 1969-1988. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2021.07.027>
- ECDC. (2022). *Factsheet for health professionals on Coronaviruses European Centre for Disease Prevention and Control*. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/factsheet-health-professionals-coronaviruses>
- Elsbernd, A., Heidecker, L., Schüttemeier, B. (2021). Studie zur aktuellen Lage in Einrichtungen der stationären und ambulanten Langzeitpflege in Baden-Württemberg (LACOVID-BA-WÜ2020). Laufzeit: 01.08.2020–31.07.2021. https://sozialministerium.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-sm/intern/downloads/Downloads_Gesundheitsschutz/Lacovid_Abschlussbericht_Elsbernd_29-07-2021.pdf
- Fisman, D. N., Bogoch, I., Lapointe-Shaw, L., McCready, J., & Tuite, A. R. (2020). Risk Factors Associated With Mortality Among Residents With Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in Long-term Care Facilities in Ontario, Canada. *JAMA Netw Open*, 3(7), e2015957. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.15957>
- Gallagher, N., Johnston, J., Crookshanks, H., Nugent, C., & Irvine, N. (2018). Characteristics of respiratory outbreaks in care homes during four influenza seasons, 2011-2015. *J Hosp Infect*, 99(2), 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2017.08.020>
- Goldman, C., Czaja, C., Moses, X. J. E., & Van Dyke, M. (2022). Nursing Home Adoption of CDC and ASHRAE COVID-19 Built Environment Recommendations: A Characterization Study of Colorado Nursing Home Facilities. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 15(4), 28-40. <https://doi.org/10.1177/19375867221111478>
- Gorges, R. J., & Konetzka, R. T. (2020). Staffing Levels and COVID-19 Cases and Outbreaks in U.S. Nursing Homes. *J Am Geriatr Soc*, 68(11), 2462-2466. <https://doi.org/10.1111/jgs.16787>
- Guo, Z. D., Wang, Z. Y., Zhang, S. F., Li, X., Li, L., Li, C., Cui, Y., Fu, R. B., Dong, Y. Z., Chi, X. Y., Zhang, M. Y., Liu, K., Cao, C., Liu, B., Zhang, K., Gao, Y. W., Lu, B., & Chen, W. (2020). Aerosol and Surface Distribution of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Hospital Wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), 1583-1591. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200885>
- Hamilton, W. L., Tonkin-Hill, G., Smith, E. R., Aggarwal, D., Houldcroft, C. J., Warne, B., Meredith, L. W., Hosmillo, M., Jahun, A. S., Curran, M. D., Parmar, S., Caller, L. G., Caddy, S. L., Khokhar, F. A., Yakovleva, A., Hall, G., Feltwell, T., Pinckert, M. L., Georgana, I., et al. (2021). Genomic epidemiology of covid-19 in care homes in the east of England. *Elife*, 10, e64618. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.7554/eLife.64618>

- Hammerschmidt, J., & Manser, T. (2019). Nurses' knowledge, behaviour and compliance concerning hand hygiene in nursing homes: a cross-sectional mixed-methods study. *BMC Health Serv Res*, 19(1), 547. <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4347-z>
- Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., & Kriegel, M. (2020). Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10332>
- Heudorf, U., & Gottschalk, R. (2021). The Risk of Asymptomatic and Symptomatic COVID-19 Infection Among Schoolteachers and Day-Care Workers Compared to Hospital and Nursing-Home Staff. *Dtsch Arztebl Int*, 118(12), 213-214. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2021.0170>
- Hurras, J., Golmohammadi, R., Bujok, S., Bork, M., Thelen, F., Wagner, P., Exner, D., Schonfeld, C., Hornei, B., Kampf, G., & Exner, M. (2022). Explosive COVID-19 outbreak in a German nursing home and the possible role of the air ventilation system. *The Journal of hospital infection*, 130, 34-43. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2022.09.013>
- Ibrahim, J., Li, Y., McKee, G., Eren, H., Brown, C., Aitken, G., & Pham, T. (2021). Characteristics of nursing homes associated with COVID-19 outbreaks and mortality among residents in Victoria, Australia. *Australas J Ageing*, 40(3), 283-292. <https://doi.org/10.1111/ajag.12982>
- Ishigaki, Y., Yokogawa, S., Minamoto, Y., Saito, A., Kitamura, H., & Kawauchi, Y. (2022). Pilot Evaluation of Possible Airborne Transmission in a Geriatric Care Facility Using Carbon Dioxide Tracer Gas: Case Study. *JMIR Form Res*, 6(12), e37587. <https://doi.org/10.2196/37587>
- Kain, D., Stall, N., Brown, K., McCreight, L., Rea, E., Kamal, M., Brenner, J., Verge, M., Davies, R., & Johnstone, J. (2021). A Longitudinal, Clinical, and Spatial Epidemiologic Analysis of a Large COVID-19 Long-Term Care Home Outbreak. *J Am Med Dir Assoc*, 22(10), 2003-2008.e2002. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2021.07.021>
- Kriegel, M., Hartmann, A., Buchholz, U., Seifried, J., Baumgarte, S., & Gastmeier, P. (2021). SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010220>
- Kunasekaran, M., Quigley, A., Rahman, B., Chughtai, A., Heslop, D., Poulos, C., & MacIntyre, C. (2022). Factors Associated With SARS-CoV-2 Attack Rates in Aged Care-A Meta-analysis. *Open forum infect. dis.*, 9(3). <https://doi.org/10.1093/ofid/ofac033>
- Liu, M., Maxwell, C. J., Armstrong, P., Schwandt, M., Moser, A., McGregor, M. J., Bronskill, S. E., & Dhalla, I. A. (2020). COVID-19 in long-term care homes in Ontario and British Columbia. *Cmaj*, 192(47), E1540-e1546. <https://doi.org/10.1503/cmaj.201860>
- Margolies, J. (2020). As death toll in nursing homes climbs, calls to redesign them grow. <https://www.nytimes.com/2020/05/12/business/nursing-homes/coronavirus.html>
- Miller, S., Mukherjee, D., Wilson, J., Clements, N., & Steiner, C. (2021). Implementing a negative pressure isolation space within a skilled nursing facility to control SARS-CoV-2 transmission. *AM. J. INFECT. CONTROL*, 49(4), 438-446. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.09.014>
- Mills, J. P., Kaye, K. S., & Mody, L. (2020). COVID-19 in older adults: clinical, psychosocial, and public health considerations. *JCI Insight*, 5(10). <https://doi.org/10.1172/jci.insight.139292>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*, 139, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Mousavi, E. S., Godri Pollitt, K. J., Sherman, J., & Martinello, R. A. (2020). Performance analysis of portable HEPA filters and temporary plastic anterooms on the spread of surrogate coronavirus. *Build Environ*, 183, 107186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107186>
- Parker-Pope, T. (2021). Those anti-Covid plastic barriers probably don't help and may make things worse. Retrieved February 09, 2023, from <https://www.nytimes.com/2021/08/19/well/live/coronavirus-res-taurants-classrooms-salons.html>

- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *medRxiv*, 2020.2009.2009.20191676. <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>
- Pettenkofer, M. v. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta'sche Buchhandlung, Munich, Germany.
- Piet, E., Maillard, A., Mallaval, F. O., Dusseau, J. Y., Galas-Haddad, M., Ducki, S., Creton, H., Lallemand, M., Forestier, E., Gavazzi, G., & Delory, T. (2021). Outbreaks of COVID-19 in Nursing Homes: A Cross-Sectional Survey of 74 Nursing Homes in a French Area. *J Clin Med*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/jcm10184280>
- Preuß, B., Fischer, L., Schmidt, A., Seibert, K., Hoel, V., Domhoff, D., Heinze, F., Brannath, W., Wolf-Ostermann, K., & Rothgang, H. (2022). COVID-19 in German Nursing Homes: The Impact of Facilities' Structures on the Morbidity and Mortality of Residents-An Analysis of Two Cross-Sectional Surveys. *Int J Environ Res Public Health*, 20(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph20010610>
- Robert_Koch_Institut. (2018). *Respiratorische Synzytial-Virus-Infektionen (RSV)*. Retrieved January 24, 2023 from https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_RSV.html#doc2394298bodyText5
- Robert_Koch_Institut. (2021). COVID-19 in Alten- und Pflegeheimen / SARS-CoV-2 Aerosolpartikel in Räumen. *Epidemiologisches Bulletin*(18). https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2021/Ausgaben/18_21.html
- Roth, A., Feller, S., Ruhnau, A., Plamp, L., Viereck, U., Weber, K., Maertens, D., Hoor, I., Gamradt, R., Freyer, P., Wenke-Gellert, F., Terjaew, A., Zintel, A., Markus, J., Gögelein-Mahfouz, I., & Savaskan, N. (2021). Characterization of COVID-19 outbreaks in three nursing homes during the first wave in Berlin, Germany. *Sci Rep*, 11(1), 24441. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04115-9>
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237-245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>
- Said, D., Suwono, B., Schweickert, B., Schönfeld, V., Eckmanns, T., & Haller, S. (2022). SARS-CoV-2 outbreaks in care homes for the elderly and disabled in Germany - a comparative epidemiological analysis of the periods before and after the beginning of the vaccination campaign. *Deutsches Ärzteblatt International*(119), 486-487. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2022.0170>
- Shahid, Z., Kalayanamitra, R., McClafferty, B., Kepko, D., Ramgobin, D., Patel, R., Aggarwal, C. S., Vunnam, R., Sahu, N., Bhatt, D., Jones, K., Golamari, R., & Jain, R. (2020). COVID-19 and Older Adults: What We Know. *J Am Geriatr Soc*, 68(5), 926-929. <https://doi.org/10.1111/jgs.16472>
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333-341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>
- Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med*, 8(7), 658-659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)
- Stall, N. M., Jones, A., Brown, K. A., Rochon, P. A., & Costa, A. P. (2020). For-profit long-term care homes and the risk of COVID-19 outbreaks and resident deaths. *Cmaj*, 192(33), E946-e955. <https://doi.org/10.1503/cmaj.201197>
- Statistisches_Bundesamt. (2022a). *Pflegebedürftige nach Versorgungsart, Geschlecht und Pflegegrade*. Retrieved February 21, 2023 from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Pflege/Tabellen/pflegebeduerftige-pflegestufe.html>
- Statistisches_Bundesamt. (2022b). *Pflegeheime und ambulante Pflegedienste*. Retrieved February 02, 2023 from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Pflege/Tabellen/pflegeeinrichtungen-deutschland.html>

- Statistisches_Bundesamt. (2023). *Personal in Pflegeheimen und ambulanten Pflegediensten*. Retrieved February 02, 2023 from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Pflege/Tabellen/personal-pflegeeinrichtungen.html>
- Telford, C., Bystrom, C., Msn, C. I. C., Fox, T., Holland, D., Md, M. H. S., Wiggins-Benn, S., Mandani, A., McCloud, M., Rn, M. S., Shah, S., & Md, M. P. H. (2021). COVID-19 Infection Prevention and Control Adherence in Long-Term Care Facilities, Atlanta, Georgia. *J Am Geriatr Soc*, 69(3), 581-586. <https://doi.org/10.1111/jgs.17001>
- Utsumi, M., Makimoto, K., Quroshi, N., & Ashida, N. (2010). Types of infectious outbreaks and their impact in elderly care facilities: a review of the literature. *Age Ageing*, 39(3), 299-305. <https://doi.org/10.1093/ageing/afq029>
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382(16), 1564-1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- Vuylsteke, B., Cuypers, L., Baele, G., Stranger, M., Paralovo, S. L., André, E., Dirks, J., Maes, P., & Laga, M. (2022). The role of airborne transmission in a large single source outbreak of SARS-CoV-2 in a Belgian nursing home in 2020. *Epidemics*, 40, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2022.100589>
- Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. [Review] [Review.]. *Science August*, 373(6558). <https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftx&AN=00007529-202108270-00002>
- Wang, Z. (2021). Use the Environment to Prevent and Control COVID-19 in Senior-Living Facilities: An Analysis of the Guidelines Used in China. *Herd*, 14(1), 130-140. <https://doi.org/10.1177/1937586720953519>
- Yang, H., Rigsby, M., Zhu, X., Lee, C., & Ory, M. (2022). COVID-19 in Long-Term Care Facilities: A Rapid Review of Infection Correlates and Impacts on Mental Health and Behaviors. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 15(3), 277-294. <https://doi.org/10.1177/19375867221092149>
- Yen, M. Y., Schwartz, J., King, C. C., Lee, C. M., & Hsueh, P. R. (2020). Recommendations for protecting against and mitigating the COVID-19 pandemic in long-term care facilities. *J Microbiol Immunol Infect*, 53(3), 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.jmii.2020.04.003>
- Zimmerman, S., Dumond-Stryker, C., Tandan, M., Preisser, J. S., Wretman, C. J., Howell, A., & Ryan, S. (2021). Nontraditional Small House Nursing Homes Have Fewer COVID-19 Cases and Deaths. *J Am Med Dir Assoc*, 22(3), 489-493. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2021.01.069>

Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Arztpraxen

Einleitung

Arztpraxen sind ein Teil des Gesundheitswesens und tragen zur Sicherstellung der ambulanten medizinischen Versorgung der Bevölkerung bei. In Deutschland gibt es ca. 99 658 Arztpraxen. Pro Tag finden in Haus- und Facharztpraxen etwa 3,9 Millionen Patient-*Arzt* Kontakte statt (Kassenärztliche_Bundesvereinigung, 2023a, 2023b). Viele Patienten und Patientinnen nutzen Arztpraxen als erste Anlaufstelle bei Verdacht auf eine Infektion, bei einer bestehenden Infektion oder bei anderen gesundheitlichen Beschwerden. Zudem werden in Arztpraxen Routine- und Vorsorgeuntersuchungen durchgeführt und ältere, sowie chronisch kranke Personen medizinisch betreut. In den Bereichen Diagnostik und Therapie wurden viele Maßnahmen, die früher noch stationär durchgeführt wurden, in den ambulanten Sektor verlagert.

Im Rahmen der Severe acute respiratory syndrome coronavirus type 2 (SARS-CoV-2) Pandemie zeigte sich, dass zum Schutz möglicher Erregerübertragungen zwischen Patienten und Patientinnen untereinander bzw. Patienten und Patientinnen und Personal infektionspräventive Maßnahmen zunehmend essentiell sind.

SARS-CoV-2, der Erreger der COVID-19 Erkrankung wird hauptsächlich über Tröpfchen, sowie über virushaltige Aerosole übertragen. Diese werden unter anderem beim Atmen, Sprechen, Niesen und Husten ausgestoßen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; Chia C. Wang et al., 2021). Die indirekte Kontaktübertragung über kontaminierte Oberflächen oder Gegenstände spielt nach aktuellem Wissensstand eine eher untergeordnete Rolle (ECDC, 2022). Übertragungen durch Tröpfchen finden vor allem im Nahfeld einer Person (bis ca. 1,5 m) statt, Aerosole und darin enthaltene Viruspartikel können jedoch über längere Zeit im Raum bestehen bleiben, sodass hier ebenfalls eine Infektionsgefahr im Fernfeld (>1,5 m) besteht. Diese bleibt auch nach Verlassen des Raumes einer infektiösen Person bestehen. Es gibt fließende Übergänge zwischen Tröpfchen- und luftgetragenen Infektionen, sodass eine strikte Unterscheidung für Infektionen im Nah- und Fernfeld nicht möglich bzw. sinnvoll ist (Birmili, 2021).

Eine verbesserte Belüftung kann die Zeit, die ausgeatmete Tröpfchen bzw. Aerosole im Raum verbleiben, reduzieren (Somsen et al., 2020). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass in schlecht belüfteten Räumen eine potentielle Infektionsgefahr durch die Einatmung von infektiösen Aerosolen besteht, da luftgetragene Erreger über einen längeren Zeitraum im Raum verbleiben können. Die Belüftung kann durch natürliche Lüftung (NV), meist über Fenster oder Türen, mechanische Lüftung (MV), meist über Raumlüfttechnische Anlagen (RLT Anlagen) oder eine Kombination aus beiden in Form von hybrider Lüftung erfolgen.

Kohlenstoffdioxid (CO₂), ein Endprodukt der Atmung, wird zusammen mit weiteren Partikeln, die potentiell virus-/ erregerhaltig sein können, ausgeatmet. Die CO₂ Konzentration wird deswegen oft als Indikator für die Innenraumluftqualität genutzt und als Surrogatparameter für das Übertragungs- und Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 oder andere luftübertragene Erreger herangezogen (Di Gilio, 2021; Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003; Shendell et al., 2004). Ursprünglich wurde ein Referenzwert der CO₂ Konzentration von 1000 ppm von Max von Pettenkofer als Maximalwert für die Innenraum CO₂ Konzentration vorgeschlagen und daraus abgeleitet, die notwendigen Luftwechselraten pro Person. Er wollte mit diesem Grenzwert vor allem möglichen Konzentrationsstörungen von Schüler und Schülerinnen vorbeugen (Pettenkofer, 1858). In Deutschland werden CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich eingestuft, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte, 2018). Die CO₂ Konzentration kann vergleichsweise einfach und günstig mit CO₂ Messgeräten gemessen werden. Die Verwendung der CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko hat jedoch auch Limitationen. Nach einem gewissen Zeitraum wird ein „steady state“ der CO₂ Konzentration erreicht, die Menge an virushaltigen Partikeln, die eine empfängliche Person einatmet, steigt jedoch kontinuierlich mit der Zeit, auch wenn die Konzentration der Partikel selbst gleichbleibt. Kriegel et al. schlagen deswegen vor, die CO₂ Dosis (ppm*h) als möglichen Surrogatparameter zur Abschätzung des Infektionsrisikos zu nutzen (Kriegel et al., 2021).

Die SARS-CoV-2 Pandemie stellte für viele Arztpraxen eine besondere Herausforderung dar. Es mussten in kurzer Zeit neue Versorgungsstränge (u.a. Impfung, Testung, ambulante Therapie von COVID-19 Fällen) aufgebaut und Schutzmaßnahmen etabliert werden und trotzdem musste die Regelversorgung weiter

gewährleistet werden. Hierzu waren in vielen Praxen räumliche und organisatorische Anpassungen erforderlich. Ein Großteil der COVID-19 Patienten und Patientinnen konnte dadurch ambulant versorgt werden: Bis August 2021 wurden 13 von 14 Fällen ambulant therapiert, im weiteren Verlauf der Pandemie stieg der Anteil der ambulant behandelten Patienten und Patientinnen bis Februar 2022 auf 32 von 33 Patienten und Patientinnen. Die Versorgung durch niedergelassene Ärzte entlastete die Krankenhäuser, sodass dort schwerere Fälle versorgt werden konnten. Die Belastung der Arztpraxen wurde und wird zudem durch die zusätzliche Versorgung von Long- und Post-COVID Patienten und Patientinnen verstärkt (Kassenärztliche_Bundesvereinigung, 2023a).

Durch die Pandemie hatten viele Menschen Angst sich mit dem Virus zu infizieren. Manche Patienten und Patientinnen sind deswegen bei Beschwerden nicht zum Arzt gegangen oder haben Routineuntersuchungen verschoben oder nicht wahrgenommen. Zu Beginn der Pandemie nahmen ambulante Arztbesuche um fast 60% ab (Mehrotra, 2020). Dadurch erhielten manche Patienten und Patientinnen nicht die medizinische Behandlung, die sie benötigt hätten.

Zusammenfassend ist es wichtig in Arztpraxen Strukturen und Maßnahmen zu implementieren, um sowohl die medizinische Regelversorgung als auch die Versorgung von (SARS-CoV-2) infizierten Patienten und Patientinnen zu gewährleisten und eine Weiterverbreitung von Infektionen innerhalb der Arztpraxen bestmöglich zu verhindern.

Ziel des Scoping Reviews

Das Ziel dieses Scoping Reviews war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation in Arztpraxen, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Interventionen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention in Arztpraxen anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Methoden

Suchstrategie

Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect wurde am 10.02.2023 durch eine Person durchgeführt. Publikationen, welche bis einschließlich 10.02.2023 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Um relevante Studien zu identifizieren, wurde die Recherche durch die Kombination der folgenden Schlüsselwörter (übersetzt ins Englische) durchgeführt: „Arztpraxis“, „Hausarztpraxis“, „Allgemeinarztpraxis“, „Wartezimmer“, „Lüftung“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Innenraumluftqualität“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Masern“, „Influenza“, „Luftübertragung“. Zusätzlich wurden Publikationen berücksichtigt, die durch die Bearbeitung zuvor identifizierter Studien, gefunden wurden.

Das Programm Endnote wurde für die Literaturverwaltung und die Elimination von Duplikaten verwendet.

Ein- und Ausschlusskriterien

Studien, welche in Englisch oder Deutsch verfasst wurden, wurden berücksichtigt. Es wurden Studien eingeschlossen, welche in Haus-/Allgemeinarztpraxen, Internistischen Praxen und Kinderarztpraxen durchgeführt wurden mit den primären Endpunkten CO₂ Konzentration oder Infektions- bzw. Transmissionsrisiko für verschiedene luftgetragene Infektionserreger (z.B. SARS-CoV-2, Masern, Influenza). Zudem wurden nur Studien eingeschlossen, die in Ländern mit hohem und mittlerem Einkommen und mit vergleichbaren Klimazonen zu Deutschland durchgeführt wurden, um eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit zu gewährleisten. Bezüglich des Studiendesigns wurden Interventionsstudien, Beobachtungsstudien und mathematische Modellierungsstudien eingeschlossen.

Studien, welche in Zahnarztpraxen durchgeführt wurden, wurden aufgrund des unterschiedlichen Settings einer Zahnarztpraxis nicht berücksichtigt. Die zahnärztliche Diagnostik und Therapie umfasst oft aerosolproduzierende Tätigkeiten und das Personal hat bei infizierten Personen direkten Schleimhautkontakt mit potentiell virushaltigem Material sowie insgesamt einen langen engen physischen Kontakt, wodurch ein anderes Infektionsrisiko entsteht. Zusätzlich können Schutzmaßnahmen während der Therapie zum Teil nur einseitig durch das Personal angewandt werden (z.B. Maskennutzung).

Studienauswahl

Nach der Elimination von Duplikaten, wurden die verbleibenden Studien anhand der Titel und Abstracts gescreent. Die verbliebenen Studien wurden im Anschluss im Volltext gelesen und auf Eignung geprüft.

Ergebnisse

Durch die Literaturrecherche konnten vier Studien gefunden werden, die den Einschlusskriterien entsprachen. Die Studien waren alle Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen mit den primären Endpunkten CO₂ Konzentration bzw. Infektion/Infektionsrisiko verschiedener respiratorischer Infektionserreger (SARS-CoV-2/ Masernvirus). Die Studien wurden mit einem Überblick über die Methodik und Ergebnisse in **Tabelle 29** zusammengefasst. Es wurde nur eine Studie identifiziert, in welcher Messungen der CO₂ Konzentration in verschiedenen Räumlichkeiten zweier Arztpraxen durchgeführt wurden. Im Durchschnitt (+/- Standardabweichung) lagen die CO₂ Konzentrationen bei 657 (+/- 421) ppm. Wenn die Messungen während der Nutzung der Räumlichkeiten durchgeführt wurden, waren höhere durchschnittliche CO₂ Konzentrationen von 905 (+/- 592) ppm in Sprechzimmern bzw. 676 (+/- 361) ppm in Wartezimmern gemessen worden. Hierbei ergaben sich im Winter höhere durchschnittliche Werte, was durch eine reduzierte natürliche Belüftung beeinflusst gewesen sein könnte. Die Maximalwerte waren im Bereich von 1904 ppm (bei nicht Nutzung) bis 3633 ppm (während Nutzung) und sprachen für eine nicht ausreichende Belüftung (Baudet et al., 2022).

In zwei Studien wurden Ausbrüche mit dem Masernvirus in Kinderarztpraxen untersucht. In den Studien wurde jeweils ein symptomatisches Kind in der Arztpraxis untersucht und eine Maserninfektion diagnostiziert. Im weiteren Verlauf wurde bei mehreren anderen Kindern eine Maserninfektion festgestellt, die zum Teil gleichzeitig in der Praxis anwesend waren, zum Teil erst nach Verlassen des Indexfalles die Praxis betraten. Nur bei einem weiteren Fall bestand ein enger (<1m) Kontakt zum Indexfall. Bei beiden Ausbrüchen wurde deshalb eine Transmission über infektiöse Aerosole, die sich in den Praxen verteilten und über längere Zeit bestehen blieben, vermutet (Bloch et al., 1985; Remington et al., 1985).

Tabelle 29
Beobachtungsstudien

Referenz	Studien typus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse
(Baudet et al., 2022)	Beobachtungsstudie	2 Allgemeinärztlpraxen, Frankreich, 2018 und 2019 in Sommer und Winter	Allgemeinärztlpraxen mit NV. (1) während Nutzung und (2) während nicht-Nutzung. Messungen der CO ₂ Konzentration 10 minütlich über einen Zeitraum von 4,5 Tagen.	CO ₂ Konzentration	Durchschnittliche CO ₂ Konz. 657 +/- 421 ppm (356-3633 ppm) <u>Sprechzimmer:</u> (1) 905 +/- 592 ppm (406-3633 ppm); (2) 653 +/- 403 ppm (406-3373 ppm) <u>Wartezimmer:</u> (1) 676 +/- 361 ppm (357-2266 ppm); (2) 468 +/- 171 ppm (356-1904 ppm) Höhere Durchschnittswerte im Winter vs. Sommer.
(Boender et al., 2021)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Allgemeinärztlpraxis, Deutschland, Feb./März 2020	2 Allgemeinärzte mit COVID-19, die bis zur Diagnosestellung Patientenkontakte hatten. Kontaktrecherche (Patienten und Patientinnen und Praxisangestellte), Symptommonitoring, Testung von exponierten Patienten und Patientinnen im infektiösen Zeitraum der Ärzte (2 Tage vor bis 10 Tage nach Symptombeginn bzw. pos. Testergebnis), Interviews. Analyse zu Beginn der Pandemie, als Inzidenzen sehr niedrig und eine Exposition außerhalb der Praxis unwahrscheinlich war. Berechnung von Inzidenzenverhältnissen zur Bestimmung des Transmissionsrisikos von Arzt zu Patienten und Patientinnen.	SARS-CoV-2 Infektion	Keine engen Kontakte bei Praxisangestellten, 131 enge Kontaktpatienten und Patientinnen, davon 89 zur Nachverfolgung eingeschlossen. MNS in 35% der Kontakte bzw. bei 45% der körperlichen Untersuchung durch Arzt getragen. 34% der Pat. mit Symptomentwicklung nach Kontakt. Insgesamt 22 Fälle identifiziert: 2 PCR bestätigt, 3 mit COVID-19 typischen Symptomen, 17 mit COVID-19 vereinbaren Symptomen. Risiken für Symptomentwicklung: Kontakt in präsymptomatischer Phase des Arztes und Kontakt >10min, protektiv: Kontakt, wenn Arzt Maske trug
(Bloch et al., 1985)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Kinderärztlpraxis, USA, Februar 1981	Praxis mit 6 Untersuchungsräumen, 1 Wartezimmer und 1 Flur. Gebäude mit MV. Untersuchungszimmer mit je separater Zuluft. Ausbruchsanalyse: 1 Kind mit Masern und Symptomen (Husten, Exanthem) in Praxis. Interviews von Praxisangestellten und anderen Familien, die am selben Nachmittag anwesend waren bezüglich Masern typischer Symptome, Aufenthaltsdauer, Expositionsausmaß. Bei Verdacht auf Infektion: serologische Testung. Evaluation möglicher Kontakte auch außerhalb der Praxis.	Masern Infektion	57 weitere Patienten und Patientinnen am selben Nachmittag in Praxis. Im Verlauf 7 weitere Masernfälle bei Kindern, die am selben Nachmittag in der Arztpraxis waren, 4 davon gleichzeitig im Wartezimmer, davon nur 1 mit direktem Kontakt <1m. 2 andere Kinder zeitgleich in anderen Untersuchungsräumen, 1 Kind erst 1 h nach dem Indexfall in Praxis; alle in anderen Untersuchungsräumen als Indexfall untersucht. 11 x höheres Risiko für ungeimpfte Kinder < 15 Monaten. Vermutete Übertragung durch infektiöse Aerosole.
(Remington et al., 1985)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Kinderärztlpraxis, USA, November 1982	Praxis mit Umluftheizung und Klimaanlage, Rezirkulation der Luft durch Ventilator. Angenommene Luftwechselrate 5 m ³ /min. Ein Kind mit Masern in Praxis am 15. und 16. November. Interviews von anderen Familien, die an den beiden Tagen in der Praxis waren bezüglich Symptomentwicklung im Nov./Dez., Aufenthaltszeiten, Expositionsausmaß. Serologische Testung bei Infektionsverdacht.	Masern Infektion	12 andere Patienten am 15. Nov. in Praxis, davon keins mit Symptomentwicklung. 84 andere Personen am 16. Nov. in der Praxis, davon 4 weitere Masernfälle bei Kindern. 3 der Kinder waren erst nach Verlassen der Praxis des Indexfalles in Praxis. Keins mit direktem face-to-face Kontakt. 2 nicht immunisierte Kinder erhielten passive Immunisierung, keins dieser Kinder entwickelte Symptome. Vermutete Übertragung durch infektiöse Aerosole.

Notiz: MV= mechanische Belüftung, NV= natürliche Belüftung, CO₂ Konz. = CO₂ Konzentration, SD= Standardabweichung
Quelle: Charité

Diskussion

Während der SARS-CoV-2 Pandemie waren Arztpraxen durch die Versorgung einer hohen Anzahl von COVID-19 Patienten und Patientinnen und gleichzeitiger Aufrechterhaltung der medizinischen Regelversorgung der Patienten und Patientinnen vor besondere Herausforderung gestellt. In vielen Praxen mussten infektionspräventive Strategien erst entwickelt werden und die Umsetzung war teilweise durch räumliche und organisatorische Faktoren erschwert.

In der systematischen Literaturrecherche wurden nur vier Studien identifiziert, die den Einschlusskriterien entsprachen, dadurch konnten nur eingeschränkte Aussagen bezüglich der Belüftungssituation in Arztpraxen abgeleitet werden. In zwei Studien wurde ein je Masernausbruch in einer Kinderarztpraxis analysiert (Bloch et al., 1985; Remington et al., 1985). Die Autoren beschreiben, dass die Transmission des Virus am ehesten durch infektiöse Aerosole stattfand, da mit Ausnahme eines sekundären Falles, kein Kontakt zwischen den Indexfällen und den weiteren Fällen bestand. Die Kinder wurden zum Teil in anderen Untersuchungszimmern als der Indexfall untersucht und waren größtenteils nicht zeitgleich mit dem Indexfall in dem Wartezimmer bzw. der Praxis anwesend. Die infektiösen Aerosole haben sich am ehesten in den Praxisräumen verbreitet und blieben über einen längeren Zeitraum bestehen. Inwiefern eine verbesserte Belüftung der Praxisräume Infektionen verhindert hätten können, wurde nicht untersucht. Messungen der CO₂ Konzentration wurde nur in einer Studie durchgeführt (Baudet et al., 2022). Die gemessenen Werte sprachen gemäß der Grenzwerte des Umweltbundesamts (Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte, 2018) für eine nicht ausreichende Belüftung der Räumlichkeiten, insbesondere lagen die Maximalwerte größtenteils bzw. insbesondere während der Nutzung über 2000 ppm. Allerdings sind die Ergebnisse aufgrund der geringen Datenlage nicht repräsentativ für die Belüftungssituation in Arztpraxen.

Arztpraxen sind ein wesentlicher Bestandteil der medizinischen Grundversorgung und sollten im Bedarfsfall schnell auf einen pandemischen Zustand reagieren können. Organisatorische Verantwortlichkeiten und erforderliche strukturelle Maßnahmen können beispielweise in einem praxisinternen Pandemieplan festgelegt sein.

Verschiedene Autoren untersuchten die Umsetzung von infektionspräventiven Maßnahmen in Arztpraxen: In einer Studie von Lehmann et al. wurde eine Querschnittserhebung zur Implementierung von infektionspräventiven Maßnahmen in Schweizer Privatpraxen mittels online Fragebögen im Frühjahr 2021 durchgeführt. Die Praxen waren vor allem Allgemeinarzt/ Internistische Praxen und Kinderarztpraxen. 127 gültige Fragebögen konnten ausgewertet werden. Die Auswertung ergab, dass es im Vergleich zu einer Vorstudie von 2019 vor der SARS-CoV-2 Pandemie zu einer Verbesserung der Umsetzung und Einhaltung von infektionspräventiven Maßnahmen kam. Eine kontinuierliche Lüftung konnte in 25 % der Praxen gewährleistet werden. In 85% bzw. 89% der Praxen erfolgte die Lüftung des Wartezimmers bzw. der Untersuchungszimmer mindestens einmal täglich. 2019 wurde dies nur in 56% bzw. 6,3% umgesetzt. Eine medizinische Maske wurde 2021 in 94% der Praxen durch das Personal während der Arbeit getragen. 2019 wurden Masken eher bei Vorliegen respiratorische Symptome getragen (41%), eine spezifische Empfehlung zum Einsatz von Masken lag meistens nicht vor (56%). 2021 wurden Patienten und Patientinnen mit respiratorischen Symptomen in 91% in separaten Räumen außerhalb des allgemeinen Wartezimmers isoliert. Ein Mindestabstand von 1,5m in Wartezimmern wurde in 60% der Praxen umgesetzt. In 62% der Praxen gab es bestimmte Sprechzeiten für Patienten und Patientinnen mit Verdacht auf COVID-19 (Lehmann et al., 2022).

Auch Daubert et al. untersuchten in einer multizentrischen Querschnittsstudie die Umsetzung von infektionspräventiven Maßnahmen bzw. das Vorhandensein räumlicher/ baulicher Voraussetzungen zum Schutz vor luftgetragenen Infektionen in 82 französischen Allgemeinarztpraxen. In Wartezimmern betrug der Mindestabstand zwischen den Stühlen in 78% der Praxen >2m, wenn diese gegenüberstanden bzw. >1m wenn diese rechtwinklig zueinanderstanden. Ein Fenster zur natürlichen Belüftung der Wartezimmer war in 79% der Praxen vorhanden. In größeren Praxen mit mehreren Ärzten gab es zwar teilweise >1 Wartezimmer, oft teilten sich aber Patienten und Patientinnen verschiedener Ärzte das gleiche Wartezimmer, sodass das Risiko für mögliche Erregerübertragungen stieg. In den Sanitärräumen für Patienten und Patientinnen waren in 13 % kein Waschbecken vorhanden. In nur geringen Prozentzahlen der Praxen waren Masken für Patienten und Patientinnen (1,2%) und alkoholisches Händedesinfektionsmittel für Patienten und Patientinnen (7,3%) verfügbar, allerdings wurden die Fragebögen zur Erhebung größtenteils vor Beginn der Pandemie ausgefüllt,

als viele Praxen noch nicht mit persönlicher Schutzausrüstung (PSA) oder sonstigen Mitteln ausgestattet waren. Die Zahlen spiegeln also eher den Grad der Vorbereitung von Arztpraxen auf eine mögliches Infektionsgeschehen wie der SARS-CoV-2 Pandemie. In 67% der Praxen gab es Kinderspielzeug, dieses wurde in 3,6 % täglich gereinigt, in ca. der Hälfte der Praxen wurde es nur 1-2-mal pro Woche gereinigt (49%). Häufig genutzte Kontaktflächen, z.B. Türgriffe wurden in 54% der Praxen einmal täglich gereinigt, in 27% allerdings nur 1-2 Mal pro Woche. Die Übertragung über kontaminierte Gegenstände spielt bei SARS-CoV-2 eine eher untergeordnete Rolle (ECDC, 2022), allerdings kann bei Erregern, die vornehmlich über direkten oder indirekten Kontakt übertragen werden, wie viele Gastroenteritiserreger, die geringe Reinigungsfrequenz zu Erregerübertragungen beitragen (Daubert et al., 2021).

Während der Pandemie wurden in vielen Praxen die Wartezimmer dahingehend angepasst, dass durch gezielte Platzierung/Kennzeichnung von Stühlen ein bestimmter Mindestabstand eingehalten werden sollte. Die Studie von Devlin untersuchte die Sitzplatz-Präferenz von Testpersonen für fünf unterschiedliche Anordnungen von Stühlen in Wartezimmern und Sitzplatzwahl vor und während der Pandemie (2013 vs. 2021). Unabhängig von dem spezifischen Stuhl Arrangement, wurden mittlere Sitze seltener gewählt als außenliegende Sitze. An der Wand stehende Stühle waren beliebter als im Raum stehende Stühle. Während der Pandemie wählten Testpersonen häufiger einen Stuhl direkt am Eingang des Wartezimmers als vor der Pandemie. Zudem hatten Testpersonen während der Pandemie ein höheres Bedürfnis nach Privatsphäre und gaben ein höheres Situationsbewusstsein an (Devlin, 2022).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in vielen Arztpraxen räumliche oder organisatorische Maßnahmen für eine verbesserte Infektionsprävention geschaffen wurden, die Umsetzung aber auch zum Teil lückenhaft war. In den beschriebenen Studien waren in manchen Praxen keine Fenster vorhanden oder es wurde nur einmal täglich gelüftet. In der Studie von Baudet et al. waren die gemessenen CO₂ Konzentrationen oberhalb der empfohlenen Grenzwerte und sprachen ebenfalls für eine nicht ausreichende Belüftung der Praxisräumlichkeiten (Baudet et al., 2022). Die oft engen räumlichen Gegebenheiten in Arztpraxen können die Verbreitung von beispielweise luftgetragenen Infektionen wie mit SARS-CoV-2 begünstigen. SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über Tröpfchen, sowie über virushaltige Aerosole übertragen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; C. C. Wang et al., 2021). Dementsprechend werden Lüftungsmaßnahmen zur Reduktion der Verweilzeit von potentiell infektiösen Aerosolen in den Innenräumen sowie das Abstandhalten zur Reduktion der Infektionsgefahr im Nahfeld als wichtige Strategien zur Reduzierung des Infektionsrisikos mit SARS-CoV-2 angesehen und sollten in Arztpraxen implementiert werden. Die CO₂ Konzentration kann relativ einfach und vergleichsweise kostengünstig mittels CO₂ Messgeräten bestimmt werden. Eine Studie hat gezeigt, dass durch den Einsatz von CO₂ Messgeräten im Krankenhaus signifikant kürzere Zeiträume mit CO₂ Konzentrationen > 1000 ppm, sowie niedrigere Maximalwerte vorlagen als zur Ausgangslage bzw. in der Postinterventionsphase (Laurent & Frans, 2022). Hoch frequentierte Bereiche in Arztpraxen (Wartezimmer und Sprechzimmer, ggf. Anmeldebereich) sollten deswegen vor allem bei natürlicher Belüftung mit CO₂ Messgeräten mit gut sichtbarem Display ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit schnell anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu überprüfen.

Besondere Herausforderungen der Infektionsprävention in Arztpraxen sind, dass im Praxisalltag immer wieder neue Kontakte und somit Risiken für Transmissionen entstehen. Das Personal hat täglich Kontakte im Rahmen des Arbeitsweges und des eigenen Haushalts bzw. sozialen Umfeldes. Die Patienten und Patientinnen haben ebenfalls private Kontakte und, je nach Grunderkrankung, weitere Kontakte zum Gesundheitswesen. In den Praxen selbst sind täglich andere Patienten und Patientinnen anwesend, sodass schnell größere Infektionsketten entstehen können. Insbesondere in Gemeinschaftsbereichen wie Anmeldung oder Wartezimmer, halten sich über längere Zeiträume meist viele Personen gleichzeitig auf, sodass die Gefahr einer Erregerübertragung besteht.

Aufgrund der wenigen vorliegenden Studien konnten aus der Literaturrecherche keine allgemein gültigen Empfehlungen zur Infektionsprävention in Arztpraxen abgeleitet werden. Stattdessen haben wir uns an den Empfehlungen der Kassenärztlichen Vereinigung Baden-Württemberg orientiert, die Empfehlungen zur Pandemieplanung mit SARS-CoV-2 verfasst hat und wollen diese im Folgenden zusammenfassend darstellen (Kassenärztliche_Vereinigung_Baden-Württemberg, 2021).

Zur Infektionsprävention in den Arztpraxen kann zwischen organisatorischen/ strukturellen Maßnahmen und spezifischen Maßnahmen unterschieden werden. Um die Transmissionsgefahr innerhalb der Praxen zu reduzieren, sollten Sprechzeiten bzw. die Einbestellung der Patienten und Patientinnen so geplant werden, dass möglichst wenige Patienten und Patientinnen bzw. Begleitpersonen gleichzeitig bzw. über einen längeren Zeitraum in der Praxis anwesend sind. Zudem ist es sinnvoll zeitversetzte Sprechzeiten für Patienten und Patientinnen mit bestehender (z.B. SARS-CoV-2) Infektion oder Infektionsverdacht und Patienten und Patientinnen, die die Praxen aus anderen Gründen aufsuchen, anzubieten. Zusätzlich zu der zeitlichen Trennung sollte eine räumliche Trennung, v.a. in Wartebereichen zwischen den verschiedenen oben genannten Patientengruppen/ -kohorten erfolgen. Gegebenenfalls kann es hilfreich sein, bereits bei der telefonischen Anmeldung oder spätestens bei der Anmeldung in der Praxis eine kurze Symptomabfrage durchzuführen, um Infektions-/ Verdachtsfälle frühzeitig zu identifizieren und von den übrigen Patienten und Patientinnen zu separieren. Allerdings besteht hier für Verdachtsfälle, die ähnliche Symptome aus anderen Ursachen haben eine Infektionsgefahr, wenn diese mit bestätigten Fällen kohortiert werden. Zusätzliche Maßnahmen, die jedoch je nach Größe der Praxis schwierig umzusetzen sind, kann eine strukturierte Wegeführung oder eine Umfunktionierung von Praxisräumen sein.

Wenn es die Praxisstruktur zulässt sollten symptomatische Verdachtsfälle vor Ort getestet werden, damit man je nach Ergebnis erforderliche Maßnahmen schnell einleiten kann. Weitere organisatorische Maßnahmen sind die Bereitstellung von ausreichend PSA bzw. Desinfektionsmitteln. Wenn gegen den Erreger ein Impfstoff verfügbar ist, stellt die Impfung von Personal und Patienten und Patientinnen einen weiteren Baustein der Infektionsprävention in Arztpraxen dar.

Damit die infektionspräventiven Maßnahmen in einer Praxis gut umgesetzt werden können, ist einerseits eine Information der Patienten und Patientinnen über erforderliche Maßnahmen nötig, zusätzlich müssen Beschäftigte je nach Kenntnisstand in spezifische Maßnahmen eingewiesen und regelmäßig geschult werden, z.B. über die richtige Anwendung von PSA, Übertragungswege des Erregers und entsprechende Verhaltensmaßnahmen.

Für eine gute Infektionsprävention in Arztpraxen sollten mehrere Strategien simultan angewandt werden. Wie auch in anderen Einrichtungen des Gesundheitswesens stellen Basishygienemaßnahmen die Grundlage der Infektionsprävention dar. Diese Basishygienemaßnahmen sollten immer, bei allen Patienten und Patientinnen unabhängig von einer bestehenden Erkrankung oder Infektionsverdacht durch alle Beschäftigte durchgeführt werden. Beispiele der Basishygiene sind die Händehygiene, Personalhygiene, der richtige Einsatz von PSA, sowie die korrekte Aufbereitung von Medizinprodukten und Oberflächen. Zudem sollte ein Hygieneplan vorliegen, in welchem Vorgaben bzw. notwendige Maßnahmen dokumentiert sind und einfach nachgeschlagen werden können.

Darauf aufbauend sind erregerspezifische Hygienemaßnahmen bei bestimmten Erkrankungen anzuwenden, wenn die Gefahr einer Erregerübertragung besteht, zum Beispiel Kontaktisierungsmaßnahmen bei Kontaktübertragung wie bei vielen Gastroenteriserregern, oder Maßnahmen wie vermehrtes Lüften und Anzeigen einer Lüftungsnotwendigkeit mittels CO₂ Messgeräten bei aerogener Übertragung wie mit SARS-CoV-2. Im Falle einer Pandemie müssen gegebenenfalls weitere Schutzmaßnahmen erfolgen, die zusätzlich von einem breiten Teil der Bevölkerung angewandt werden sollten und meist über einen längeren Zeitraum nötig sind. Bei neuen Erkenntnissen über den Erreger und je nach regionaler Inzidenz, kann eine Anpassung der Maßnahmen nötig sein.

Limitationen

Das Scoping Review hat folgende Limitationen. Durch die Literaturrecherche konnten nur vier Studien identifiziert werden, die den Einschlusskriterien entsprachen, da insgesamt nur wenige Studien zur Belüftungssituation und zu Gebäude-assoziierten Faktoren zur Vermeidung von Infektionen von luftgetragenen Pathogenen wie SARS-CoV-2 in Arztpraxen publiziert sind. Andere infektionspräventive Strategien wie regelmäßiges Testen, das Tragen von Masken etc. standen nicht im Fokus des Reviews und der infektionspräventive Effekt dieser Maßnahmen in Bezug auf einen bestimmten Praxisbesuch ist aufgrund des ambulanten Settings und der diversen anderen Kontaktmöglichkeiten außerhalb der Arztpraxen schwer messbar.

Es wurden nur Studien eingeschlossen, die in Allgemeinarzt-, Internistischen- und Kinderarztpraxen durchgeführt wurden. Studien, die in Zahnarztpraxen durchgeführt wurden nicht eingeschlossen. Dieses Setting ist nur eingeschränkt mit anderen Arztpraxen vergleichbar, da Diagnostik und Therapie im Rahmen von Zahnarztbesuchen oft aerosolproduzierende Tätigkeiten umfassen, die das Infektionsrisiko erhöhen können. Außerdem werden Diagnostik und Therapie im Mundbereich der Patienten und Patientinnen durchgeführt, sodass das Personal direkt Kontakt mit potentiell virushaltigem Material ausgesetzt ist und Schutzmaßnahmen wie das Tragen von Masken teilweise nur einseitig durch das Personal erfolgen können.

Schlussfolgerung

Die Belüftungssituation in Arztpraxen ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht ausreichend in Feldstudien untersucht. Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko durch luftgetragene Infektionserreger zu reduzieren. Warte- und Sprechzimmer sollten vor allem bei natürlicher Belüftung der Räumlichkeiten mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu überprüfen.

Praxen sollten im Pandemiefall ein Bündel an infektionspräventiven Maßnahmen wie Lüftung, räumliche und zeitliche Kohortierung von Patienten und Patientinnen, Einsatz von PSA, Aufklärung bzw. Schulung von Patientinnen und Beschäftigte, etc. umsetzen und die Maßnahmen in Hygiene-/ Pandemieplänen festhalten.

Infektionspräventive Maßnahmen in Form von Basis-/Standardhygienemaßnahmen sollten zum Schutz von Patienten und Patientinnen und Personal unabhängig von einer bestehenden Pandemie etabliert werden.

Quellen

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte. (2018). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft- Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden.

Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 51, 1358-1369.

<https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>

Baudet, A., Baurès, E., Blanchard, O., Le Cann, P., Gangneux, J. P., & Florentin, A. (2022). Indoor Carbon Dioxide, Fine Particulate Matter and Total Volatile Organic Compounds in Private Healthcare and Elderly Care Facilities. *Toxics*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/toxics10030136>

Birmili, W. S., H. C.; Moriske, H. J.; Daniels, A.; Straff, W. (2021). [Ventilation concepts in schools for the prevention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air].

Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz, 64(12), 1570-1580.

<https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4> (Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft.)

Bloch, A. B., Orenstein, W. A., & Ewing, W. M. (1985). Measles outbreak in a pediatric practice: Airborne transmission in an office setting. *Pediatrics*, 75(4), 676-683.

<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed3&NEWS=N&AN=15079518>

Boender, T. S., Bender, J. K., Krüger, A., Michaelis, K., & Buchholz, U. (2021). Factors preventing SARS-CoV-2 transmission during unintentional exposure in a GP practice: a cohort study of patient contacts; Germany, 2020. *medRxiv*, 2021.2003.2017.21251046. <https://doi.org/10.1101/2021.03.17.21251046>

Daubert, G., Gillet, G., Guet, L., Marini, H., & Merle, V. (2021). General Practitioners' Practice premises and Risk of Viral Cross-Transmission: A French Observational Multicenter Study. *J Prim Care Community Health*, 12, 21501327211043734. <https://doi.org/10.1177/21501327211043734>

Devlin, A. S. (2022). Seating in Doctors' Waiting Rooms: Has COVID-19 Changed Our Choices? *Herd*, 15(4), 41-62. <https://doi.org/10.1177/19375867221104248>

Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., de Gennaro, G. (2021). CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>

- ECDC. (2022). *Factsheet for health professionals on Coronaviruses* European Centre for Disease Prevention and Control. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/factsheet-health-professionals-coronaviruses>
- Guo, Z. D., Wang, Z. Y., Zhang, S. F., Li, X., Li, L., Li, C., Cui, Y., Fu, R. B., Dong, Y. Z., Chi, X. Y., Zhang, M. Y., Liu, K., Cao, C., Liu, B., Zhang, K., Gao, Y. W., Lu, B., & Chen, W. (2020). Aerosol and Surface Distribution of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Hospital Wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), 1583-1591. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200885>
- Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., & Kriegel, M. (2020). Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10332>
- Kassenärztliche_Bundesvereinigung. (2023a). *CORONA-BILANZ*. Retrieved April 04, 2023 from <https://www.kbv.de/html/corona-bilanz.php>
- Kassenärztliche_Bundesvereinigung. (2023b). *Kennzahlen der ambulanten Versorgung auf einen Blick*. Retrieved April 04, 2023 from <https://www.kbv.de/html/zahlen.php#:~:text=99%20658%20Praxen%20gibt%20es,pro%20Jahr%20in%20den%20Praxen.>
- Kassenärztliche_Vereinigung_Baden-Württemberg. (2021). Pandemieplanung in der Arztpraxis - Eine Anleitung zum Umgang mit Corona.
- Kriegel, M., Hartmann, A., Buchholz, U., Seifried, J., Baumgarte, S., & Gastmeier, P. (2021). SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010220>
- Laurent, M. R., & Frans, J. (2022). Monitors to improve indoor air carbon dioxide concentrations in the hospital: A randomized crossover trial. *Sci Total Environ*, 806(Pt 3), 151349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151349>
- Lehmann, I., Peytremann, A., & Mueller, Y. (2022). Impact of the COVID-19 pandemic on adherence to infection prevention and control measures between 2019 and 2021 in Swiss sentinel private practices: repeated cross-sectional surveys. *Swiss Med Wkly*, 152, w30170. <https://doi.org/10.4414/smw.2022.w30170>
- Mehrotra, A. C., M. E.; Linetsky, D.; Hatch, H.; Cutler, D. M. (2020). *The Impact of the COVID-19 Pandemic on Outpatient Visits: A Rebound Emerges, To the Point (blog)*, Commonwealth Fund. <https://doi.org/10.26099/ds9e-jm36>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*, 139, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *medRxiv*, 2020.2009.2009.20191676. <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>
- Pettenkofer, M. v. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta'sche Buchhandlung, Munich, Germany.
- Remington, P. L., Hall, W. N., Davis, I. H., Herald, A., & Gunn, R. A. (1985). Airborne transmission of measles in a physician's office. *JAMA*, 253(11), 1574-1577. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3974036> https://jamanetwork.com/journals/jama/articlepdf/397383/jama_253_11_022.pdf
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237-245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333-341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>

Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med*, 8(7), 658-659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)

van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382(16), 1564-1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558). <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. [Review] [Review.]. *Science August*, 373(6558). <https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftx&AN=00007529-202108270-00002>

Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Kindergärten

Einleitung

In Deutschland wurden im März 2022 35,5 % der Kinder unter 3 Jahren und 91,7 % der Kinder bis 6 Jahre in einer Kindertagesbetreuungseinrichtung betreut. Damit wurden insgesamt ca. 3,9 Mio. Kinder bis 6 Jahre in einer der 59.323 Betreuungseinrichtungen von 751.159 Beschäftigten betreut (Statistisches Bundesamt, 2022a, 2022b). Kindergärten und Kindertagesbetreuungseinrichtungen, im Folgenden nur noch Kindergärten genannt, sind Teil der kritischen Infrastruktur. Die Kinder werden dort, meist je nach Arbeitssituation der Eltern, für unterschiedlich lange Zeiträume betreut, um den Eltern die Ausübung ihrer Berufe zu ermöglichen. Darüber hinaus ist es für die Kinder ein wichtiger Ort, um soziale Interaktionen mit anderen Kindern bzw. Erwachsenen zu erleben und zu erlernen und multiple Fähigkeiten, zum Beispiel das Sprachverständnis bzw. die Sprachproduktion zu verbessern. Im Kindergarten finden unterschiedliche Aktivitäten, wie gemeinsames spielen- drinnen und draußen-, singen, lesen, basteln, toben, aber auch essen und schlafen statt. Die Pädagogischen Fachkräfte haben, insbesondere bei den Krippenkindern (i.d.R. bis 3 Jahre), einen sehr engen Körperkontakt, zum Teil auch zu deren Ausscheidungen, da diese Kinder oftmals noch getragen, gefüttert und gewickelt werden müssen (Aiano et al., 2022; Kim et al., 2022). Im Vergleich zu der Betreuung an den Schulen, gibt es mehr Personal pro Kind. Je nach Größe der Kindergärten sind die Kinder oft in mehrere Gruppen (meist Krippen- bzw. Elementarbereich) unterteilt, insbesondere bei kleineren Kindergärten bzw. außerhalb der Kernzeiten werden die Kinder aller Altersklassen auch teilweise gemeinsam betreut bzw. die Gruppen gemischt. Oft gibt es auch gruppenübergreifende Räume, zum Beispiel eine Cafeteria oder Bewegungsräume, in der Kontakte zwischen den Gruppen stattfinden können. Insgesamt gibt es im Rahmen des Kita- Alltages demnach viele Möglichkeiten für (enge) Kontaktsituationen zwischen den Kindern untereinander sowie zwischen Kindern und Erwachsenen, mit dem Risiko der Verbreitung von luftgetragenen Infektionen wie mit dem Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2 (SARS-CoV-2), welches die Coronavirus Krankheit 2019 (COVID-19) verursacht und am 11. März 2020 von der WHO zur Pandemie erklärt wurde (WHO, 2020). SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über Tröpfchen, sowie über virushaltige Aerosole übertragen. Diese werden unter anderem beim Atmen, Sprechen, Niesen und Husten ausgestoßen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; Wang et al., 2021). Die indirekte Kontaktübertragung über kontaminierte Oberflächen oder Gegenständespiel hat nach aktuellem Wissensstand eine untergeordnete Rolle (ECDC, 2022). Übertragungen durch Tröpfchen finden eher im Nahfeld einer Person (bis ca. 1,5 m) statt, Aerosole und darin enthaltene Viruspartikel können über längere Zeit im Raum bestehen bleiben, sodass hier ebenfalls eine Infektionsgefahr im Fernfeld besteht, die auch nach Verlassen des Raumes einer infektiösen Person bestehen bleibt. Allerdings gibt es zwischen Tröpfchen- und luftgetragenen Infektionen fließende Übergänge, sodass eine strikte Unterscheidung für Infektionen im Nah- und Fernfeld nicht möglich bzw. sinnvoll ist (Birmili, 2021).

Andere virale oder bakterielle Infektionserreger, die aerogen oder durch Tröpfcheninfektion übertragen werden (z.B. Influenza Virus, respiratorisches Synzytial Virus (RSV), Rhinovirus), können durch die engen Kontakte in und zwischen den Gruppen ebenfalls verbreitet werden und zu lokalen Ausbrüchen führen (Chu et al., 2013; Šubelj, 2018). Weitere relevante Erreger in Kindergärten sind beispielweise gastrointestinale Infektionserreger, z.B. das Norovirus, Shigellen, Rotaviren, Salmonellen oder Campylobacter (Collins J.P., 2018; Lyman et al., 2009; Mattison et al., 2022). Im Rahmen dieses Reviews wurde der Fokus auf SARS-CoV-2 oder andere luftgetragene Infektionserreger gelegt.

Aufgrund stark schwankender Inzidenzen wird der Verlauf der SARS-CoV-2 Pandemie häufig in Wellen dargestellt. Dabei begann die erste Welle im Frühjahr und die zweite Welle im Herbst 2020, hier war jeweils der Wildtyp von SARS-CoV-2 die vorherrschende Virus Variante. Die dritte Welle wurde durch die Alpha Variante ausgelöst und war im Frühjahr 2021 zu verzeichnen. Im Herbst/Winter 2021 begann die vierte Welle mit der Delta Variante, die im Januar 2022 in die fünfte Welle mit der Omikron Variante überging (Robert_Koch_Institut, 2022c).

Im Zuge eines bundesweiten Lockdowns wurden ab Mitte März sämtliche Kindergärten in Deutschland geschlossen und wurden nach der Wiedereröffnung je nach epidemiologischer SARS-CoV-2 Lage in den einzelnen Bundesländern für unterschiedlich lange Perioden wieder (teil)geschlossen bzw. ganze Gruppen bei

positiven Fällen in Quarantäne geschickt (Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie, 2020). Es bestanden wenige Ausnahmen für eine Notbetreuung von Kindern mit Eltern in systemrelevanten Berufen. Viele Eltern mussten die Kinderbetreuung zusätzlich während der Ausübung ihrer Berufe übernehmen. Im Zeitraum zwischen August 2020 und Mai 2021 waren über 2000 Kindergärten komplett geschlossen, zusätzlich waren ungefähr 6330 Gruppen geschlossen (Loss et al., 2021). Die Pädagogischen Fachkräfte von Kindergärten hatten, insbesondere während der zweiten Kitaschließungsphase, Schwierigkeiten die Kernaufgaben der motorischen, sprachlichen und sozio-emotionalen Förderung der Kinder zu gewährleisten. Vor allem auch für Kinder aus nicht deutschsprachigen Familien ist die Förderung des Spracherwerbs im Rahmen des Kindergartenbesuchs essentiell (Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie, 2021).

Eine verbesserte Belüftung kann die Zeit, die ausgeatmete Tröpfchen bzw. Aerosole im Raum verbleiben, reduzieren (Somsen et al., 2020). Im Gegensatz dazu bedeutet das, dass in schlecht belüfteten Räumen eine potentielle Infektionsgefahr durch die Einatmung von infektiösen Aerosolen besteht, da luftgetragene Erreger über einen längeren Zeitraum im Raum verbleiben können. Die Belüftung kann durch natürliche Lüftung (NV), meist über Fenster oder Türen, mechanische Lüftung (MV), meist über Raumlüfttechnische Anlagen (RLT Anlagen) oder eine Kombination aus beiden in Form von hybrider Lüftung erfolgen.

Kohlenstoffdioxid (CO_2), ein Endprodukt der Atmung, wird zusammen mit weiteren Partikeln, die potentiell virus-/erregerrhaltig sein können, ausgeatmet. Die CO_2 Konzentration wird deswegen oft als Indikator für die Innenraumluftqualität (IAQ) genutzt und als Surrogatparameter für das Übertragungs- und Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 oder andere luftübertragene Erreger herangezogen (Di Gilio, 2021; Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003; Shendell et al., 2004). Ursprünglich wurde ein Referenzwert der CO_2 Konzentration von 1000 ppm von Max von Pettenkofer als Maximalwert für die Innenraum CO_2 Konzentration vorgeschlagen und daraus abgeleitet, die notwendigen Luftwechselraten pro Person. Er wollte mit diesem Grenzwert vor allem möglichen Konzentrationsstörungen von Schüler und Schülerinnen vorbeugen (Pettenkofer, 1858). In Deutschland werden CO_2 Konzentrationen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich eingestuft, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte, 2018). Die CO_2 Konzentration kann vergleichsweise einfach und günstig mit CO_2 Messgeräten gemessen werden. Die Verwendung der CO_2 Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko hat jedoch auch Limitationen. Nach einem gewissen Zeitraum wird ein „steady state“ der CO_2 Konzentration erreicht, die Menge an virushaltigen Partikeln, die eine empfängliche Person einatmet, steigt jedoch kontinuierlich mit der Zeit, auch wenn die Konzentration der Partikel selbst gleichbleibt. Kriegel et al. schlagen deswegen vor, die CO_2 Dosis ($\text{ppm} \cdot \text{h}$) als möglichen Surrogatparameter zur Abschätzung des Infektionsrisikos zu nutzen (Kriegel et al., 2021).

Im Vergleich zu den Schulen bestehen besondere Herausforderungen bezüglich der Umsetzung infektionspräventiver Maßnahmen in Kindergärten: Gerade die jüngeren Kinder können bestimmte Maßnahmen noch nicht verstehen bzw. umsetzen (z.B. Masken tragen, Abstand halten). Die jüngeren Kinder nehmen viele Gegenstände in den Mund, was zur Kontamination der Gegenstände führen kann. Es gibt keine definierten Pausenzeiten, in welchen regelmäßige Lüftungen stattfinden können. Die Kinder haben teilweise einen sehr hohen Aktivitätsgrad (rennen, toben) bzw. eine hohe „Sprech“-lautstärke (singen, schreien). Studien haben gezeigt, dass die Aktivität bzw. Sprechintensität, sowie das Alter, die Virusemission beeinflussen (Asadi, 2019; Euser et al., 2022; Fleischer et al., 2022; Hartmann et al., 2020; Murbe et al., 2021; Thompson et al., 2021; Viner et al., 2021). Auch eine Abstrichentnahme für Screeningtestungen kann teilweise nur erschwert durchgeführt werden, da die jüngeren Kinder die Notwendigkeit nicht verstehen und sich ggf. wehren. Dafür verbringen die Kindergartenkinder, zumindest sofern der Kindergarten über einen Außenbereich verfügt, oft längere Zeiten am Tag draußen, wo im Allgemeinen von einem geringeren Infektionsrisiko auszugehen ist als in Gebäuden (Bulfone et al., 2021; Robert_Koch_Institut, 2021). Insgesamt leiden Kinder, die in Kindergärten und nicht zu Hause betreut werden, insbesondere in den jüngeren Altersgruppen vermehrt unter respiratorischen und gastrointestinalen Infekten, sodass die Erregerlast in Kindergärten im Allgemeinen vergleichsweise hoch ist (Kolarik et al., 2016; Lu et al., 2004; Mendes, 2014).

In einer Studie, in der SARS-CoV-2 Ausbrüche in Kindergärten untersucht wurden, gaben betroffene Kindergärten an, dass innerhalb von Kohorten 74% der Kinder keinen Abstand untereinander einhalten konnten, zudem konnte 64% des Personals keinen Abstand zu den Kindern halten. Zwischen verschiedenen Kohorten konnten in 50% der Kindergärten Abstand des Personals zu Personal aus anderen Kohorten gehalten

werden, 61% der Kinder hatten keinen Kontakt zu Kindern aus anderen Kohorten. Kontakte fanden zum Beispiel in Personalräumen oder Sanitäranlagen statt, die Kohorten übergreifend durch das Personal genutzt wurden (Aiano et al., 2022).

Zur Infektionsprävention können in Kindergärten deshalb organisatorische Maßnahmen wie Beibehaltung fester Gruppenkonstellationen, regelmäßige Lüftungen etc. teilweise leichter umgesetzt werden, als individuelle hygienische Infektionspräventionsmaßnahmen, wie Abstandhalten bzw. Masken tragen (Neuberger et al., 2022).

Der Beitrag von Kindern zum Infektionsgeschehen von SARS-CoV-2 wurde kontrovers diskutiert. Insbesondere zu Beginn der Pandemie waren die Inzidenzen unter Kindern i.d.R. niedriger als bei Erwachsenen. Zudem wurde im Rahmen von Seroprävalenzstudien gezeigt, dass zu Beginn der Pandemie die Seroprävalenzen bei Kindern und Jugendlichen ebenfalls niedrig waren. In der ersten Welle lag die gemessene Seroprävalenz bei Kindern bis zum Grundschulalter unter 1%, im Februar 2021 betrug die Seroprävalenz bei Kindern im Kitaalter 5,6% (Thamm et al., 2021). Ab der 3. Welle stieg das Infektionsrisiko auch unter den jüngeren Kindern an (Loss et al., 2021). Im weiteren Verlauf, insbesondere während der fünften Welle, stiegen auch die Inzidenzen bei Kindergarten Kindern stark an, so war bei den 0-4 Jährigen in der Kalenderwoche 06/2022 eine Inzidenz von ca. 1327 gemeldet (Robert_Koch_Institut, 2022b). Kinder haben oft einen milderen Krankheitsverlauf als Erwachsene. Trotzdem können Kinder ebenfalls einen schweren Verlauf haben bzw. unter Langzeitfolgen der Erkrankung leiden (Belhadj et al., 2020; Klučka et al., 2021; Levin, 2020; Ramcharan et al., 2020). Zusammenfassend lässt sich postulieren, dass Kinder zur Verbreitung des Virus beitragen und das Virus in Familien eintragen können, insbesondere bei unerkannten Infektionen, wie es vor allem am Anfang der Pandemie bei noch geringen Testkapazitäten häufig der Fall war oder bei asymptomatischen Verläufen. (Lopez et al., 2020; Ludvigsson, 2020; Mehta et al., 2020)

Aktuell (Stand Dezember 2022) sind die SARS-CoV-2 Impfstoffe in Deutschland nur für bestimmte Altersgruppen zugelassen bzw. es besteht zum Teil nur eine Impfempfehlung für Kinder mit bestimmten Risikofaktoren oder infektionsgefährdeten Familienangehörigen: Für Kinder ohne Vorerkrankungen empfiehlt die STIKO aktuell eine einmalige Impfung erst ab 5 Jahren bzw. eine vollständige Grundimmunisierung mit Auffrischungsimpfung ab 12 Jahren. Eine Impfempfehlung für gesunde Personen unter 18 Jahren wurde erst im August 2021 ausgesprochen, für Kinder von 5-11 Jahren erst im Mai 2022 (Robert_Koch_Institut, 2022a). Für viele Kindergartenkinder fehlt demnach zurzeit noch ein zusätzlicher Schutz vor Infektionen bzw. vor schweren Verläufen durch die Impfung.

Um in Zukunft weitere Schließungen der Kindergärten zu vermeiden und ein sicheres Umfeld für Kinder und das Personal zu schaffen, müssen infektionspräventive Maßnahmen ergriffen werden, um die Verbreitung von SARS-CoV-2 bzw. anderen luftgetragenen Infektionserregern innerhalb der Kindergärten bestmöglich zu verhindern.

Ziel des Scoping Reviews

Das Ziel dieses Scoping Reviews war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation in Kindergärten, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Methoden

Suchstrategie

Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect wurde im Zeitraum 01.11.2022 bis 07.11.2022 durch eine Person durchgeführt. Publikationen, welche bis einschließlich 07.11.2022 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Um relevante Studien zu identifizieren, wurde die Recherche durch die Kombination der folgenden Schlüsselwörter (übersetzt ins Englische) durchgeführt: „Kindergarten“, „Kindertagesstätte“, „Kita“, „Kinderbetreuung“, „Vorschule“, „Luftübertragung“, „aerogene Infektion“, „Infektionsrisiko“, „Transmissionsrisiko“, „Aerosol“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Influenza“, „Masern“, „respiratorisches Synzytial Virus“, „Lüftung“, „Raumluftqualität“, „Luftwechselrate“ und „Kohlenstoffdioxid“

(„CO₂“). Zusätzlich wurden Publikationen berücksichtigt, die durch die Bearbeitung zuvor identifizierter Studien, gefunden wurden.

Das Programm Endnote wurde für die Literaturverwaltung und die Elimination von Duplikaten verwendet.

Ein- und Ausschlusskriterien

Studien, welche in Englisch oder Deutsch verfasst wurden, wurden berücksichtigt. Es wurden Studien eingeschlossen, welche in Gruppenräumen oder Gebäuden von Kindertagesstätten oder Kindergärten durchgeführt wurden mit den primären Endpunkten CO₂ Konzentration oder Infektions- bzw. Transmissionsrisiko für verschiedene luftgetragene Infektionserreger (z.B. SARS-CoV-2, Masern, Influenza). Zudem wurden nur Studien eingeschlossen, die in Ländern mit hohem und mittlerem Einkommen durchgeführt wurden, um eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit zu gewährleisten. Bezüglich des Studiendesigns wurden Interventionsstudien, Beobachtungsstudien und mathematische Modellierungsstudien eingeschlossen.

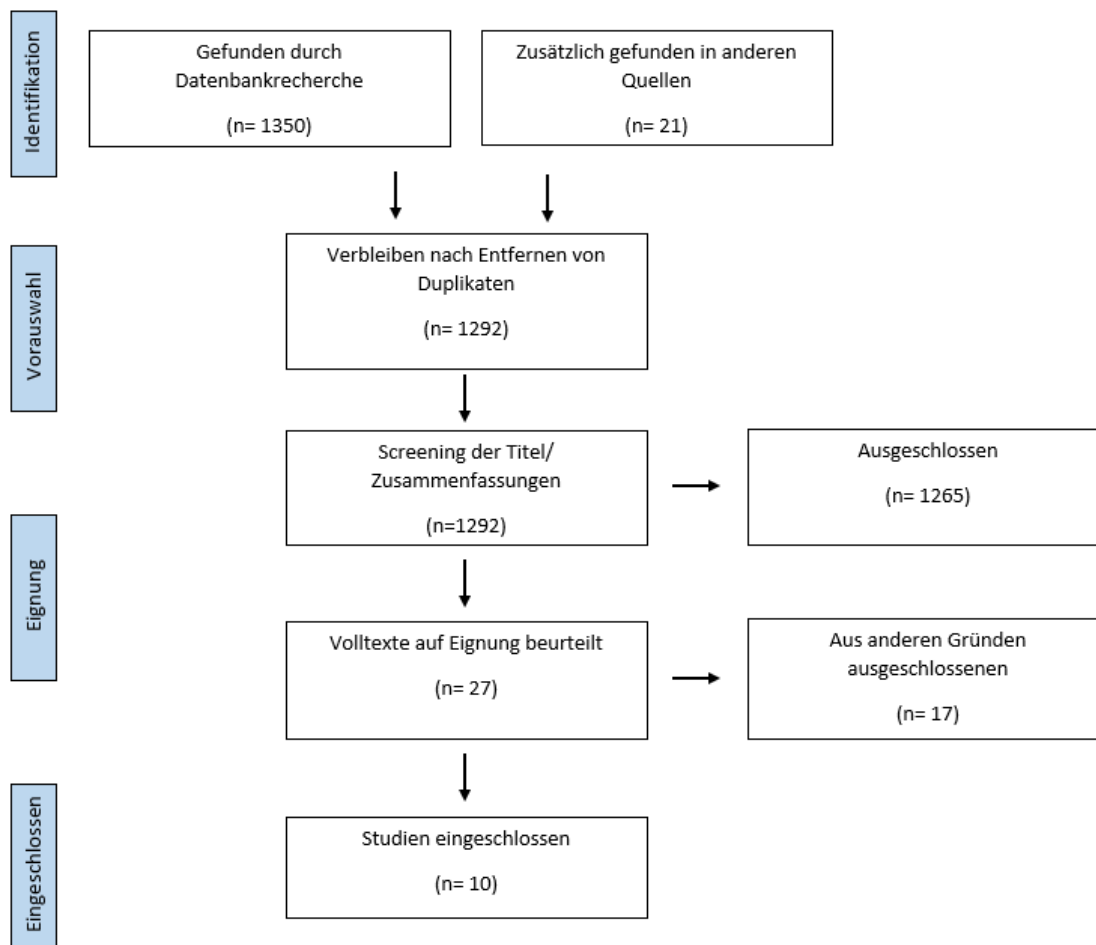
Aufgrund einer hohen Redundanz von Studien, die vor der Pandemie durchgeführt wurden und hauptsächlich den CO₂ Verlauf in Kindergärten untersuchten, u.a. als Surrogatparameter für das Auftreten von Beschwerden wie z.B. Asthma, wurden Beobachtungs- und mathematische Modellierungsstudien, mit primären Endpunkt CO₂ Konzentration und keinem Zusammenhang mit der Übertragung (luftgetragener) Infektionen, die vor 2020 publiziert wurden, ausgeschlossen.

Studienauswahl

Nach der Elimination von Duplikaten, wurden die verbleibenden Studien anhand der Titel und Abstracts gescreent. Die verbliebenen Studien wurden im Anschluss im Volltext gelesen und auf Eignung geprüft.

Abbildung 46 zeigt das Flussdiagramm zur Studienauswahl.

Abbildung 46
Flussdiagramm Studiaauswahl



Quelle: Charité

Struktur

Die eingeschlossenen Studien wurden anhand des Studientypus in 2 Tabellen gruppiert: In **Tabelle 30** sind Interventionsstudien aufgeführt, in **Tabelle 31** sind Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen zusammengefasst.

Ergebnisse

Durch die Literaturrecherche konnten zehn Studien gefunden werden, die den Einschlusskriterien entsprachen. Darunter waren zwei Interventionsstudien und acht Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen mit zum Teil ergänzender mathematischer Modellierung. Die Interventionsstudien hatten den primären Endpunkt CO₂ Konzentration. Bei den Beobachtungsstudien und Ausbruchsanalysen war der primäre Endpunkt teilweise die CO₂ Konzentration und teilweise das Infektions- bzw. Transmissionsrisiko verschiedener luftgetragener Infektionserreger (z.B. SARS-CoV-2). Einen Überblick über die Methoden und Ergebnisse der Studien geben die **Tabellen 30** und **31**.

Zusammenfassend lagen bei den identifizierten Studien in vielen Kindergärten die durchschnittlichen CO₂ Konzentrationen ohne spezifische Lüftungsmaßnahmen über 1000 ppm (Arar & Jung, 2021; Lovec et al., 2021; Rejc et al., 2020). Durch Verbesserung der Lüftungssituation konnten die CO₂ Konzentrationen sowohl durch Installation eines neuen mechanischen Belüftungssystem (Arar & Jung, 2021), als auch durch Verbesserung der natürlichen Belüftung deutlich gesenkt werden (Lovec et al., 2021).

In verschiedenen Ausbruchsanalysen wurden Unterschiede von Transmissionen durch Kinder bzw. Pädagogische Fachkräfte innerhalb der Kindergärten und in Haushalten untersucht. Aiano et al. zeigten, dass in 173 Kindergärten während der Alpha Welle das Personal in 72% der Indexfall für einen Ausbruch darstellte.

Die kumulative Inzidenz war beim Personal höher, wenn der Indexfall ebenfalls Personal war (33%), als wenn ein Kind der Indexfall war (26%) (Aiano et al., 2022). Ebenso war die sekundäre Infektionsrate bei Erwachsenen als Indexfall größer als bei Kinder Indexfällen (Häufigkeitsverhältnis 3,2). In dieser Studie wurden neben Kindern und Personal aus Kindergärten auch Lehrkräfte und Schüler und Schülerinnen berücksichtigt. In Kindergärten war die sekundäre Infektionsrate höher als in weiterführenden Schulen (Schoeps et al., 2021). Loss et al. konnten keinen Unterschied in der sekundären Befallsrate zwischen Indexfällen von Kindern bzw. Pädagogische Fachkräfte feststellen. Diese Studie

zeigte, dass die sekundäre Befallsrate von engen Kontaktpersonen in Haushalten größer war (53,3%) als von Kontaktpersonen im Kita Umfeld (7,7%) (Loss, 2022).

Tabelle 30
Interventionsstudien

Referenz	Studientypus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse
(Arar & Jung, 2021)	Interventionsstudie	32 Räume, 16 KiGä, Feb.-Nov. 2020, Vereinigte arab. Emirate	Messungen der Innenraumluftqualität anhand verschiedener Substanzen, u.a. CO ₂ vor (1) bzw. nach (2) Implementierung verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung der Innenraumluft (u.a. Installation eines neuen Belüftungssystems in 6 Räumen). Durchschnittstemperatur: 26,6°C. Bei (2) tlw. weniger anwesenden Kindern.	CO ₂ Konzentration	Durchschnittliche CO ₂ Konzentration von ca. 1113 ppm (1) auf ca. 645 ppm (2) durch neues Belüftungssystem gesenkt. Maximal-/ Minimalwerte: (1) 2607 bzw. 591 ppm, (2) 991 bzw. 436 ppm. CO ₂ Konzentration morgens niedrig bevor Kinder kommen (798 ppm). Nach Start des Kitaalltags am höchsten (1556 ppm), absinken nachmittags (1198 ppm) (Schlaf, Kinder gehen nach Hause).
(Lovec et al., 2021)	Interventionsstudie	12 Räume, 8 Kindergärten, Slowenien Winter 19/20 vor und 20/21 und während Pandemie	CO ₂ Messungen, Dokumentation über Personenanzahl und Lüftungsintervalle, 4 unterschiedliche architektonische Gebäudetypen. 1 Typ mit MV, diese Gebäude während Pandemie zusätzlich natürlich belüftet. (1) Vor Pandemie: individuelle Lüftungsprotokolle. (2) Während Pandemie: Lüftung gemäß Vorgaben des „National Institute of Public Health, Lubljana, Slovenia“, angelehnt an WHO Empfehlungen.	CO ₂ Konzentration	Geringere durchschnittliche CO ₂ Konzentration in (2) 847 ppm vs. (1) 1222 ppm, Differenz größer bei NV. Belegung der Räume in (2) meist um ca. 10% geringer.

Notiz: KiGa/KiGä= Kindergarten/ Kindergärten
Quelle: Charité

Tabelle 31
Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen

Referenz	Studientypus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse
(Rejc et al., 2020)	Beobachtungsstudie	2 KiGä, Slowenien, Frühjahr, Herbst, Winter	Messung u.a. der CO ₂ Konzentration zu verschiedenen Jahreszeiten. NV. Kinder 3-5 Jahre alt.	CO ₂ Konzentration	Mediane Innenraum CO ₂ Konz.: Herbst: 1410 ppm, Winter: 1869 ppm, Frühling: 1765 ppm. Maximum: 2570 ppm (Frühling). CO ₂ Konz > 1000 ppm in 89,3%, CO ₂ Konz > 2000 ppm in 10,7% (Frühling) bzw. in 18% (Winter).
(Kim et al., 2021)	Beobachtungsstudie	2 Räume, 1 KiGä, Südkorea, Sept. 2019 - Juni 2020	Messungen u.a. der CO ₂ Konz. in einem Gruppenraum (1), sowie einem „Aktivitätsraum“ (2). NV.	CO ₂ Konzentration	Durchschnittliche CO ₂ Konz: 648 ppm (1), 608 ppm (2); Maximum: 3623 ppm (1), 2627 ppm (2). Anteil mit CO ₂ Konz.> 1000 ppm in beiden Räumen größer im Winter: 19% (1), 13 % (2) als im Sommer: 12% (1), 1% (2). Im Gruppenraum insgesamt öfter Werte > 1000 ppm als im Aktivitätsraum (11% vs. 8%), Aktivitätsraum ist größer (68,4 m ² vs. 57,8 m ²).
(Kolarik et al., 2016)	Beobachtungsstudie	635 Kinder, 20 KiGä, Dänemark, 2011/2012	Untersuchung einer möglichen Assoziation zwischen der Luftwechselrate (ACR) und der Abwesenheit von Kindern durch Krankheit. Messung der ACR durch CO ₂ Zerfallsraten und mit der Perfluorkohlenstoff Tracer Gas Methode und CO ₂ Messungen während 1 Woche KiGä Betrieb. 18 KiGä mit MV.	CO ₂ Konzentration, Infektion mit respiratorischen Erregern bzw. Krankheiten (z.B. Influenza, Scharlach, Erkältung, Pneumonie, Diarrhoe)	Mediane CO ₂ Konz. 579 ppm (Durchschnitt: 643 ppm), Maximalwerte zwischen 681 und 2864 ppm. 2% Anstieg der Abwesenheit der Kinder pro 100 ppm CO ₂ Anstieg (nicht signifikant). ACR abhängig von Methodik, die durch CO ₂ Zerfallsmessung wurde als repräsentativ für Lüftungssituation angesehen. Je höher die berechnete ACR, desto niedrigere gemessene CO ₂ Konz. im entsprechenden Raum. Signifikante inverse Korrelation zwischen der Luftwechselrate (berechnet durch CO ₂ Zerfall) und der Abwesenheit von Kindern.
(Aiano et al., 2022)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	173 KiGä, England, Nov 20 - Jan 21 (Alpha Welle)	KiGä mit COVID-19 Ausbruch (mind. 2 bestätigte Fälle innerhalb 14 Tage) sollten Fragebogen ausfüllen. Information über Größe und Struktur von Kohorten und Kontakte zw. Personal und Kindern. 3. Lockdown, aber Kindergärten waren geöffnet.	SARS-CoV-2 Infektion	324 von 32.852 KiGä mit COVID-19 Ausbruch (1%). Personal in 72% Indexfall für Ausbruch, 510 Fälle (31%) bei Kindern bzw. 1147 Fälle bei Personal (69%). Kumulative Inzidenz beim Personal geringer, wenn Kind Indexfall war, als wenn Indexfall beim Personal (26% vs. 33%), bei Kindern kein Unterschied.
(Loss, 2022)	Beobachtungsstudie	30 KiGä Gruppen, 20 Gemeinden, Deutschland, Okt. 20 - Juni 21 (2. bzw. 3. Welle)	COALA Studie: Indexfälle und deren enge Kontaktpersonen im Kindergarten und Haushaltskontakte (Erwachsene und Kinder) wurden über 12 Tage nach Kontakt zum Indexfall beobachtet (Symptomkontrolle und Biosampling, u.a. PCR). Interview d. Haushaltsmitglieder, Kindergartenleitung, lokalen Gesundheitsbehörden.	SARS-CoV-2 Infektion	Übertragungsrisiko in verschiedenen KiGä Gruppen unterschiedlich, wenige Gruppen mit vielen Übertragungen. Sekundäre Befallsrate im KiGä niedriger als in assoziierten Haushalten (9,6% vs. 53,3%). Kein signifikanter Unterschied der sek. Befallsrate, wenn der Ursprungsfall ein Kind bzw. Erwachsener war. Die Infektionsanfälligkeit war innerhalb der Gruppe bei Kindern geringer als bei Erwachsenen (7,7 vs. 15,5%). Gruppen ohne Sekundärfälle hatten tendenziell mehr Platz und längere Aufenthaltszeiten im Freien.
(Lovec et al., 2020)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	71 Gruppen, 11 KiGä, 2 Wochen, Sept. 2020, Slowenien	Kindergärten mit Fällen wurden nach Daten bezüglich der Virusverbreitung, Gruppengröße, Alter d. Kinder etc. befragt. Gebäudecharakteristika (Baujahr, Anzahl der Eingänge, Stockwerke, Gemeinschaftsräume etc.) erhoben. Hauptsächlich NV.	SARS-CoV-2 Infektion	22 Fälle (4 Kinder, 18 Erwachsene). Weitere Verbreitung außerhalb der Gruppe in Kindergärten mit jungen Kindern (1-3 J.). Verbreitung hauptsächlich in kleineren Gebäuden (mit Gemeinschaftsräumen, gleichen Sanitäreinrichtungen für mehrere Gruppen). Die Anzahl und Dichte der Kinder hatte keinen Einfluss auf die Verbreitung innerhalb des Kindergartens.

(Dong et al., 2022)	Mathematische Modellierungsstudie, basierend auf Beobachtungsstudie	1 Kindergarten, Deutschland, Aug. - Okt.	Erhebung der architektonischen Gebäudecharakteristika (Öffnungsflächen = Größe und Anzahl von Fenstern, Türen, etc.) eines Beispielkindergartens (4 Gebäudezonen). Messung der Windgeschwindigkeit an verschiedenen Öffnungsflächen (NV), dann experimentelle Erzeugung der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit mittels eines Gerätes. Entwurf eines parametrischen Simulationsmodells und Berechnung der Infektionsraten für 3 verschiedene Monate (1) mit gemessenen Werten, (2) mit optimierten Variablen der Öffnungsflächen. Ziel: Veränderung der Infektionsraten zu berechnen.	SARS-CoV-2 Infektionsrate	Durchschnittliche Infektionsraten: (1) Aug: 8,1%, Sept: 9,3%, Okt.: 7,3%. Höhere Infektionsraten in bestimmten Gebäudeabschnitten (zwischen 0,6% und 84,0%, hier nur 1 Öffnungsfläche direkt nach außen → niedrige Innen-Windgeschwindigkeit.) Hohe Infektionsraten in engen Korridoren vs. Atrium (2) Die Position/Anordnung der Öffnungsflächen in Bezug auf die Raumarchitektur beeinflusst die Infektionsraten mehr als die jeweilige Öffnungsfläche selbst. Durchschnittliche Infektionsraten: Aug.: 4,5%, Sept.: 5,8%, Okt.: 4,2% (Effekt der Reduktion Abhängig von der Gebäudezone). Durchschnittliche Reduktion der Infektionsraten: 3% nach Optimierung der Variablen, in bestimmten Zonen um bis zu 18,4%. Durch Optimierung sinkt die Varianz der Infektionsrate zwischen den verschiedenen Zonen.
(Schoeps et al., 2021)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	Melddaten von Indexfällen aus Kindergärten und Schulen, Deutschland, Aug.-Dez. 2020	Nachverfolgung und Verlaufstestung enger Kontaktpersonen von 784 Indexfällen (591 Kinder, 157 Lehrer, 36 mit unbekannter Rolle). 441 Indexfälle und 14.591 enge Kontaktpersonen mit vollständigen PCR Ergebnissen. Berechnung der sekundären Infektionsrate (SAR) und des Häufigkeitsverhältnisses (incidence risk ratios/ IRR). Vorgeschriebene infektionspräventive Maßnahmen (Lüften, Abstand halten und Masken tragen außerhalb des Unterrichts).	SARS-CoV-2 Infektion	196 positiv getestete enge Kontaktpersonen, SAR: 1,5% (gesamt). In Kindergärten SAR: 2,5 %. Risiko höher bei Lehrkräften- Indexfällen (Lehrkräfte vs. Schüler und Schülerinnen/Kindergartenkindern: IRR= 3,2%) und Kindergärten (Kindergärten vs. weiterführende Schulen: IRR= 3,2).

Notiz: KiGa/KiGä= Kindergarten/ Kindergärten, IRR= Incidence risk ratio/ Häufigkeitsverhältnis, CO₂ Konz.= CO₂ Konzentration, SAR= sekundäre Infektionsrate
 Quelle: Charité

Diskussion

Ausbrüche von SARS-CoV-2 in Kindergärten, waren zu Beginn der Pandemie selten (Aiano et al., 2022). Die Verbreitung von SARS-CoV-2 innerhalb des Kindergartensettings bekam im Laufe der Pandemie jedoch mehr Relevanz (Robert_Koch_Institut, 2022b). Bis einschließlich Mai 2021 wurden 3286 Ausbrüche in Kindergärten und Horten gemeldet, hierbei stiegen die Zahlen der Ausbrüche ähnlich mit den Inzidenzen in der Bevölkerung und es kam vor allem mit zunehmender Dominanz der Alpha Variante zu einem deutlichen Anstieg der Meldungen sowie der Beteiligung von Kindergarten Kindern bei der Anzahl an Fällen. Die Fallzahlen innerhalb eines Ausbruches waren mit im Median 5-6 Fällen pro Ausbruch im Zeitraum Februar bis März 2021 eher niedrig (Loss et al., 2021). Ergebnisse aus der Corona-KiTa Studie zeigten ebenfalls einen steigenden Anteil an Infektionen im Rahmen des Kita Umfeldes im Verlauf der Pandemie. Während der ersten drei Wellen waren pro Woche weniger als 1% der Personen im Kita Umfeld infiziert. Seit dem Herbst 2021 kam es zu einem Anstieg der Infektionen durch die Delta Variante, im Januar 2022 stiegen die Neuinfektionen im Kindergarten Umfeld deutlich an, bei über 5% der Kinder bzw. Beschäftigten wurden in KW 05/2022 Neuinfektionen mit SARS-CoV-2 gemeldet. Eine Abnahme der Neuinfektionen wurde erst ab Ende März 2022 berichtet (Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie, 2022). Umso wichtiger sind gute infektionspräventive Maßnahmen, um die Kinder und das Personal bestmöglich vor Infektionen zu schützen.

Leider konnten durch die Literaturrecherche nur zehn Studien identifiziert werden, die den Einschlusskriterien entsprachen, darunter zwei Interventionsstudien. Die Studien waren bezüglich Gebäudecharakteristika (Größe der Kindergärten bzw. Anzahl der Gruppenräume, Anzahl und Größe von Öffnungsflächen), Anzahl der Personen pro Gruppe, Setting (Jahreszeit, Land) etc. sehr heterogen, zum Teil wurden bestimmte Parameter nicht im Detail beschrieben. Dies erschwerte es, generelle Empfehlungen zur Infektionsprävention in Kindergärten aus den Ergebnissen der Studien abzuleiten. In manchen Studien wurden mehrere infektionspräventive Maßnahmen simultan angewandt, sodass das Ausmaß des Effektes einer bestimmten Maßnahme schwer zu bestimmen war.

Durch Verbesserung der Belüftung, insbesondere durch mechanische Belüftung, konnte die CO₂ Konzentration in Kindergärten deutlich gesenkt werden (Arar & Jung, 2021). Ähnliche Ergebnisse zeigten auch ältere Studien: In einer kanadischen Studie konnte die durchschnittliche CO₂ Konzentration in Kindergärten mit mechanischem Belüftungssystem um 562 ppm gesenkt werden, darüber hinaus waren niedrigere Konzentrationen in älteren Gebäuden zu verzeichnen (Daneault et al., 1992). Canha et al. fanden heraus, dass mechanisch belüftete Räume in französischen Kindergärten und Grundschulen niedrigere mediane CO₂ Konzentrationen, als natürliche belüftete aufwiesen (Canha et al., 2016). Durch natürliche Belüftung konnten in den Studien in vielen Kindergärten mediane CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm erreicht werden. Trotzdem wurden oft weiterhin maximale CO₂ Konzentrationen über 1000 ppm gemessen (Kim et al., 2021; Kolarik et al., 2016; Lovec et al., 2020; Rejc et al., 2020). Kindergärten sollten deswegen, wenn möglich, mit einem mechanischen Belüftungssystem ausgestattet sein. Auch im Hinblick auf den Klimawandel und die Konsequenzen von Hitzeperioden für die Kinder wäre das vorteilhaft. Die CO₂ Konzentration kann relativ einfach und vergleichsweise kostengünstig mittels CO₂ Messgeräten bestimmt werden. Eine Studie hat gezeigt, dass durch den Einsatz von CO₂ Messgeräten im Krankenhaus signifikant kürzere Zeiträume mit CO₂ Konzentrationen > 1000 ppm, sowie niedrigere Maximalwerte vorlagen als zur Ausgangslage bzw. in der Postinterventionsphase (Laurent & Frans, 2022). Hoch frequentierte Bereiche in Kindergärten (Gruppenräume) sollten deswegen vor allem bei natürlicher Belüftung mit CO₂ Messgeräten mit gut sichtbarem Display ausgestattet sein, um eine Lüftungsnotwendigkeit schnell anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu überprüfen.

Verschiedene Gebäudecharakteristika können die CO₂ Konzentration bzw. das Infektionsrisiko beeinflussen.

In einem Kindergarten waren die durchschnittliche und maximale CO₂ Konzentration in einem Aktivitätsraum trotz höherer physischer Aktivität der Kinder niedriger als in einem normalen Gruppenraum. Der Aktivitätsraum war ca. 10 m² größer als der Gruppenraum. Genauere Angaben über die Aufenthaltsdauer bzw. Belegungsdichte der Räume wurden nicht geliefert (Kim et al., 2021), sodass eine Einschätzung eines möglichen Einflusses der die Raumgröße nicht möglich war.

Dong et al. postulieren, dass vor allem die Anordnung von Öffnungsflächen zur Lüftung in Gebäuden und resultierende Luftströmungen einen hohen Einfluss auf die Infektionsraten haben (Dong et al., 2022). Die Ergebnisse beruhen hauptsächlich auf einer Modellierung experimenteller Ergebnisse. In wie weit diese auf

andere Kindergärten übertragbar sind, bleibt zu klären. Die Studie von Lovec et al. untersuchte den Einfluss von Gebäudecharakteristika auf die Verbreitung von SARS-CoV-2 innerhalb 11 verschiedener Kindergärten. Die Kindergärten waren z.T. direkt als solche designt, andere wurden in Bestandsbauten nachträglich eingerichtet. Weitere Einflüsse auf die Virusverbreitung wie Lüftung und Basishygienemaßnahmen wurden nicht im Detail untersucht. Übertragungen außerhalb einer Kindergartengruppe wurden vor allem bei kleinen Kindergärten beobachtet, die mit vielen gemeinschaftlich genutzten Räumen ausgestattet waren. Hier bestand vermutlich auch mehr Kontakt beim Personal untereinander. Die Autoren postulieren deshalb, dass eine Trennung in Funktionseinheiten die Virusverbreitung durch Kontaktreduktion zwischen verschiedenen Gruppen reduzieren kann. Zusätzlich sollten andere infektionspräventive Hygienemaßnahmen angewandt werden, um insbesondere die häufigeren Transmissionen zwischen dem Personal zu minimieren (Lovec et al., 2020). Gleichmaßen beschreiben Neuberger et al., dass bei einem Wechsel von festen Gruppenkonstellationen zu einem offenen Gruppenkonzept, die Zahl an Infektionen unter den Kita Kindern bzw. dem Personal in der 2. und 3. Welle in Deutschland deutlich anstiegen. Bei einer festen Zuordnung von Personal zu den Gruppen sanken die Infektionszahlen unter Kindern und Personal in der 3. Welle. Die festen Gruppen von Kindern waren allerdings nur bei bis zu 80% (KW 21/2021) und die feste Zuordnung von Personal zu einer Gruppe nur in 69% (KW 21/2021) der Kitas etabliert (Neuberger et al., 2022).

Eine koreanische Studie untersuchte experimentell die Verbreitung von Virus ähnlichen Partikeln über lange Entfernungen (Simulation durch Partikel in Aerosolgröße) basierend auf einem echten Ausbruchsgeschehen in einer Kindertagesstätte. Die Autoren fanden heraus, dass sich die Viren ähnlichen Partikeln über weite Distanzen in andere Räume durch den Innenluftstrom verbreiten konnten. Wenn die Partikel nach Schließung des Kindergartens am Abend nicht vollständig eliminiert wurden (zum Beispiel durch NV oder den Einsatz von Luftreinigungsgeräten o.Ä.) wurden diese während der nicht genutzten Stunden weiträumig verteilt. Kim et al. fordern deshalb u.a. das Schließen von Zwischentüren, zum Beispiel zwischen Sanitäranlagen und den Räumen der Kinderbetreuung, um eine Verbreitung der Viren innerhalb eines Gebäudes zu minimieren. Architektonische Merkmale wie Wände oder Trennwände könnten die Virusverbreitung zusätzlich beeinflussen (Kim et al., 2022). Zusammenfassend lässt sich aus der Literaturrecherche, sowie aus weiteren Studien ableiten, dass eine räumliche Trennung verschiedener Gruppen mit festen Gruppenkonstellationen zur Infektionsreduktion beitragen kann.

Darüber hinaus können Umweltfaktoren wie zum Beispiel die Jahreszeit und damit einhergehende unterschiedliche Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außen die CO₂ Konzentration in Innenräumen, sowie das Lüftungsverhalten durch die anwesenden Personen beeinflussen. So zeigten Rejc et al., dass die medianen Innenraumkonzentrationen von CO₂ sowie die Zeiträume mit Werten > 2000 ppm im Winter höher waren als zu anderen Jahreszeiten (Rejc et al., 2020). Eine andere Studie beschreibt einen höheren Anteil mit CO₂ Konzentrationen > 1000 ppm im Winter als im Sommer (Kim et al., 2021). Angaben über die Frequenz und Dauer der Belüftung wurden in den Studien nicht gemacht. Zu verschiedenen Jahreszeiten kann es erforderlich sein die infektionspräventiven Maßnahmen anzupassen.

Verschiedene Studien untersuchten Infektionen im Rahmen des Kindergartenbetriebes bzw. den Einfluss und die Umsetzung unterschiedlicher infektionspräventiver Maßnahmen auf die Inzidenzen von SARS-CoV-2 oder anderen respiratorischen Infektionserregern. Eine finnische Studie ermittelte den Effekt von Schul- und Kitaschließungen auf die Inzidenz von verschiedenen respiratorischen Infektionserregern (SARS-CoV-2, RSV, Influenzavirus, Parainfluenzavirus, Adeno- und Rhinovirus) 2017-2019 im Vergleich zu 2020. Durch den Lockdown während der SARS-CoV-2 Pandemie sank die Inzidenz von respiratorischen Viren außer von SARS-CoV-2, diese sank erst acht Wochen nach Beginn des Lockdowns. Im Sommer stiegen die Inzidenzen von SARS-CoV-2 und Rhinoviren bereits an, bevor die Schulen bzw. Kitas im August wieder öffneten. Die Öffnungen hatten demnach keinen direkt sichtbaren Einfluss auf die Inzidenz eines der untersuchten Viren. Die Testkapazitäten auf SARS-CoV-2 waren begrenzt, sodass hauptsächlich symptomatische Personen getestet wurden. Außer dem Lockdown kamen weitere infektionspräventive Maßnahmen zur Anwendung (Händehygiene, Isolation bzw. Quarantäne für symptomatische Personen), die sicherlich ebenfalls das Infektionsgeschehen beeinflussten (Haapanen et al., 2021). Bezüglich der Umsetzung von infektionspräventiven Maßnahmen berichten die Autoren der Corona-Kita Studie, dass viele der infektionspräventiven Maßnahmen in Deutschland während der vierten und fünften Welle gut umgesetzt wurden, allerdings wurden einige der zuvor gut etablierten Maßnahmen ab Ende Februar 2022 wieder

reduziert. So wurde zum Beispiel die feste Zuordnung der Kinder zu einer bestimmten Gruppe im Innenbereich seit Februar 2022 weniger umgesetzt und sank im April 2022 auf ca. 28%. Auch sank die Masken Nutzung durch das Personal bis April 2022 im Umgang mit Kindern auf ca. 41% und außerhalb der Gruppe auf ca. 71%. Die Durchführung von regelmäßigen Screeninguntersuchungen wurde in vielen Kindergärten ebenfalls zunehmend reduziert. Grund hierfür waren u.a. die im Verlauf gelockerten rechtlichen Vorgaben. Dahingegen wurde ein vermehrtes Lüften konstant gut umgesetzt (99%) (Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie, 2022). Das Tragen von Masken durch das Personal von Kindergärten wurde zudem kontrovers diskutiert. Zwar kann durch das Masken Tragen die Weiterverbreitung von SARS-CoV-2 reduziert werden, allerdings wurde ebenfalls postuliert, dass das Tragen von Masken die Qualität der Interaktion zwischen Pädagoginnen und Kindern reduziert und es möglicherweise den Kindern erschwert, Emotionen wahrzunehmen (Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie, 2022).

In Kindergärten können auch andere Erreger, die zum Beispiel zu gastrointestinalen Infektionen führen, übertragen werden. Zhang et al. beschrieben einen Ausbruch durch das Norovirus mit möglicher Assoziation eines klimatechnischen Gerätes in einem Kindergarten in China. Innerhalb von 8,5 h traten 20 Fälle (52,6% der Kinder) innerhalb einer Gruppe mit akuter Gastroenteritis auf. Andere Gruppen waren nicht betroffen, sodass eine Infektion durch Lebensmittel oder Wasser ausgeschlossen wurde. Als möglicher Indexfall wurde eine Erzieherin diskutiert, die gut zwei Monate vor dem Ausbruch unter gastrointestinalen Beschwerden litt, dann aber bei Symptombesserung trotzdem weitergearbeitet hatte. Diese Erzieherin saß am Tag des Ausbruches unten den Kindern neben dem Klimagerät, sodass ein Zusammenhang vermutet wurde. Die Autoren postulieren, dass die Erzieherin das Virus über einen langen Zeitraum ausgeschieden haben könnte. Andere Möglichkeiten der Übertragung wurden durch die Autoren kaum diskutiert (Zhang et al., 2017). Bei der Transmission des Norovirus ist neben der Infektion durch virushaltige Tröpfchen insbesondere der fäkal-orale Infektionsweg entscheidend. Die Übertragung erfolgt direkt über die Hände oder Kontakt mit den Ausscheidungen oder indirekt über kontaminierte Flächen. Zur Prävention sind unter anderem Basishygienemaßnahmen, insbesondere eine gute Händehygiene, sowie eine rasche Trennung von betroffenen Kindern von der übrigen Gruppe und eine Reinigung kontaminierter Flächen und Gegenstände, entscheidend (Robert_Koch_Institut, 2008). Basishygienemaßnahmen wie das Händewaschen können das Auftreten von Diarrhoen und Atemwegsinfektionen bei Kindern reduzieren (Ejemot et al., 2008; Lidal et al., 2015).

Limitationen

Dieses Review hat mehrere Limitationen. Die Zahl der identifizierten Studien, insbesondere von Interventionsstudien, war gering. Es wurden nur Studien beachtet, die im Zeitraum bis 07.11.2022 publiziert wurden. In der Zwischenzeit wurden mutmaßlich weitere Studien veröffentlicht, welche im Rahmen des Reviews nicht berücksichtigt wurden, jedoch möglicherweise relevant sind. Darüber hinaus wurden Beobachtungs- und Modellierungsstudien ausgeschlossen, welche vor 2020 publiziert wurden und den primären Endpunkt CO₂ Konzentration hatten, ohne Zusammenhang mit der Übertragung (luftgetragener) Infektionen. Hierdurch wurden möglicherweise relevante Studien nicht identifiziert. Das gleiche gilt für den Ausschluss von Studien, die in Ländern mit niedrigem Einkommen durchgeführt worden. Die CO₂ Konzentration wurde als ein primärer Endpunkt gewählt, da diese oft als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko dient. Das tatsächlich bestehende Infektionsrisiko, kann dadurch nur abgeschätzt werden. Andere Parameter (z.B. die CO₂ Dosis) sind möglicherweise besser geeignet, um das Infektionsrisiko zu bestimmen. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden insbesondere Lüftungsstrategien und Gebäude-assoziierte Faktoren zur Vermeidung von Infektionen von luftgetragenen Pathogenen bzw. zur Senkung der CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für Infektionsrisiko betrachtet, andere infektionspräventive Strategien wie regelmäßiges Testen, Maske tragen etc. standen nicht im Fokus des Reviews.

Schlussfolgerung

Die Belüftung von Innenräumen ist eine wichtige Maßnahme, um das Infektionsrisiko von luftgetragenen Infektionen zu reduzieren. Kindergärten sollten deshalb mit einem gut funktionierenden mechanischen oder natürlichen Lüftungssystem ausgestattet sein, wodurch dauerhaft CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm gewährleistet werden können, um luftgetragene Infektionen im Rahmen des Kindergartenalltages weitgehend zu vermeiden. Dazu sollten die Gruppenräume mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein, um eine

Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen und den Lüftungserfolg zu kontrollieren. Räumliche und personelle Kohortierung von unterschiedlichen Kindergartengruppen, kann dazu beitragen das Transmissionsrisiko zu senken. Die Kombination verschiedener Infektionspräventiver Maßnahmen, sowie die Optimierung von Gebäude-assoziierten Faktoren unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen ist nötig, um ein sicheres Umfeld für Kinder und Personal von Kindergärten zu gewährleisten.

Quellen

Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte. (2018). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft- Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden.

Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 51, 1358-1369.

<https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>

Aiano, F., McOwat, K., Obi, C., Powell, A. A., Flood, J., Bhardwaj, S., Stoker, K., Haskins, D., Wong, B., Bertran, M., Zavala, M., Bosowski, J., Jones, S. E. I., Amin-Chowdhury, Z., Coughlan, L., Sinnathamby, M., Zaidi, A., Merrick, R., Zhao, H., et al. (2022). A cross-sectional national investigation of COVID-19 outbreaks in nurseries during rapid spread of the Alpha (B.1.1.7) variant of SARS-CoV-2 in England. *BMC Public Health*, 22(1), 1845.

<https://doi.org/10.1186/s12889-022-14228-z>

Arar, M., & Jung, C. (2021). Improving the Indoor Air Quality in Nursery Buildings in United Arab Emirates. *Int J Environ Res Public Health*, 18(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph182212091>

Asadi, S. W., A.S.; Cappa, C.D.; Barreda, S.; Bouvier, N.M.; Ristenpart, W.D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep*, 9(1), 2348.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>

Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie. (2020). 1. Quartalsbericht der Corona-kiTa-Studie (III/2020).

<https://corona-kita-studie.de/quartalsberichte-der-corona-kita-studie>

Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie. (2021). 5. Quartalsbericht der Corona-KiTa-Studie (III/2021). *DJI*.

München. <https://corona-kita-studie.de/quartalsberichte-der-corona-kita-studie>

Autorengruppe_Corona-KiTa-Studie. (2022). 7. Quartalsbericht der Corona-KiTa-Studie (II/2022). *München*

2022: DJI. <https://corona-kita-studie.de/quartalsberichte-der-corona-kita-studie>

Belhadjer, Z., Méot, M., Bajolle, F., Khraiche, D., Legendre, A., Abakka, S., Auriau, J., Grimaud, M., Oualha, M., Beghetti, M., Wacker, J., Ovaert, C., Hascoet, S., Selegny, M., Malekzadeh-Milani, S., Maltret, A., Bosser, G., Giroux, N., Bonnemains, L., et al. (2020). Acute Heart Failure in Multisystem Inflammatory Syndrome in Children in the Context of Global SARS-CoV-2 Pandemic. *Circulation*, 142(5), 429-436.

<https://doi.org/10.1161/circulationaha.120.048360>

Birmili, W. S., H. C.; Moriske, H. J.; Daniels, A.; Straff, W. (2021). [Ventilation concepts in schools for the prevention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air].

Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz, 64(12), 1570-1580.

<https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4> (Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft.)

Bulfone, T. C., Malekinejad, M., Rutherford, G. W., & Razani, N. (2021). Outdoor Transmission of SARS-CoV-2 and Other Respiratory Viruses: A Systematic Review. *J Infect Dis*, 223(4), 550-561.

<https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa742>

Canha, N., Mandin, C., Ramalho, O., Wyart, G., Ribéron, J., Dassonville, C., Hänninen, O., Almeida, S. M., & Derbez, M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, 26(3), 350-365. <https://doi.org/10.1111/ina.12222>

Chu, H. Y., Kuypers, J., Renaud, C., Wald, A., Martin, E., Fairchok, M., Magaret, A., Sarancino, M., & Englund, J. A. (2013). Molecular epidemiology of respiratory syncytial virus transmission in childcare. *J Clin Virol*, 57(4), 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.jcv.2013.04.011>

- Collins J.P., S., A. L. (2018). Infections Associated With Group Childcare. *Principles and Practice of Pediatric Infectious Diseases*, 18.
- Daneault, S., Beausoleil, M., & Messing, K. (1992). Air quality during the winter in Québec day-care centers. *Am J Public Health*, 82(3), 432-434. <https://doi.org/10.2105/ajph.82.3.432>
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., de Gennaro, G. (2021). CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- Dong, Y., Zhu, L., Li, S., & Wollensak, M. (2022). Optimal design of building openings to reduce the risk of indoor respiratory epidemic infections. *Build Simul*, 15(5), 871-884. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0842-3>
- ECDC. (2022). *Factsheet for health professionals on Coronaviruses* European Centre for Disease Prevention and Control. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/factsheet-health-professionals-coronaviruses>
- Ejemot, R. I., Ehiri, J. E., Meremikwu, M. M., & Critchley, J. A. (2008). Hand washing for preventing diarrhoea. *Cochrane Database Syst Rev*(1). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004265.pub2>
- Euser, S., Aronson, S., Manders, I., van Lelyveld, S., Herpers, B., Sinnige, J., Kalpoe, J., van Gemeren, C., Snijders, D., Jansen, R., Schuurmans Stekhoven, S., van Houten, M., Lede, I., Cohen Stuart, J., Slijkerman Megelink, F., Kapteijns, E., den Boer, J., Sanders, E., Wagemakers, A., & Souverein, D. (2022). SARS-CoV-2 viral-load distribution reveals that viral loads increase with age: a retrospective cross-sectional cohort study. *Int J Epidemiol*, 50(6), 1795-1803. <https://doi.org/10.1093/ije/dyab145>
- Fleischer, M., Schumann, L., Hartmann, A., Walker, R. S., Ifrim, L., von Zadow, D., Luske, J., Seybold, J., Kriegel, M., & Murbe, D. (2022). Pre-adolescent children exhibit lower aerosol particle volume emissions than adults for breathing, speaking, singing and shouting. *J R Soc Interface*, 19(187), 20210833. <https://doi.org/10.1098/rsif.2021.0833>
- Guo, Z. D., Wang, Z. Y., Zhang, S. F., Li, X., Li, L., Li, C., Cui, Y., Fu, R. B., Dong, Y. Z., Chi, X. Y., Zhang, M. Y., Liu, K., Cao, C., Liu, B., Zhang, K., Gao, Y. W., Lu, B., & Chen, W. (2020). Aerosol and Surface Distribution of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Hospital Wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), 1583-1591. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200885>
- Haapanen, M., Renko, M., Artama, M., & Kuitunen, I. (2021). The impact of the lockdown and the re-opening of schools and day cares on the epidemiology of SARS-CoV-2 and other respiratory infections in children – A nationwide register study in Finland. *EClinicalMedicine*, 34, 100807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100807>
- Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., & Kriegel, M. (2020). Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10332>
- Kim, C., Choi, D., Lee, Y. G., & Kim, K. (2021). Diagnosis of indoor air contaminants in a daycare center using a long-term monitoring. *Building and Environment*, 204, 108124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108124>
- Kim, C., Yu, J., Lee, Y. G., Kim, J., & Bae, S. (2022). Identifying behavior of long-distance virus transmission and mitigation performance from a COVID-19 outbreak of a daycare center. *Environmental Research*, 212, 113318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113318>
- Klučka, J., Kratochvíl, M., Dominik, P., Homola, L., Horák, O., Nečas, J., Jabandžiev, P., & Štourač, P. (2021). COVID-19 associated Paediatric Inflammatory Multisystem Syndrome (PIMS) in children. *Epidemiol Mikrobiol Imunol*, 70(4), 281-284. (Covid-19 u dč#283;tí spojený s dč#283;tským zánč#283;tlivým multisystémovým syndromem (PIMS).)
- Kolarik, B., Andersen, J. Z., Ibfelt, T., Engelund, H. E., Moller, E., & Brauner, V. E. (2016). Ventilation in day care centers and sick leave among nursery children. [Article] [J]. *Indoor Air April*, 26(2), 157-167. <https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftr&AN=00025549->

[201604000-00002](https://doi.org/10.1111/ina.12202)

http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:ovftdb&id=pmid:&id=doi:10.1111%2Fina.12202&issn=0905-6947&isbn=&volume=26&issue=2&spage=157&pages=157-167&date=2016&title=Indoor+Air&atitle=Ventilation+in+day+care+centers+and+sick+leave+among+nursery+children.&aulast=Kolarik&pid=%3Cauthor%3EKolarik%2C+B.%3BAndersen%2C+Jovanovic%3BIbft%2C+T.%3BEngelund%2C+Hoj%3BMoller%2C+E.%3BBrauner%2C+Vaclavik%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E00025549-201604000-00002%3C%2FAN%3E%3CDT%3EArticle%3C%2FDT%3E
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/ina.12202?download=true>

Kriegel, M., Hartmann, A., Buchholz, U., Seifried, J., Baumgarte, S., & Gastmeier, P. (2021). SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1).
<https://doi.org/10.3390/ijerph19010220>

Laurent, M. R., & Frans, J. (2022). Monitors to improve indoor air carbon dioxide concentrations in the hospital: A randomized crossover trial. *Sci Total Environ*, 806(Pt 3), 151349.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151349>

Levin, M. (2020). Childhood Multisystem Inflammatory Syndrome - A New Challenge in the Pandemic. *N Engl J Med*, 383(4), 393-395. <https://doi.org/10.1056/NEJMe2023158>

Lidal, I. B., Berg, R. C., Austvoll-Dahlgren, A., Hval Straumann, G., & Vist, G. E. (2015). NIPH Systematic Reviews: Executive Summaries. In *Infection Control in Day-Care Facilities: Effect of Handhygiene, Training and Physical Interventions*. Knowledge Centre for the Health Services at The Norwegian Institute of Public Health (NIPH). Copyright ©2015 by The Norwegian Institute of Public Health (NIPH).

Lopez, A. S., Hill, M., Antezano, J., Vilven, D., Rutner, T., Bogdanow, L., Claflin, C., Kracalik, I. T., Fields, V. L., Dunn, A., Tate, J. E., Kirking, H. L., Kiphibane, T., Risk, I., & Tran, C. H. (2020). Transmission Dynamics of COVID-19 Outbreaks Associated with Child Care Facilities - Salt Lake City, Utah, April-July 2020. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*, 69(37), 1319-1323. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6937e3>

Loss, J., Kuger, S., Buchholz, U., Lehfeld, A.-S., Varnaccia, G., Haas, W., Jordan, S., Kalicki, B., Schienkiewitz, A., & Rauschenbach, T. (2021). Infektionsgeschehen und Eindämmungsmaßnahmen in Kitas während der COVID-19- Pandemie – Erkenntnisse aus der Corona-KiTa-Studie. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*. <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03449-z>

Loss, J., Wurm, J., Varnaccia, G., Schienkiewitz, A., Iwanowski, H., Loer, A.-K. M., Allen, J., Wess, B., Schaffrath Rosario, A., Damerow, S., et al. (2022). Transmission of SARS-CoV-2 among children and staff in German daycare centres. [Article] [J]. *Epidemiology & Infection*, 149.
<https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovfty&AN=00003688-202200000-00140>
http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:ovftdb&id=pmid:&id=doi:10.1017%2FS0950268822001194&issn=0950-2688&isbn=&volume=149&issue=&spage=e141&pages=e141&date=2022&title=Epidemiology+%26+Infection&atitle=Transmission+of+SARS-CoV-2+among+children+and+staff+in+German+daycare+centres.&aulast=Loss&pid=%3Cauthor%3ELoss%2C+Julika%3BWurm%2C+Juliane%3BVarnaccia%2C+Gianni%3BSchienkiewitz%2C+Anja%3BIwanowski%2C+Helena%3BLoer%2C+Anne-Kathrin%3BAllen%2C+Jennifer%3BWess%2C+Barbara%3BSchaffrath+Rosario%2C+Angelika%3BDamerow%2C+Stefan%3BKuttig%2C+Tim%3BPerlitz%2C+Hanna%3BHornbacher%2C+Anselm%3BFinkel%2C+Bianca%3BKrause%2C+Carolin%3BWormsbacher%2C+Jan%3BSandoni%2C+Anna%3BKubisch%2C+Ulrike%3BEggers%2C+Kiara%3BNitsche%2C+Andreas%3BRadonic%2C+Aleksandar%3BTrappe%2C+Kathrin%3BDrechsel%2C+Oliver%3BKlaper%2C+Kathleen%3BFranke%2C+Andrea%3BHuther%2C+Antje%3BBuchholz%2C+Udo%3BHaas%2C+Walter%3BWieler%2C+Lothar%3BJordan%2C+Susanne%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E00003688-202200000-00140%3C%2FAN%3E%3CDT%3EArticle%3C%2FDT%3E

Lovec, V., Premrov, M., & Leskovic, V. (2021). Practical Impact of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Kindergartens. A Case Study of Slovenia. *Int J Environ Res Public Health*, 18(18).
<https://doi.org/10.3390/ijerph18189712>

- Lovec, V., Premrov, M., & Žegarac Leskovic, V. (2020). Is There Any Relation between the Architectural Characteristics of Kindergartens and the Spread of the New Coronavirus in Them?—A Case Study of Slovenia. *Sustainability*, 12(24), 10363. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10363>
- Lu, N., Samuels, M. E., Shi, L., Baker, S. L., Glover, S. H., & Sanders, J. M. (2004). Child day care risks of common infectious diseases revisited. *Child Care Health Dev*, 30(4), 361-368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2004.00411.x>
- Ludvigsson, J. F. (2020). Systematic review of COVID-19 in children shows milder cases and a better prognosis than adults. *Acta Paediatr*, 109(6), 1088-1095. <https://doi.org/10.1111/apa.15270>
- Lyman, W. H., Walsh, J. F., Kotch, J. B., Weber, D. J., Gunn, E., & Vinjé, J. (2009). Prospective study of etiologic agents of acute gastroenteritis outbreaks in child care centers. *J Pediatr*, 154(2), 253-257. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2008.07.057>
- Mattison, C. P., Calderwood, L. E., Marsh, Z. A., Wikswo, M. E., Balachandran, N., Kambhampati, A. K., Gleason, M. E., Lawinger, H., & Mirza, S. A. (2022). Childcare and School Acute Gastroenteritis Outbreaks: 2009-2020. *Pediatrics*, 150(5). <https://doi.org/10.1542/peds.2021-056002>
- Mehta, N. S., Mytton, O. T., Mullins, E. W. S., Fowler, T. A., Falconer, C. L., Murphy, O. B., Langenberg, C., Jayatunga, W. J. P., Eddy, D. H., & Nguyen-Van-Tam, J. S. (2020). SARS-CoV-2 (COVID-19): What Do We Know About Children? A Systematic Review. [Article] [J]. *Clinical Infectious Diseases November*, 71(9), 2469-2479. <https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftw&AN=01451458-202011010-00023>
http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:ovftdb&id=pmid:&id=doi:10.1093%2Fcid%2Fciaa556&issn=1058-4838&isbn=&volume=71&issue=9&spage=2469&pages=2469-2479&date=2020&title=Clinical+Infectious+Diseases&atitle=SARS-CoV-2+%28COVID-19%29%3A+What+Do+We+Know+About+Children%3F+A+Systematic+Review.&aulast=Mehta&pid=%3Cauthor%3E%3CMehta%2C+Nisha%3BMytton%2C+Oliver%3BMullins%2C+Edward%3BFowler%2C+Tom%3BFalconer%2C+Catherine%3BMurphy%2C+Orla%3BLangenberg%2C+Claudia%3BJayatunga%2C+Wikum%3BEddy%2C+Danielle%3B%3CNguyen-Van-Tam%2C+Jonathan%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E01451458-202011010-00023%3C%2FAN%3E%3CDT%3EArticle%3C%2FDT%3E
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7239259/pdf/ciaa556.pdf>
- Mendes, A., Aelenei, D., Papoila, A. L., Carreiro-Martins, P., Aguiar, L., Pereira, C., Neves, P., Azevedo, S., Cano, M., Proença, C., Viegas, J., Silva, S., Mendes, D., Neuparth, N., Teixeira, J. P. (2014). Environmental and ventilation assessment in Child Day Care Centers in Porto: the ENVIRH Project. *J Toxicol Environ Health A*, 77(14-16), 931-943. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.911134>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*, 139, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Murbe, D., Kriegel, M., Lange, J., Schumann, L., Hartmann, A., & Fleischer, M. (2021). Aerosol emission of adolescents voices during speaking, singing and shouting. *PLoS One*, 16(2), e0246819. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246819>
- Neuberger, F., Grgic, M., Diefenbacher, S., Spensberger, F., Lehfeld, A. S., Buchholz, U., Haas, W., Kalicki, B., & Kuger, S. (2022). COVID-19 infections in day care centres in Germany: social and organisational determinants of infections in children and staff in the second and third wave of the pandemic. *BMC Public Health*, 22(1), 98. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-12470-5>
- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO2 as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *medRxiv*, 2020.2009.2009.20191676. <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>
- Pettenkofer, M. v. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta'sche Buchhandlung, Munich, Germany.
- Ramcharan, T., Nolan, O., Lai, C. Y., Prabhu, N., Krishnamurthy, R., Richter, A. G., Jyothish, D., Kanthimathinathan, H. K., Welch, S. B., Hackett, S., Al-Abadi, E., Scholefield, B. R., & Chikermane, A. (2020).

Paediatric Inflammatory Multisystem Syndrome: Temporally Associated with SARS-CoV-2 (PIMS-TS): Cardiac Features, Management and Short-Term Outcomes at a UK Tertiary Paediatric Hospital. *Pediatr Cardiol*, 41(7), 1391-1401. <https://doi.org/10.1007/s00246-020-02391-2>

Rejc, T., Kučec, A., Bizjak, M., & GodičTorkar, K. (2020). Microbiological and chemical quality of indoor air in kindergartens in Slovenia. *Int J Environ Health Res*, 30(1), 49-62. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1572870>

Robert_Koch_Institut. (2008, July 1, 2008). *Norovirus-Gastroenteritis RKI Ratgeber*. Retrieved January 5, 2023 from https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Noroviren.html;jsessionid=01A308E073FEECB15B6CFD4D04C95301.internet121#doc2374562bodyText5

Robert_Koch_Institut. (2021, November 26, 2021). *Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19, Übertragungswege*. Retrieved January 6, 2023 from https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=6CB8D5596D6C33EF82B7D9E6C8EBCFBF.internet122?nn=13490888#doc13776792bodyText2

Robert_Koch_Institut. (2022a). *Beschluss der STIKO zur 24. Aktualisierung der COVID-19-Impfempfehlung*. Epidemiologisches Bulletin 50/2022. Retrieved December 21, 2022 from https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2022/Ausgaben/50_22.pdf?blob=publicationFile

Robert_Koch_Institut. (2022b). *COVID-19-Fälle nach Altersgruppe und Meldewoche*. Retrieved December 21, 2022 from https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Daten/Altersverteilung.html

Robert_Koch_Institut. (2022c). *Dritte Aktualisierung der „Retrospektiven Phaseneinteilung der COVID-19-Pandemie in Deutschland*. Epidemiologisches Bulletin 38/2022. Retrieved December 21, 2022 from https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2022/Ausgaben/38_22.pdf?blob=publicationFile

Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237-245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>

Schoeps, A., Hoffmann, D., Tamm, C., Vollmer, B., Haag, S., Kaffenberger, T., Ferguson-Beiser, K., Kohlhasse-Griebel, B., Basenach, S., Missal, A., Höfling, K., Michels, H., Schall, A., Kappes, H., Vogt, M., Jahn, K., Bärnighausen, T., & Zanger, P. (2021). Surveillance of SARS-CoV-2 transmission in educational institutions, August to December 2020, Germany. *Epidemiol Infect*, 149, e213. <https://doi.org/10.1017/S0950268821002077>

Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333-341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>

Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med*, 8(7), 658-659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)

Statistisches_Bundesamt. (2022a). Retrieved December 14, 2022 from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Soziales/Kindertagesbetreuung/inhalt.html#476348>; https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/09/PD21_449_225.html

Statistisches_Bundesamt. (2022b). *Anzahl der Kindertageseinrichtungen öffentlicher und freier Träger in Deutschland in den Jahren 2020 bis 2022*. Retrieved December 14, 2022 from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1194803/umfrage/anzahl-der-kitas-in-deutschland/>

Šubelj, M. (2018). Epidemiologic patterns of influenza outbreaks in institutional settings. *Public Health*, 155, 23-25. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.11.008>

Thamm, R., Buttman-Schweiger, N., Fiebig, J., Poethko-Müller, C., Prütz, F., Sarganas, G., & Neuhauser, H. (2021). SARS-CoV-2-Seroprävalenz bei Kindern und Jugendlichen in Deutschland – ein Überblick. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 64(12), 1483-1491. <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03448-0>

Thompson, H. A., Mousa, A., Dighe, A., Fu, H., Arnedo-Pena, A., Barrett, P., Bellido-Blasco, J., Bi, Q., Caputi, A., Chaw, L., De Maria, L., Hoffmann, M., Mahapure, K., Ng, K., Raghuram, J., Singh, G., Soman, B., Soriano, V., Valent, F., et al. (2021). Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) Setting-specific Transmission Rates: A Systematic Review and Meta-analysis. *Clin Infect Dis*, 73(3), e754-e764.

<https://doi.org/10.1093/cid/ciab100>

van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382(16), 1564-1567.

<https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

Viner, R. M., Mytton, O. T., Bonell, C., Melendez-Torres, G. J., Ward, J., Hudson, L., Waddington, C., Thomas, J., Russell, S., van der Klis, F., Koirala, A., Ladhani, S., Panovska-Griffiths, J., Davies, N. G., Booy, R., & Eggo, R. M. (2021). Susceptibility to SARS-CoV-2 Infection Among Children and Adolescents Compared With Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Pediatr*, 175(2), 143-156.

<https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2020.4573>

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558). <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>

WHO. (2020, March 11, 2020). *WHO Director-General's opening remarks at the Mission briefing on COVID-19- 11 March 2020*. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>

Zhang, T. L., Lu, J., Ying, L., Zhu, X. L., Zhao, L. H., Zhou, M. Y., Wang, J. L., Chen, G. C., & Xu, L. (2017). An acute gastroenteritis outbreak caused by GII.P16-GII.2 norovirus associated with airborne transmission via the air conditioning unit in a kindergarten in Lianyungang, China. *Int J Infect Dis*, 65, 81-84.

<https://doi.org/10.1016/j.ijid.2017.10.003>

Scoping Review zum Einfluss von Lüftungsmaßnahmen auf das Infektionsrisiko in Schulen

Einleitung

In Deutschland gibt es 32.228 Schulen, davon sind ca. die Hälfte Grundschulen. Im Schuljahr 2020/2021 haben 790.608 Lehrkräfte ungefähr 8,38 Millionen Schüler und Schülerinnen an allgemein bildenden Schulen unterrichtet (Statistisches Bundesamt, 2022). In Lehrereinrichtungen treffen somit viele Individuen unterschiedlicher Altersklassen zusammen und verbringen werktags mehrere Stunden auf engem Raum miteinander. Im Kontext des Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2 (SARS-CoV-2), das der Auslöser der COVID-19 Erkrankung ist und am 11. März 2020 durch die WHO zur Pandemie erklärt wurde (WHO, 2020), standen deshalb unter anderem die Schulen im Fokus des öffentlichen Interesses und wurden als ein potentieller Hotspot für die Übertragung von SARS-CoV-2 angesehen. Eine Auswertung von Daten von Labor bestätigten COVID-19 Fällen durch Otte Im Kampe et al. ergab, dass in deutschen Schulen im Zeitraum vom 28. Oktober 2020 bis 31. August 2020 48 SARS-CoV-2 Ausbrüche mit 216 Fällen in Schulen auftraten, dies entsprach ca. 0,5 % der gemeldeten Gesamtzahl an Ausbrüchen (Otte Im Kampe et al., 2020).

In Deutschland wurden im März 2020 sämtliche Schulen, bis auf wenige Ausnahmen für eine Notbetreuung, im Zuge eines bundesweiten Lockdowns geschlossen, um die weitere Verbreitung und den Eintrag in die Familien von SARS-CoV-2 zu reduzieren. Die meisten Schulen waren nicht ausreichend vorbereitet bzw. ausgestattet um eine gute Schulbildung durch „Homeschooling“ zu gewährleisten. Die Schüler und Schülerinnen mussten in vielen Fällen durch ihre Eltern unterrichtet werden bzw. sich vieles im Selbststudium erarbeiten. Ein Problem welches diesen Sachverhalt verstärkt hat, war die mangelnde Digitalisierung der Schulen. Es waren teilweise keine oder nicht genügend „Endgeräte“ bzw. ein funktionierender Internetanschluss vorhanden (Statistisches Bundesamt, 2020). Sicherlich konnten durch diese Maßnahmen viele Infektionen verhindert werden, jedoch gab es auch diverse negative Auswirkungen des Lockdowns, wie z.B. eine Verschlechterung der Schulleistung, psychologische und physiologische Erkrankungen, Gewalterfahrungen zu Hause, ganz zu schweigen von den wirtschaftlichen Kosten (ECDC, 2021; Kuhfeld et al., 2020; Nicola et al., 2020; UNESCO). Für viele Familien sind durch den Lockdown organisatorische Schwierigkeiten entstanden: Eltern, mussten sich gleichzeitig um die Schulbildung und Betreuung ihrer Kinder kümmern und selber arbeiten. Bei Berufen, für die das Konzept des „Homeoffices“ nicht praktikabel war, mussten andere Wege der Kinderbetreuung gefunden werden. Zudem mussten viele Familien auf engstem Raum arbeiten und lernen (Laß, 2021).

SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über eingeatmete Tröpfchen und Aerosole übertragen, welche beim Sprechen, Atmen, Husten und Niesen entstehen (Guo et al., 2020; Hartmann et al., 2020; Morawska & Cao, 2020; van Doremalen et al., 2020; Wang et al., 2021). Die indirekte Kontaktübertragung über kontaminierte Gegenstände oder Oberflächen spielt nach derzeitigem Kenntnisstand nur eine geringere Rolle (ECDC, 2022). Aerosole können sich schnell im Raum verbreiten und insbesondere bei niedrigem Luftaustausch über längere Zeiträume bestehen und infektiös bleiben, sodass hier auch eine Infektionsgefahr im „Fernfeld“ einer Person (>1,5m) entsteht, während bei der Tröpfcheninfektion die Übertragung eher im „Nahfeld“ (<1,5m) stattfindet. Jedoch gehen Tröpfchen- und luftgetragene Infektionen durch Aerosole zum Teil ineinander über, sodass eine strikte Unterscheidung schwierig bzw. nicht sinnvoll ist (Birmili et al., 2021). Luftgetragene Erreger können über längere Zeit im Raum verbleiben, sodass die Verdünnung bzw. Elimination maßgeblich zur Reduktion des Infektionsrisikos beitragen können (Umweltbundesamt, 2020a). Studien haben gezeigt, dass eine verbesserte Belüftung die Zeit, die respiratorisch ausgestoßene Tröpfchen bzw. Aerosole in der Luft verbleiben, deutlich reduziert und das Transmissionsrisiko von potentiell enthaltenen Pathogenen gesenkt wird (Somsen et al., 2020). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass in schlecht belüfteten Räumen, eine erhebliche Infektionsgefahr insbesondere durch Einatmung von Aerosolen, selbst bei Abstandhalten, besteht. Eine Verbesserung der Lüftungssituation kann die Transmission von luftgetragenen Infektionserregern wie z.B. SARS-CoV-2 reduzieren. Die Lüftung kann in Form von natürlicher Lüftung durch beispielsweise Fenster/Türen erfolgen bzw. mechanisch, z.B. durch Raumlüfttechnische Anlagen (RLT Anlagen). Eine Kombination beider Lüftungsstrategien in Form von hybrider Lüftung ist ebenfalls möglich (Megahed, 2021). Eine definierte Lüftungsrate liegt für die meisten Schulen nicht vor. Die meisten europäischen Schulen, werden durch natürliche Lüftung belüftet (Baloch et al., 2020; Umweltbundesamt, 2020b; Zivelonghi, 2021).

Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird bei der Ausatmung zusammen mit (potentiell) Virus haltigen Tröpfchen/ Partikeln ausgeatmet. Die CO₂ Konzentration in Innenräumen wird oft als Indikator für die Innenraumluftqualität und daraus abgeleitet als Surrogatparameter für das Übertragungs- und Infektionsrisiko von SARS-CoV-2 oder anderen luftgetragenen Infektionen herangezogen (Di Gilio, 2021; Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003; Shendell et al., 2004). Von Pettenkofer schlug ursprünglich den Richtwert von 1000 ppm als Obergrenze von CO₂ in Innenräumen vor. Er wollte mit diesem Grenzwert vor allem möglichen Konzentrationsstörungen von Schüler und Schülerinnen aufgrund hoher CO₂ Konzentrationen vorbeugen (Pettenkofer, 1858). Auf Grundlage dessen werden in Deutschland CO₂ Konzentrationen in Innenräumen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich eingestuft, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte, 2018). Gegebenenfalls sind unterschiedliche CO₂ Grenzwerte je nach Aktivitätsniveau sinnvoll (Peng & Jimenez, 2021).

Die CO₂ Konzentration kann vergleichsweise einfach und günstig mit CO₂ Messgeräten gemessen werden. Eine Studie hat gezeigt, dass durch den Einsatz von CO₂ Messgeräten im Krankenhaus signifikant kürzere Zeiträume mit CO₂ Konzentrationen >1000 ppm, sowie niedrigere Maximalwerte vorlagen als zur Ausgangslage bzw. in der Postinterventionsphase (Laurent & Frans, 2022). Die Verwendung der CO₂ Konzentration als Surrogatparameter für das Infektionsrisiko hat jedoch auch Limitationen. Nach einem gewissen Zeitraum wird ein „steady state“ der CO₂ Konzentration erreicht, die Menge an virushaltigen Partikeln, die eine empfängliche Person einatmet, steigt dennoch kontinuierlich mit der Zeit, auch wenn die Konzentration der Partikel selbst gleichbleibt. Kriegel et al. schlagen deswegen vor, die CO₂ Dosis (ppm*h) als möglichen Surrogatparameter zur Abschätzung des Infektionsrisikos zu nutzen (Kriegel et al., 2021).

Bezüglich der Transmission des Virus im Schulsetting ist weiterhin zu bedenken, dass sowohl die Virusscheidung als auch die Suszeptibilität altersabhängig sind. Erwachsene emittieren beispielsweise in der Regel mehr Virus als Kinder (Euser et al., 2022; Thompson et al., 2021; Viner et al., 2021). Darüber hinaus ist die Virusemission abhängig von der Tätigkeit bzw. der Intensität des Sprechens: Sitzen vs. rennen, leise reden vs. schreien oder nur atmen (Fleischer et al., 2022; Hartmann et al., 2020; Murbe et al., 2021). Bezogen auf das Schulsetting bedeutet das, dass infizierte Lehrkräfte im Allgemeinen ein größeres Risiko für eine weitere Virustransmission darstellen als Schüler und Schülerinnen. Einige Studien haben gezeigt, dass das Risiko einer Übertragung von Personal zu Personal größer ist als die Transmission von Schüler und Schülerinnen zu Personal, Personal zu Schüler und Schülerinnen oder Schüler und Schülerinnen zu Schüler und Schülerinnen (Gandini et al., 2021; Ismail et al., 2021; Pavilonis, 2021). Trotzdem sind die Kinder ebenfalls suszeptibel für SARS-CoV-2 Infektionen und tragen zum Infektionsgeschehen bei (ECDC, 2021; Gettings et al., 2022; Goldstein et al., 2021; Viner et al., 2021).

Die Prävention von luftgetragenen Infektionen, insbesondere durch infektiöse Aerosole ist aufgrund der Dynamik eine Herausforderung. Um weitere Schulschließungen zu verhindern und trotzdem eine sichere Bildung in den Schulen zu gewährleisten, sind gute Hygiene- und Infektionspräventionsmaßnahmen essentiell.

Zudem gibt es weitere Infektionserreger, die nicht so stark im öffentlichen Bewusstsein sind, jedoch im Rahmen des Schulbetriebes ebenfalls relevant sind und zu lokalen Ausbrüchen führen können. Zu nennen sind hier zum Beispiel andere respiratorische Infektionserreger, wie das Influenzavirus (Chen, 2008; Coleman & Sigler, 2020) oder Masernvirus (Riley et al., 1978) und auch gastrointestinale Infektionserreger wie das Norovirus (Li et al., 2018; Subahir et al., 2019).

Ziel des Scoping Reviews

Das Ziel dieses Scoping Reviews war es, das aktuelle Wissen über die Lüftungssituation in Schulgebäuden bzw. Klassenräumen, sowie über die Wirksamkeit verschiedener Interventionen zur Verbesserung und Gewährleistung einer guten Infektionsprävention bzw. zur Senkung des Surrogatparameters CO₂ Konzentration anhand von Feldstudien zusammenzufassen.

Methoden

Suchstrategie

Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken Embase, MEDLINE und ScienceDirect wurde im Zeitraum 09.07.2021 bis 06.05.2022 durch zwei Personen durchgeführt. Publikationen, welche bis einschließlich 30.04.2022 veröffentlicht wurden, wurden berücksichtigt. Um relevante Studien zu identifizieren, wurde die Recherche durch die Kombination der folgenden Schlüsselwörter (übersetzt ins Englische) durchgeführt: „Schule“, „Klassenzimmer“, „Kind“, „Schüler“, „Lüftung“, „Kohlenstoffdioxid“ („CO₂“), „Luftfilterung“, „Innenraumluftqualität“, „Architektur“, „Gebäude“, „COVID-19“, „SARS-CoV-2“, „Masern“, „Röteln“, „Respiratorisches Synzytial Virus“, „Infektion“, „Prävention“, „Luftübertragung“. Zusätzlich wurden Publikationen berücksichtigt, die durch die Bearbeitung zuvor identifizierter Studien, gefunden wurden.

Das Programm Endnote wurde für die Literaturverwaltung und die Elimination von Duplikaten verwendet.

Ein- und Ausschlusskriterien

Studien, welche in Englisch oder Deutsch verfasst wurden, wurden berücksichtigt. Es wurden Studien eingeschlossen, welche in Klassenzimmern bzw. Schulgebäuden durchgeführt wurden mit den primären Endpunkten CO₂ Konzentration oder Infektions- bzw. Transmissionsrisiko für verschiedene luftgetragene Infektionserreger (z.B. SARS-CoV-2, Masern, Influenza). Zudem wurden nur Studien eingeschlossen, die in Ländern mit hohem und mittlerem Einkommen und mit vergleichbaren Klimazonen zu Deutschland durchgeführt wurden, um eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit zu gewährleisten. Bezüglich des Studiendesigns wurden Interventionsstudien, Beobachtungsstudien und mathematische Modellierungsstudien eingeschlossen.

Im Verlauf des Projektes wurde eine weitere Studie publiziert, die eine hohe Relevanz in Bezug auf die Forschungsfrage aufwies. Diese Studie wurde deshalb ebenfalls eingeschlossen, auch wenn das Datum der Veröffentlichung nach dem Zeitraum der Literaturrecherche lag (Buonanno et al., 2022).

Aufgrund einer hohen Redundanz von Studien, die vor der Pandemie durchgeführt wurden und hauptsächlich den CO₂ Verlauf in Klassenzimmern untersuchten, u.a. als Surrogatparameter für das Auftreten von Konzentrationsstörungen, wurden Beobachtungs- und mathematische Modellierungsstudien, mit primären Endpunkt CO₂ Konzentration und keinem Zusammenhang mit der Übertragung (luftgetragener) Infektionen, die vor 2020 publiziert wurden, ausgeschlossen.

Studien, welche in universitären Klassenräumen durchgeführt wurden, wurden aufgrund der unterschiedlichen, oft größeren Raumarchitektur ebenfalls nicht berücksichtigt.

Studienauswahl

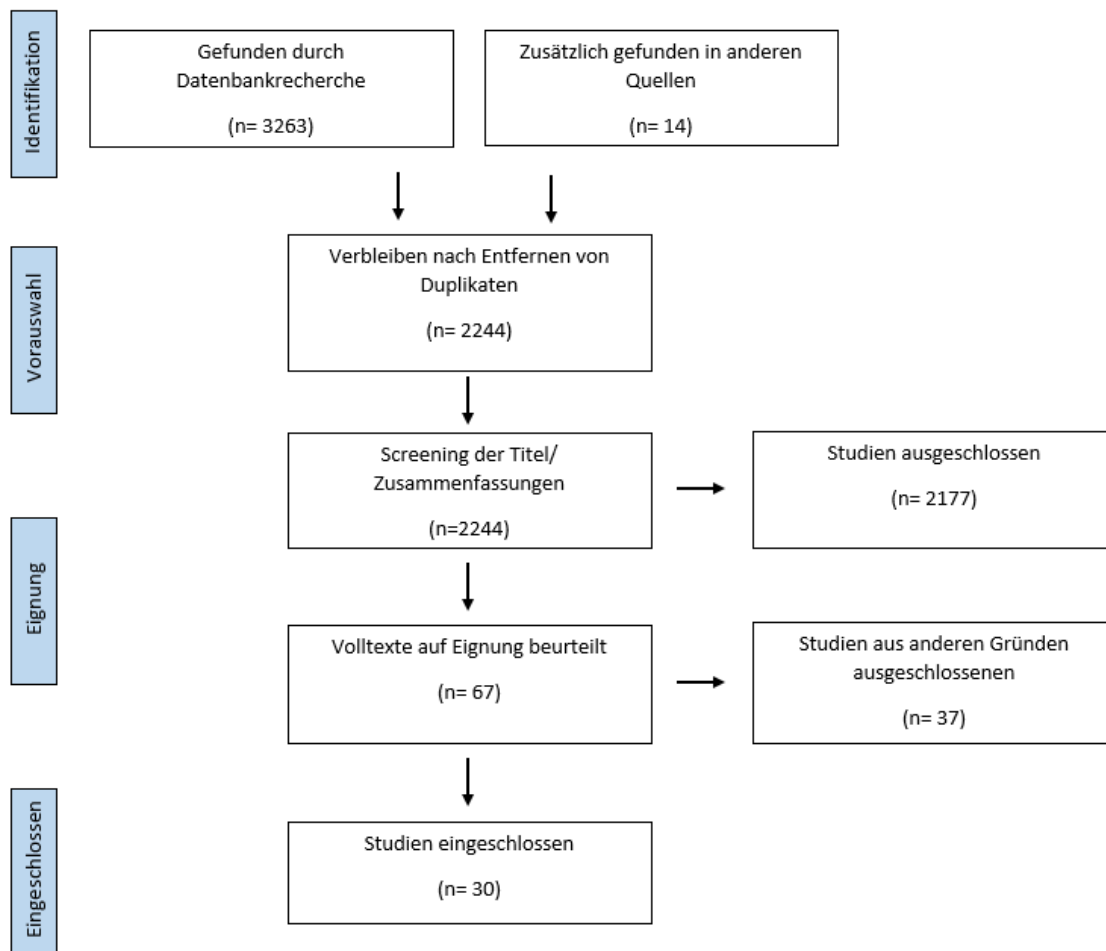
Nach der Elimination von Duplikaten, wurden die verbleibenden Studien anhand der Titel und Abstracts gescreent. Die verbliebenen Studien wurden im Anschluss im Volltext gelesen und auf Eignung geprüft.

Abbildung 47 zeigt das Flussdiagramm zur Studienauswahl.

Struktur

Die eingeschlossenen Studien wurden anhand des Studientypus in 2 Tabellen gruppiert: In **Tabelle 1** sind Interventionsstudien aufgeführt, in **Tabelle 2** sind Beobachtungsstudien/ Ausbruchsanalysen, sowie mathematische Modellierungsstudien zusammengefasst.

Abbildung 47
Flussdiagramm Studienauswahl



Quelle: Charité

Ergebnisse

Durch die Literaturrecherche konnten 30 Studien gefunden werden, die den Einschlusskriterien entsprachen. Darunter waren sechs Interventionsstudien, 16 Beobachtungsstudien mit zum Teil ergänzender mathematischer Modellierung und acht mathematische Modellierungsstudien. Die Interventionsstudien hatten den primären Endpunkt CO₂ Konzentration oder SARS-CoV-2 Infektion in Clustern (**Tabelle 32**). Bei den Beobachtungs- und mathematischen Modellierungsstudien war der primäre Endpunkt die CO₂ Konzentration oder das Infektions- bzw. Transmissionsrisiko verschiedener respiratorischer Infektionserreger, z.B. SARS-CoV-2, Masern, Influenza (**Tabelle 33**).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in vielen Schulen CO₂ Konzentrationen über 1000 ppm in den zu untersuchenden Klassenräumen gemessen wurden. Durch Lüftungsmaßnahmen konnten die CO₂ Konzentrationen gesenkt werden (Buonanno et al., 2022; Di Gilio, 2021; Geelen et al., 2008; Monge-Barrio, 2022; Vassella, 2021; Wargocki & Da Silva, 2015). Hierbei waren bei Klassenräumen mit mechanischer Lüftung niedrigere Werte vorliegend, als in natürlich belüfteten Räumen. In der Studie von Vassella et al. wurden beispielweise mediane CO₂ Konzentrationen in mechanisch belüfteten Klassenräumen von 686 - 1320 ppm gemessen, während in natürlich belüfteten Klassenräumen höhere mediane CO₂ Konzentrationen von 862 - 2898 ppm gemessen wurden (Vassella, 2021). Trotzdem waren die Maßnahmen teilweise nicht ausreichend, um CO₂ Konzentrationen dauerhaft unter 1000 ppm zu halten (Geelen et al., 2008), insbesondere wenn während der Lüftungsperiode Personen im Raum anwesend waren, war die Reduktion der CO₂ Konzentration geringer (Zemitis et al., 2021). Ein visuelles Feedback System, wie es beispielsweise in der Studie von Wargocki

und Da Silva angewandt wurde und die Notwendigkeit der Lüftung aufgrund zu hoher CO_2 Werte anzeigte, konnte durch entsprechend vermehrte natürliche Belüftung zu einer deutlichen Senkung der CO_2 Konzentration im Vergleich zu der Kontrollgruppe ohne visuelles Feedback System führen (Wargocki & Da Silva, 2015).

In einer anderen Interventionsstudie zeigten die Autoren, dass das relative SARS-CoV-2 Infektionsrisiko in mechanisch belüfteten im Vergleich zu natürlich belüfteten Klassenräumen um mindestens 74% geringer war. Mit noch höheren Lüftungsraten von $>10 \text{ L s}^{-1}$ Schüler und Schülerin⁻¹ sank es im Vergleich zu den natürlich belüfteten Klassenräumen um mindestens 80%. Der Effekt war bei höherer regionaler SARS-CoV-2 Inzidenz größer (Buonanno et al., 2022).

Verschiedene Gebäude-assoziierte Faktoren haben einen Einfluss auf die Effizienz der Lüftung. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten nur wenige Studien identifiziert werden, die einen Zusammenhang zwischen baulichen Faktoren und der Lüftungseffizienz bzw. dem Auftreten von (luftgetragenen) Infektionen im Schulsetting untersuchten. Die Raumgröße beeinflusste das Infektionsrisiko, wobei dieses besonders in kleinen, schlecht belüfteten Räumen groß war (Duill et al., 2021; Zivelonghi, 2021). Eine Ausbruchsanalyse von Stein-Zamir et al. zeigte, dass es in einer Schule zu einem großen SARS-CoV-2 Ausbruch durch zwei Indexfälle kam. Hier waren die Klassenzimmer überfüllt ($1,1\text{-}1,3 \text{ m}^2$ pro Person), zudem war die Maskentragepflicht aufgehoben worden. Kontakte bestanden jedoch auch außerhalb des Schulsettings, sodass verschiedene Faktoren das Ausbruchsgeschehen beeinflussten (Stein-Zamir et al., 2020).

Tabelle 32
Interventionsstudien

Referenz	Studientypus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse	Neben- effekte
(Di Gilio, 2021)	Interventions- studie	11 Klassen- zimmer, 9 Schulen (Vorschulen, Grundschulen, weiterführende Schulen), Italien, Jan./Feb. 2021	Fragebogen zur Evaluation des generellen Lüftungsregimes und Raumbelegung. (1) Kontrolle: Standard Lüftung (NV). (2) Intervention: Kontinuierliche Belüftung über Tür, Fensterlüftung für 10 min in Pausen und sobald CO ₂ Konzentration 700 ppm erreicht. Zusatzmaßnahmen: Händedesinfektion, Masken Nutzung, Abstand halten.	CO ₂ Konzentration	(1) Mittlere CO ₂ Konzentration zwischen 721 und 1325 ppm (54 % der Klassenzimmer >1000 ppm). Maximalwerte 867 bis 3947 ppm. (2) 91 % der Klassenzimmer: Mittlere CO ₂ Konzentration < 1000 ppm, 36% < 700 ppm. Echtzeitvisualisierung der CO ₂ Konzentrationen effektiver als nur systematisches Lüftungsprotokoll.	Niedrige Innenraumtemperatur trotz Heizen.
(Wargocki & Da Silva, 2015)	Interventions- studie	4 Klassen- zimmer, 1 Grundschule, Dänemark, 2 Wochen während Heizperiode, März/April 2011 und Kühlsaison, Juni 2011	Gebäude mit einem „mixing type“ MV System. Bei ca. der Hälfte der Klassenzimmer war MV während Heizperiode ausgeschaltet. (1) Intervention: Visuelles Feedback System mit Farben, die bestimmte CO ₂ Konzentration repräsentieren und Notwendigkeit einer Lüftung anzeigen (NV). (2) Kontrolle: Routine NV. Heizperiode: Messungen wurden in gekreuzter Methode jeweils 1 Woche mit und 1 Woche ohne visuelles Feedback System durchgeführt. Kühlsaison: Messungen 2 Wochen entweder mit oder ohne visuelles Feedback durchgeführt.	CO ₂ Konzentration	Vor Intervention: CO ₂ Konzentration bis 1500 ppm. (1) Während Heizperiode wurden Fenster häufiger geöffnet, CO ₂ Konzentration niedriger, um 1000 ppm. (2) CO ₂ Konzentration um 1900 ppm. Kühlsaison: kein Unterschied bezüglich Fensteröffnungsfrequenz mit Feedback System ohne mechanische Kühlung. Mit Kühlung: Fenster in (1) öfter geöffnet.	Geschätzter jährlicher Heizbedarf 15-23% höher in Klassen- räumen mit visuellem Feedback System.

(Geelen et al., 2008)	Interventionsstudie	81 Klassenzimmer, 20 Grundschulen, Niederlande, Okt.-Dez. 2004 bzw. Jan.-März 2005	CO ₂ Messungen vor, direkt nach und 6 Wochen nach Interventionen: (1) Klassenspezifische NV Lüftungsvorgaben. (2) Klassenspezifische NV Lüftungsvorgaben + visuelles CO ₂ Warngerät, wenn CO ₂ Konzentration \geq 1200 ppm. (3) Klassenspezifische NV Lüftungsvorgaben und Schulung. (4) Kontrollgruppe.	CO ₂ Konzentration	Vor Intervention: CO ₂ Konzentration > 1000 ppm in 64% des Schultages in allen Gruppen. (1) Langfristig keine Änderung des Lüftungsverhaltens. (2) Kurzfristig im Vergleich kürzeste Zeiten mit Überschreitungen der CO ₂ Konzentration > 1000 ppm. (3) > (2) Lüftungssituation langfristig signifikant verbessert, CO ₂ Konzentration > 1000 ppm in 40% des Schultages.
(Vassella, 2021)	(1) Querschnittsstudie (2) Interventionsstudie	(1) 100 Klassenzimmer, 96 Schulen (2) 19 (+4) Klassenzimmer aus Gruppe (1), Schweiz, während Heizperiode	(1) Standard Lüftungsregime, NV in 94% der Klassenzimmer (2.1) Intervention: NV durch Öffnen aller Fenster während der Pausen und vor/nach Unterrichtsstunden ohne anwesende Personen. Schriftliche und mündliche Anweisungen zum Trainieren des Lüftungsverhaltens. Eine interaktive Simulation wurde in 4 Klassen verwendet, um spezifischen Lüftungsplan zu entwickeln. (2.2) Kontrollgruppe: Gleiche 19 Klassenräume mit Messungen aus (1).	CO ₂ Konzentration	(1) Mehr als 2/3 der Klassenräume: CO ₂ Konzentrationen > 2000 ppm. <u>MV</u> : Mediane CO ₂ Konzentration: 686 – 1320 ppm, mediane maximale CO ₂ Konzentration: 1364 ppm. <u>NV</u> : Mediane CO ₂ Konzentration: 862 – 2898 ppm, mediane maximale CO ₂ Konzentration: 2754 ppm. (2.1) Mediane CO ₂ Konzentration: 1097 ppm, medianer Maximalwert: 1892 ppm. (2.2) Mediane CO ₂ Konzentration: 1600 ppm. Durchschnittlicher Anteil von Unterrichtsstunden mit CO ₂ Konzentrationen < 1000 ppm steigt durch Intervention von 18% auf 42%. Höhere CO ₂ Konzentrationen in aufeinanderfolgenden Unterrichtsstunden.

(Rosbach et al., 2013)	Interventionsstudie	18 Klassenzimmer, 17 Grundschulen, Niederlande, Heizperioden 2010-2012	<p>Messungen nur während des Unterrichts.</p> <p>(1) Interventionsgruppe (12 Klassenräume): Woche 1: Basisperiode-Standardlüftung, Woche 2&3: Belüftung durch mobiles, mechanisches Belüftungsgerät mit CO₂ Zielkonzentrationen von 800 bzw. 1200 ppm für jeweils 1 Woche (überkreuztes Vorgehen). Zumischung von unterschiedlichem Anteil an Außenluft. Keine zusätzliche NV.</p> <p>(2) Kontrollgruppe (6 Klassenräume): Messungen ohne spezielles Lüftungsregime, NV.</p>	CO ₂ Konzentration	<p>(1) Mittlere CO₂ Konzentrationen von 1399 ppm (SD: 350) in Basisperiode auf mittlere Werte von 841 ppm (SD: 65) bei Zielkonzentration von 800 ppm, mittlere Werte von 975 ppm (SD: 73) bei Zielkonzentration von 1200 ppm gesenkt.</p> <p>CO₂ Konzentrationen stabiler.</p> <p>(2) Basisperiode: mittlere CO₂ Konzentration 1208 ppm (SD: 244), Woche 2&3: mittlere CO₂ Konzentration 1350 ppm (SD: 486).</p>
(Buonanno et al., 2022)	Interventionsstudie	205.247 Schüler, 10.441 Klassenzimmer, 1419 Schulen, Italien, Sept. 2021-Jan.2022	<p>(1) Intervention: Installation von MVS in 316 Klassenräumen von 56 Schulen. MV vor Schulstart für den kompletten Schultag. Lüftungsrate von 1,4-14 L s⁻¹ Schüler und Schülerin⁻¹.</p> <p>(2) Kontrollgruppe: Klassenräume mit NV</p> <p>Jeweils zusätzliche Maßnahmen: verstärkte NV, Masken, Abstand halten.</p>	SARS-CoV-2 Infektion in Clustern (≥2 Fälle bis Dez. 2021, ≥3 Fälle ab Jan 2022)	<p>(1) 31 infizierte Schüler und Schülerinnen. (2) 3090 infizierte Schüler und Schülerinnen in Clustern. Monatliche Inzidenzrate (IFälle/1000 Schüler und Schülerinnen) stieg von Sept. bis Dez. 2021, und v.a. im Jan. 22. Niedriger in MV vs. NV Klassenzimmern (4,9 vs. 15,3), Verhältnis 0,32. Protektiver Effekt der MV höher bei höherer regionaler Inzidenz. Größere relative Risikoreduktion (RRR) bei höherer Lüftungsrate (VR): mind. 74% RRR bei MV; mind. 80% RRR bei MV und VR > 10-14 L s⁻¹ Schüler und Schülerin⁻¹. Für jede zusätzliche Einheit VR pro Person, weitere RRR von 12-15%.</p>

Notiz: NV= natürliche Lüftung, MV= mechanische Lüftung, SD: Standardabweichung, MVS= mechanisches Belüftungssystem, RRR= relative Risikoreduktion, VR= Lüftungsrate
Quelle: Charité

Tabelle 33
Beobachtungs- und Modellierungsstudien

Referenz	Studientypus	Setting	Methodik	Primärer Endpunkt	Hauptergebnisse	Neben- effekte
(Monge-Barrio, 2022)	Beobachtungsstudie	(1) 9 weiterführende Schulen, Spanien, Dez. 20 - Jan 21 (2) 3 Klassenzimmer, 1 weiterführende Schule vor und während Pandemie	(1) und (2) vor Pandemie: individuelle kurze Lüftungsperioden. Während Pandemie: Querlüftung nach jeder Unterrichtsstunde oder zu Beginn und Ende des Schultages und während 30 min Pause. Teilweise zusätzlich kurze Lüftung während des Unterrichts. (1) Umfrage/ Interviews über (Gebäude) Strukturen, Heizverbrauch, thermisches Wohlbefinden (2) CO ₂ Messungen	CO ₂ Konzentration	(2) Reduktion der durchschnittlichen CO ₂ Konzentration von 2478 ppm (SD: 852) vor Pandemie auf 1105 ppm (SD: 295) während Pandemie. Anstieg der CO ₂ Konzentration während Unterrichtsstunden sank von 857 ppm/h auf 135 ppm/h.	(1) und (2) Durchschnittliche Innenraumtemperaturen: 18 °C, Abfall um ca. 2 °C. Erhöhter Heizbedarf zwischen 9 und 40 %).
(Duill et al., 2021)	Beobachtungsstudie	3 Klassenzimmer, 1 Grundschule, Deutschland, April/Mai 2021	NV während des Unterrichts alle 20 min für 5 min mit reduzierter Personenanzahl im Raum vs. keine Lüftung	CO ₂ Konzentration	CO ₂ Konzentration von <1000 ppm kann durch natürliche Querlüftung erreicht werden. Ohne Belüftung: fast linearer Anstieg der CO ₂ Konzentration	
(McNeill, 2022)	Beobachtungsstudie	50 Klassenzimmer, 2 K-12 Schulen, USA, Jan - März 2021	Messung der CO ₂ Konzentration (nach kontrollierter Freisetzung) in verschiedenen Szenarien	CO ₂ Konzentration	Deutliche Steigerung der Luftwechselraten (ACH), insbesondere durch Querlüftung: ACH >5/h in 90% der Klassenzimmer mit Querlüftung vs. ACH <3/h ohne Lüftung.	
(Villanueva, 2021)	Beobachtungsstudie	19 Klassenzimmer, 7 Vor-/Grund- und weiterführende Schulen, Spanien, Sept. - Okt. 2020	Messungen bei natürlicher Querlüftung, kontinuierlich während Unterricht und Pausen. 1 Klassenzimmer zusätzlich mit MV. Teilweise trugen Personen Masken.	CO ₂ Konzentration	26% der Klassenzimmer mit CO ₂ Konzentration >700 ppm. Bessere Belüftung in Vorschulen (Durchschnitt: 553 ppm, SD 56, Max. 1075 ppm) vs. Grundschulen (Durchschnitt: 602 ppm, SD 109, Max. 1341 ppm) vs. weiterführende Schulen (Durchschnitt: 699 ppm, SD 172, max. 2117).	
(Zemitis et al., 2021)	Beobachtungsstudie	9 Klassen, 1 Klassenraum, 1 weiterführende Schule, Lettland, Sept. 2020	CO ₂ Messungen während Unterricht und Pausen bei NV. Zusätzlicher Fragebogen. Keine Angaben über genaues Lüftungsregime. Schüler und Schülerinnen waren meistens während Pausen im Klassenzimmer.	CO ₂ Konzentration	Durchschnittliche CO ₂ Konzentration während 1 Woche ca. 2380 ppm, Max. 4424 ppm. Höhere Werte in 3. und 4. Stunde. Während der Pausen sank CO ₂ Konzentration nur wenig und stieg schnell wieder an.	

(Curtius et al., 2021)	Beobachtungsstudie	2 Klassenräume, 1 Schule, Deutschland, Heizperiode vor und während Pandemie	Messungen ohne Lüftung und nach Öffnung von bis zu 5 Fenstern und Tür (NV).	CO ₂ Konzentration	CO ₂ Konzentration zwischen 2500 - 2800 ppm nach einer Schulstunde ohne spezielle Lüftung. Nach mehreren Minuten NV CO ₂ Konzentration ca. 1000 ppm.	
(Alonso et al., 2021)	Beobachtungsstudie	2 Klassenräume, 1 Grundschule, Spanien (1) Jan.-März 2020 (2) Nov. 2020 - Jan 21	Schule mit MV System, Messung der CO ₂ Konzentration. (1) z.T. zusätzliche, individuelle NV. (2) kontinuierliche NV aufgrund COVID-19 Protokoll, MV teilweise ausgeschaltet.	CO ₂ Konzentration	(1) Mittlere CO ₂ Konzentration 1033 ppm (618-1571) bzw. 1079 ppm (530-1726) in jeweiligen Klassenräumen. (2) Mittlere CO ₂ Konzentration 604 ppm (466-781) bzw. 740 ppm (514-1177).	(2) niedrigere Innenraumtemperaturen, häufiger thermale Unbehagen
(Gillespie et al., 2021)	Beobachtungsstudie	2 K-12 Schulen, USA, Herbst 2020	Ermittlung der SARS-CoV-2 Fälle nach Implementierung von infektionspräventiven Maßnahmen (MERV Filter, vermehrte NV, soziale Distanzierung, Masken tragen). Kein direkter Vergleich des Effektes einzelnen Maßnahmen zwischen den Schulen.	SARS-CoV-2 Infektion	Schule 1: 109 Fälle (4,9 %), R ₀ 0,49; Schule 2: 25 Fälle (2,0%), R ₀ 0,02. 9% der Fälle verantwortlich für identifizierte Cluster. 72% der Fälle assoziiert mit Noncompliance. Viele Fälle durch Übertragungen außerhalb der Schule.	
(Stein-Zamir et al., 2020)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Schule, Israel, Mai 2020	Analyse eines SARS-CoV-2 Ausbruchs, 10 Tage nach Wiedereröffnung einer Schule. Klimaanlage (separat für jedes Klassenzimmer) in Betrieb.	SARS-CoV-2 Infektion	153 Schüler und Schülerinnen (13,2%) und 25 Erwachsene (16,6 %) mit positivem SARS-CoV-2 Befund nach Identifizierung 2er Indexfälle. Mehr Fälle in jüngeren Jahrgängen. Masken wurden aufgrund Hitzeperiode nicht getragen. Überfüllte Klassenzimmer (1,1-1,3 m ² / Person). Zusätzlich Kontakte im Rahmen außerschulischer Aktivitäten/ Schulweg.	
(Baumgarte et al., 2022)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 weiterführende Schule, Deutschland, 2020	Ausbruchsanalyse nach Schulöffnungen nach 1. Lockdown (klinische und Labordaten, Kontaktverfolgung). Lehrkräfte trugen manchmal Masken, Schüler und Schülerinnen ohne Masken.	SARS-CoV-2 Infektion	1 Lehrkraft als Indexfall, im Verlauf 31 infizierte Schüler und Schülerinnen, 2 Lehrkräfte und 3 Haushaltskontakte. Großteil der Infektionen in Zusammenhang mit 2 Unterrichtsstunden durch Indexfall. Begrenzte Belüftung, 1 überfüllter Klassenraum.	

(Riley et al., 1978)	Beobachtungsstudie/ Ausbruchsanalyse	1 Grundschule, USA, 1974	Analyse eines großen Masernausbruchs, Untersuchung des Einflusses von Impfung und Lüftung. Schule mit 2 Lüftungssystemen: 1 für das Hauptgebäude, 1 für einen neuen Gebäudeflügel. Luftrezirkulation nach Filtration. Abhängig von der Außentemperatur wird ein bestimmter Anteil an Außenluft zugeführt.	Masern Infektion	97% der Kinder geimpft. 28 Fälle primär durch den Indexfall infiziert, im Verlauf 60 Fälle bekannt. Die Rezirkulation des Virus über das Lüftungssystem wurde als relevanter Faktor im Rahmen des Ausbruchs angesehen. Die wichtigsten Expositionsorte waren derselbe Klassenraum mit (einem) Infektor(en), ein anderer Raum, der durch das gleiche Lüftungssystem versorgt wird und Schulbusse.
(Vouriot et al., 2021)	Beobachtungsstudie, mathematische Modellierung	45 Klassenzimmer, 11 Grund- und weiterführende Schulen, England, Nov. 2015 - März 2020	Hybride Lüftungssysteme. Keine spezifische Belüftungsstrategie. CO ₂ -Messungen und Berechnung des Infektionsrisikos bzw. der Sekundärinfektionen exemplarisch für zwei Perioden (5 Tage) im (1) Jan. und (2) Juli 2018	CO ₂ Konzentration, SARS-CoV-2 Infektionsrisiko	(1) Durchschnittliche CO ₂ -Konz. ca. 1500 ppm, kurzzeitige max. Werte > 2000 ppm. (2) CO ₂ -Konz. ca. halb so groß wie in (1) aufgrund vermehrter Belüftung bei wärmeren Temperaturen. Infektionsrisiko in (1) etwa doppelt so hoch wie in (2). Schwankungen der Anzahl Sekundärinfektionen zwischen den Klassenräumen auch bei gleichem Lüftungssystem.
(Schibuola, 2021)	Beobachtungsstudie, mathematische Modellierung	4 Klassenzimmer, 2 weiterführende Schulen, Italien, Winter 2015/16	(1) NV mit verschiedenen Lüftungsszenarien (keine detaillierte Beschreibung über Anzahl und Größe der Fenster etc.). (2) Simulation MV mit unterschiedlichen Luftwechselraten, jeweils normale Personenanzahl. Empfohlene Maximale CO ₂ Konzentration: max. 700 ppm höher als Außenkonzentration.	CO ₂ Konzentration, SARS-CoV-2 Infektionsrisiko	(1) Häufige, kurze Lüftungsperioden reduzieren CO ₂ Konzentration effizient, jedoch empfohlene Werte nicht dauerhaft eingehalten. Schneller Abfall der CO ₂ Konzentration bei und schneller Anstieg nach Lüftung. Maximalwerte bis 5136 ppm (Schule 1). Kontinuierlicher Anstieg der CO ₂ Konzentration ohne Lüftung bis 4680 ppm (Schule 2). Infektionsrisiko kann, selbst bei zusätzlichen Filtermethoden (z.B. Masken) nicht unter 1% gesenkt werden. (2) Infektionsrisiko kann durch Erhöhung der Luftwechselraten von 23% (8 L s ⁻¹ Person ⁻¹) auf 7,2 % (32 L s ⁻¹ Person ⁻¹) gesenkt werden, bei zusätzlicher Filtereffizienz von 95%: Reduktion auf 0,38 %.

(Paviloni s, 2021)	Beobachtung s-studie, mathematische Modellierung	101 Klassen- zimmer, 19 Grundschule n, USA, Dez. 17-Sept. 18	Messung der CO ₂ Konzentration in der Heiz- , und Kühlperiode. 37% der Schulen mit MV, 18% hatten keine oder nicht zu öffnende Fenster. Es wurden keine speziellen Lüftungsstrategien durchgeführt.	CO ₂ Konzentration, SARS-CoV- 2 Trans- missions- risiko	Keine signifikanten Unterschiede der CO ₂ Konzentration zwischen Heiz- und Kühlperiode: Median 890 ppm (Min./Max. 510-1900 ppm) bzw. Median: 800 ppm (Min./Max. 430-2200). Transmissionsrisiko während der Heizperiode um 28% höher, sowie bei neueren Gebäuden. Das Risiko war in Räumen mit MV niedriger als bei NV (0,059 vs. 0,081). Höheres Transmissionsrisiko (mit bzw. ohne Maske) von Lehrkraft zu Schüler und Schülerin (0,20/0,35) als von Schüler und Schülerin zu Lehrkraft (0,14/0,26) oder Schüler: zu Schüler und Schülerin (0,046/0,091).	
(Park, 2021)	Beobachtung s-studie, mathematische Modellierung	3 Klassen- zimmer, 1 Grundschule, Südkorea, Mai 2020	Messungen des CO ₂ Zerfalls bei Quer- bzw. einseitiger Lüftung mit unterschiedlicher Fensteröffnung (0%/15%/30%/100%) ohne anwesende Personen. Berechnung der Lüftungsrate. Laufende Klimaanlage während Lüftung (25°C Zieltemperatur). Berechnung des Infektionsrisikos für verschiedene Szenarien (Fensteröffnung, Masken etc.) mit Expositionsdauer 0,5-3 h.	CO ₂ Konzentration, SARS-CoV- 2 Infektions- risiko	Höhere Lüftungsraten bei Querlüftung (6,38/h, 10,53/h, 22,39/h, bei 15%, 30%, 100% Fensteröffnung) als bei einseitiger Lüftung (2,13/h, 2,90/h, bei 15%, 30% Fensteröffnung). Ohne Lüftung lag Infektionsrisiko mit Maske und 0,5h Expositionsdauer >1%. Unter Querlüftung (30% Fensteröffnung) ohne Masken und 1 h Exposition: Infektionsrisiko <1%. Bei einseitiger Lüftung konnte Infektionsrisiko < 1% nur durch Maskentragen und max. Expositionsdauer von 1 h erreicht werden.	Risiko der Übertragung g bei starkem Luftzug über Flur. Höherer Energiever- brauch um 10,2% bzw. 22,5% bei 15% bzw. 30% Fenster- öffnung und laufender Klimaanlage vs. 0% Fenster- öffnung.
(Zivelon ghi, 2021)	Mathematische Modellierung , zusätzlich exemplarische Beobachtung	1 Klassen- zimmer, 1 weiter- führende Schule, Italien, Juni 2021	Exemplarische CO ₂ Messungen, Modellierung des Infektionsrisikos für verschiedene Lüftungs- /Raumszenarien. NV hauptsächlich während Pausen. Modellierung mit/ohne Masken, Nutzung eines Mikrofones durch Lehrer.	CO ₂ Konzentration, SARS-CoV- 2 Infektions- risiko	70-80% Reduktion des Infektionsrisikos durch NV. Weitere Reduktion (35-45) durch Masken. Durch Einsatz Mikrofon und Reduktion der Sprechlautstärke (Lehrkraft) weitere Reduktion (20 % ohne bzw. 40 % mit Masken). Durch Verdopplung des Raumvolumens fast Halbierung des Infektionsrisikos. Winter: kürzere aber häufigere Lüftungsperioden besser als wenige lange; im Sommer insgesamt längere Öffnungsperioden möglich.	

(Gettings et al., 2021)	Umfrage, mathematische Modellierung	169 Grund- und K-5 Schulen, USA, Nov.- Dez.- 2020	Umfrage nach Umsetzung verschiedener infektionspräventiver Maßnahmen: Verbesserte NV über Fenster/Türen/Ventilatoren; Luftfilterung, Maskennutzung, Abstand halten, Klassengröße. Berechnung der Assoziation der SARS-CoV-2 Fälle mit Maßnahmen.	SARS-CoV-2 Infektion	35% niedrigere Inzidenz bei Schulen mit verbesserten Lüftungsstrategien, 48% niedrigere Inzidenz durch Kombination verbesserter NV und Luftfilterung/-reinigung, 37% niedrigere Inzidenz durch Maskentragen.	
(Xu et al., 2021)	Mathematische Modellierung	111.485 öffentliche und private Schulen, USA	Schätzung der Personendichte von 1433 repräsentativen Schulen. Simulation des Infektionsrisikos für 2 Szenarien (1-Jahr Pandemie Szenario und aktuelles epidemiologisches Szenario auf Grundlage der aufgezeichneten SARS-CoV-2 Fälle mit jeweils verschiedenen infektionspräventiven Maßnahmen. Angenommene Luftwechselrate: 2 ACH.	SARS-CoV-2 Infektionsrisiko	In 90% der Schulen Infektionsrisiko >1%. Infektionsrisiko im Dez. 6,83%, im Juli 3,85%. Höheres Infektionsrisiko in höheren Klassenstufen. Das Infektionsrisiko kann durch Erhöhung der Lüftungsrate, Reduktion der Personenanzahl, Nutzung besserer (MERV 13) Filter gesenkt werden. Um das Infektionsrisiko auf <1% zu senken, ist die Kombination mehrerer Maßnahmen nötig. Das Infektionsrisiko kann um 16,5% durch Erhöhung der Luftwechselrate von 2/h auf 2,5/h reduziert werden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen war abhängig von der Schule sowie der pandemischen Situation.	Erhöhte Energiekosten bei Nutzung besserer MERV Filter und höheren ACHs.
(Chen, 2008)	Mathematische Modellierung auf Grundlage von Messungen in echten Klassenzimmern	21 Klassenzimmer, davon 2 in Kindergarten, 1 Grundschule, Taiwan	Mechanische Ventilatoren in Grundschulklassenräumen, Klimaanlage in Kindergartenräumen (keine Angabe über ggf. zusätzliche NV). Unterrichtsstunden von 40 min, 5-10 min Pause.	Pandemische Influenza Transmissions-/ Infektionsrisiko	Niedrigstes Infektionsrisiko (0,29) bei Kindergartenkindern, aber höchstes Transmissionspotential ($R_0=16,90$). Grundschulkindern haben Infektionsrisiken von 0,56-0,64 und R_0 Werte von 16,11-16,09 (je nach Altersgruppe). Beim Personal (25-45 J.) liegt das Infektionsrisiko bei 0,07 und R_0 bei 2,80. Das Transmissionspotential kann durch Erhöhung der Luftwechselrate pro Stunde (ACH) gesenkt werden: $R_0=11,38/7,10/5,10/9,97$ bei 0,5/ 1/ 1,5/ 2/h ACH (Werte bei Kindergartenkindern). Untersuchung des Effektes verschiedener infektionspräventiver Maßnahmen (nicht alle genannt), dabei Impfung die wirksamste Maßnahme.	

(Azimi, 2020)	Mathematische Modellierung	Grund- und weiterführende Schulen, USA	Kombination aus einem Mehrzonen-Wells-Riley-Modell, einem landesweit repräsentativen Schulgebäude-Archetypmodell (mit grundlegendem Infektionskontrollscenario, regulärem und erweitertem Lüftungsbezogenen Kontrollscenario) und einer Monte-Carlo-Simulation zur Abschätzung des Übertragungsrisikos. Die Schätzungen wurden mit echten Ausbruchsdaten validiert.	Masern Transmissionsrisiko	74-mal höheres Übertragungsrisiko für ungeimpfte Schüler und Schülerinnen. Das Übertragungsrisiko war in weiterführenden Schulen höher als in Grundschulen (Median 5,8 % bzw. 3,8 %). Schulen mit kanallosen Systemen ohne Luftfilter hatten das höchste Übertragungsrisiko (Median 6,0 %), Schulen mit kanallosen Systemen mit Luftfiltern das niedrigste (Median: 3,7 %). Die Verwendung eines besseren Filters verringerte das Übertragungsrisiko für ungeimpfte Schüler und Schülerinnen (45 % bei MERV8, 32 % bei MERV13 und 29 % bei HEPA-Filtern, jeweils Medianwerte). Erhöhung der Lüftungsraten verringerte das Übertragungsrisiko für ungeimpfte Schüler und Schülerinnen (46 % bei einfachem Kontrollscenario, 38 % bei regulärem, 33 % bei erweitertem Infektionskontrollscenario).
(Stabile, 2021)	Mathematische Modellierung	Beispielhaftes Klassenzimmer, 1 weiterführende Schule.	Simulation verschiedener Szenarien (z. B. verschiedene Infektoren, Sprechintensität) mit 1 Infektor und luftgetragener Virustransmission unter MV oder NV. Berechnung der erforderlichen AER und Lüftungsvorgänge zur Erzielung einer Transmission <1 während des Unterrichts, entsprechend einem individuellem Infektionsrisiko von 4,2%. 5 Stunden Unterrichtsdauer.	CO ₂ Konzentration, Infektionsrisiko (SARS-CoV-2, saisonale Influenza)	Nach 30 min ist ein Gleichgewicht der CO ₂ Konzentration von 750 ppm erreicht (MV, AER 9,5/h). Eine maximale CO ₂ Konzentration als Indikator für Transmissionen kann (aufgrund der Dynamik) irreführend sein. Die erforderliche AER zur Verhinderung einer Infektion mit saisonaler Influenza beträgt < 0,1/h und wurde für alle Szenarien erreicht. Die erforderliche AER zur Verhinderung einer SARS-CoV-2 Infektion beträgt 9,5/h bzw. 0,8/h (Szenario: Lehrkraft= Infektor, 60 Minuten lautes Sprechen vs. gedämpftes Sprechen über Mikrofon). Erforderliche AER, wenn Schüler und Schülerin = Infektor (abhängig von Sprechzeit / nur Atemzeit und Anwesenheit im Unterricht): 0,8-3,5/h. Die erforderliche AER durch intermittierende NV

					<p>ist höher, um die gleiche durchschnittliche AER zu erhalten. Lange Belüftungszeiten oder hohe AER konnten mit NV teilweise nicht erreicht werden. Eine bestimmte erforderliche AER konnte nicht definiert werden.</p> <p>Bei NV sind kontinuierliche CO₂ Messungen und angepasste Belüftungszeiten unter Anwendung eines Feedback Systems sinnvoll.</p>	
(Shen, 2021)	Mathematische Modellierung	Verschiedene Szenarien in Innenräumen, u.a. K-12 Schulen	Modellierung des SARS-CoV-2 Infektionsrisikos an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Strategien zur Umsetzung einer guten Innenraumluftqualität.	SARS-CoV-2 Infektions-/Transmissionsrisiko	<p>Höhere Wahrscheinlichkeit der Virustransmission (Mittelwerte, SD), durch Lehrkraft (13,2%, 12,0) als von Schüler und Schülerin zu Schüler und Schülerin (3,8%, 3,6). Höheres Infektionsrisiko im Speisesaal (10,1%, 8,9) und in der Sporthalle (8,3%, 7,7) als in der Bibliothek (0,3%, 0,2) (geringere Belegung, relativ bessere Belüftung).</p> <p>Reduzierung des Infektionsrisikos bei verschiedenen Strategien: 100 % Außenluftzufuhr oder Einsatz HEPA-Filter bei MV: 27 % Reduzierung, Verdopplung des Gesamtluftvolumenstroms: 37 % Reduzierung, Verdrängungslüftung: 26 % Reduzierung, Trennwände: 46 % Reduzierung, persönliche Belüftung: 46 % Reduzierung.</p>	Hohe Kosten für die Implementierung und Wartung bestimmter Strategien

(Dai, 2020)	Mathematische Modellierung	Verschiedene Szenarien, u.a. Klassenzimmer	Berechnung erforderlicher Lüftungsraten für verschiedene Szenarien, um ein Infektionsrisiko <1% zu erreichen. Beispielhafter Klassenraum (348 m ³), Expositionszeit von 2 h.	SARS-CoV-2 Infektionsrisiko	Um ein Infektionsrisiko <1% zu gewährleisten, ist eine Lüftungsrate pro Infektor von 100–350 m ³ /h (0,25h Expositionszeit) und 1200–4000 m ³ /h (3h Expositionszeit) ohne Masken bzw. von 30–90 m ³ /h (0,25h Expositionszeit) und 300–1000 m ³ /h (3 h Expositionszeit) mit Masken erforderlich. Für ein exemplarisches Klassenzimmer sind ACH von 4,8-15/h bzw. 1,2-3,5/h (ohne bzw. mit Masken) notwendig, um ein Infektionsrisiko <1 % zu erreichen. Diese Werte sind mit einem normalen MV-System oder durch NV für die untersuchten Szenarien erreichbar.	
(Kurnitski, 2021)	Mathematische Modellierung	Verschiedene Räume in öffentlichen Gebäuden, u.a. Klassenzimmer	Berechnung der Infektionswahrscheinlichkeit für bestimmte Räume und Berechnung der erforderlichen Lüftungsrate für eine bestimmte Infektionswahrscheinlichkeit (mit und ohne Masken).	SARS-CoV-2 Infektionsrisiko	In größeren Räumen ist ein niedrigeres Infektionsrisiko leichter zu erreichen, aber es gibt i.d.R. mehr susceptible Personen. Beispielhaftes Klassenzimmer: 32m ² : AER 3,68/h, Infektionswahrscheinlichkeit 0,034. 48m ² : AER: 4,48/h, Infektionswahrscheinlichkeit 0,019. Die Gesamt Belüftungsflussrate pro infizierte Person ist wesentlich, um das Infektionsrisiko zu reduzieren.	Erhöhter Energieverbrauch (bei MV)

Notiz: NV= natürliche Lüftung, MV= mechanische Lüftung, SD: Standardabweichung, ACH: Luftwechselrate pro Stunde, Min.= Minimum, Max.= Maximum, AER= Luftwechselrate

Quelle: Charité

Diskussion

Wenn die Lüftungssituation in Klassenräumen verbessert wurde, sei es durch mechanische oder natürliche Lüftung, kam es zu einem Abfall der CO₂ Konzentration bzw. zu einer Senkung des potentiellen Infektionsrisikos (Buonanno et al., 2022; Di Gilio, 2021; Geelen et al., 2008; Vassella, 2021; Wargocki & Da Silva, 2015). In einigen Studien waren trotzdem CO₂ Konzentrationen über der empfohlenen Obergrenze von 1000 ppm (Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte, 2018) gemessen worden (Geelen et al., 2008).

Im Rahmen der Literaturrecherche und Studienauswertung traten einige Schwierigkeiten auf. Trotz der insgesamt großen Anzahl an Studien, die im Rahmen der systematischen Literaturrecherche identifiziert wurden, waren nur sechs Interventionsstudien enthalten, die den Einschlusskriterien entsprachen.

Darüber hinaus waren die Studien in Bezug auf die Gebäudearchitektur (Größe der Schule bzw. der Klassenzimmer, Anzahl, Größe, Anordnung und Ausrichtung der Fenster, etc.), und Setting (Land, Jahreszeit) sehr heterogen bzw. teilweise waren die Gebäudecharakteristika nicht im Detail beschrieben, was die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Studien erschwerte. Gleichzeitig gab es eine gewisse Redundanz, insbesondere der Beobachtungsstudien. Hier gab es viele Studien, in welchen die CO₂ Konzentration in Klassenräumen gemessen wurden, jedoch meist ohne Bezug zu speziellen Lüftungsstrategien. Zum Teil wurden in den Studien zudem mehrere infektionspräventive Maßnahmen simultan angewandt, sodass das Ausmaß des Effektes einer bestimmten Maßnahme schwer zu bestimmen war.

Aufgrund der Heterogenität der Studien, war es schwierig, generelle Empfehlungen zur Infektionsprävention für das Schulsetting abzuleiten. Es müssen die jeweiligen vor Ort Bedingungen mitberücksichtigt werden. Trotzdem ist zusammenfassend festzustellen, dass folgende Maßnahmen sinnvoll sind, um die Transmission insbesondere luftgetragener Infektionen zu reduzieren.

Wie auch von anderen Autoren bzw. Organisationen empfohlen (Clements-Croome et al., 2008; REHVA, 2021a; The_Lancet_COVID-19_Commission, 2022), sollten in allen Klassenzimmern im Durchschnitt über die Zeit dauerhaft CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm vorliegen. Während einer Pandemie durch einen luftgetragenen Erreger sollte die CO₂ Konzentrationen im Durchschnitt über die Zeit unter 800 ppm betragen, wobei kurzzeitige Überschreitungen über 1000 ppm tolerabel sind. Dies kann durch mechanische Lüftung, zum Beispiel mittels RLT Anlagen oder durch natürliche Lüftung durch Fenster und Türen erfolgen. Durch Nutzung einer RLT Anlage kann eine konstante Belüftung und damit stabilere Reduktion der CO₂ Konzentration bzw. potentiell virushaltiger Aerosole gewährleistet werden und infolgedessen das Infektionsrisiko gesenkt werden (Buonanno et al., 2022; Pavilonis, 2021; Vassella, 2021). Außerdem kann bei mechanischer Belüftung die benötigte Luftwechselrate je nach Schularart bzw. Klassenstufe und baulichen Charakteristika (Raumgröße etc.) bedarfsgerecht eingestellt werden. Zusätzlich lassen sich die Innenraumtemperaturen mit einer RLT Anlage regulieren, wodurch beispielsweise Schulausfälle durch extreme Hitzeperioden vermieden werden können. Des Weiteren könnte durch die Elimination von CO₂ und anderen Schadstoffe die Konzentrationsfähigkeit der Schüler und Schülerinnen verbessert werden (Bakó-Biró et al., 2012; Haverinen-Shaughnessy et al., 2011). Die Ergebnisse unseres Scoping Reviews bestätigen frühere Studienergebnisse, in welchen in mechanisch belüfteten Klassenräumen niedrigere CO₂ Konzentrationen gemessen wurden als in natürlich belüfteten (Canha et al., 2013; Canha et al., 2016; Rodríguez et al., 2022; Scheff et al., 2000). In der Studie von Buonanno et al. wurde in mechanisch belüfteten Klassenräumen ein um mindestens 74% reduziertes SARS-CoV-2 Infektionsrisiko im Vergleich zu natürlich belüfteten Klassenräumen festgestellt. Für jede zusätzliche Einheit der Belüftungsrate pro Schüler und Schülerin sank das Infektionsrisiko um 12-15% (Buonanno et al., 2022). Schulen sollten aus diesen Gründen standardmäßig mit einem mechanischen Belüftungssystem ausgestattet werden. Bis dies implementiert ist, sollten Schulen über eine ausreichende Anzahl an Fenstern verfügen, um eine großflächige natürliche Belüftung zu gewährleisten. Damit eine gute und regelmäßige Lüftung im Schulalltag auch wirklich umgesetzt wird, sollten die Zuständigkeiten für das Öffnen und Schließen der Fenster intern klar geregelt sein. Räume, die weder mechanisch noch natürlich belüftet werden können, eignen sich nicht als Klassenzimmer für den Schulunterricht.

Um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen bzw. um den Lüftungserfolg zu überprüfen, sollten die Schulräumlichkeiten mit CO₂ Messgeräten mit gut sichtbarem Display ausgestattet sein. Ergänzend ist es hilfreich ein visuelles oder auditives Feedback System zu integrieren, damit die Lüftungsnotwendigkeit einfach und schnell erkannt werden kann (Geelen et al., 2008; Wargocki & Da Silva, 2015). Dies ist auch von anderen Organisationen und Autoren empfohlen (Ferrari et al., 2022; Kienbaum, 2020; REHVA, 2021b).

Wie bereits durch frühere Studienergebnisse bekannt, muss bei der natürlichen Lüftung bedacht werden, dass verschiedene Umwelt- und Gebädefaktoren, zum Beispiel die Differenz von Außen- und Innentemperatur, die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Anordnung/ Ausrichtung/ Stellung der Fenster, etc. die Effizienz der Lüftung beeinflussen können (Curtius et al., 2021; de la Hoz-Torres, 2021; Zivelonghi, 2021), sodass universell geltende Angaben zur benötigten Lüftungsdauer bzw. -frequenz, um eine gute Raumluftqualität zu erreichen, kaum möglich sind. Im Allgemeinen ist die Querlüftung effektiver als die einseitige Lüftung (Ferrari et al., 2022; Park, 2021). Korsavi et al. fordern Architekten dazu auf, bei der Planung von Gebäuden alle Gebäude-, personenbezogenen und kontextualen Faktoren mit zu berücksichtigen (Korsavi et al., 2020).

Der Einsatz von mobilen Luftreinigern im Rahmen des Schulunterrichts wurde kontrovers diskutiert. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden drei Studien identifiziert, welche den Einfluss von Luftreinigern auf die Aerosolkonzentration untersuchten (Burgmann & Janoske, 2021; Curtius et al., 2021; Duill et al., 2021). Aufgrund des Endpunktes Aerosolkonzentration, der nicht den Einschlusskriterien entsprach, wurden diese Studien nicht in **Tabelle 33** mit aufgeführt, wenn nicht zusätzlich die CO₂ Konzentration gemessen wurde. In den genannten Studien konnte die Aerosolkonzentration (mit potentiell enthaltenen infektiösen Viruspartikeln) durch den Einsatz von Luftreinigern gesenkt werden. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Luftreiniger mit HEPA Filtern ausgestattet waren. Je nach Luftreiniger bzw. Filterklasse besteht eine unterschiedliche Effizienz der Luftreinigung (Umweltbundesamt, 2020b). Der Effekt der Luftreinigung während des Schulbetriebs ist darüber hinaus schwer zu messen. Obwohl es möglich ist, Partikelmessungen durchzuführen, gibt es Störfaktoren, wie z.B. andere Quellen von Partikeln, die nicht ausschließlich von der menschlichen Atmung stammen und die Messungen beeinflussen können. Zudem ist zu bedenken, dass durch mobile Luftreiniger die vorhandene Raumluft lediglich umgewälzt wird. Eine ergänzende Zufuhr von frischer (Außen-) Luft bzw. Abfuhr „verbrauchter Luft“ ist zur Elimination anderer (Schad-) Stoffe wie z.B. CO₂ trotzdem nötig (Umweltbundesamt, 2020b). Ohne zusätzliche Zufuhr von Frischluft, kann der alleinige Einsatz von Luftreinigern keine angemessene gute Raumluftqualität garantieren (Exner, 2022). Wenn benötigte Luftwechselraten durch natürliche oder mechanische Belüftung allein nicht erreicht werden können, kann der Einsatz von mobilen Luftreinigern jedoch eine ergänzende Maßnahme sein, um das Infektionsrisiko durch luftgetragene Erreger zu reduzieren.

Eine verbesserte Belüftung hat jedoch auch Nebeneffekte. Insbesondere in den Wintermonaten kann es durch häufige/ lange Lüftungsintervalle zu einem deutlichen Abfall der Innenraumtemperaturen kommen und somit zu einem thermischen Unbehagen der anwesenden Personen führen (Di Gilio, 2021; Monge-Barrio, 2022). Darüber hinaus kann es durch das vermehrte Lüften zu einem Anstieg des Heizbedarfes und somit auch zu einem Anstieg der Energiekosten kommen (Cornaro et al., 2013; Park, 2021; Wargocki & Da Silva, 2015). Weitere Nebeneffekte der natürlichen Ventilation sind, je nach Lokalisation der Schule, ggf. Lärm- und Luftschadstoffbelastungen durch angrenzende Straßen oder Baustellen (Villanueva, 2021).

Neben der Elimination potentiell infektiöser Aerosole ist es sinnvoll, die Virusemission so gering wie möglich zu halten. Diese ist u.a. abhängig von Sprechintensität und Art der Tätigkeit (Asadi, 2019; Fleischer et al., 2022; Hartmann et al., 2020; Murbe et al., 2021). Das Transmissionsrisiko von Lehrkräften zu Schüler und Schülerinnen war in den identifizierten Studien größer als von Schüler und Schülerinnen zu Lehrkräften oder Schüler und Schülerinnen zu Schüler und Schülerinnen (Pavilonis, 2021; Shen, 2021). Auch in anderen Ausbruchsanalysen wurde gezeigt, dass die Transmission von Lehrkräften zu Lehrkräften und von Lehrkräften zu Schüler und Schülerinnen einen großen Einfluss auf die Ausbrüche hatte. Fleischer et al. postulieren, dass die Partikelemission bei Kindern geringer ist als bei Erwachsenen was zu einem niedrigeren Transmissionsrisiko durch Kinder führen kann. Allerdings müssen individuelle Emissionsraten bedacht werden (Fleischer et al., 2022).

Die Position der infektiösen Person im Klassenzimmer kann das Infektionsrisiko zusätzlich beeinflussen. Mit größerem Abstand zu einer infektiösen Person verringert sich das Risiko, eine höhere Konzentration des Erregers einzuatmen und somit sinkt das Infektionsrisiko mit zunehmender Entfernung zum Infektor (Liu et al., 2017; Makris et al., 2022; Zafarnejad, 2021). Deswegen sollte insbesondere der Abstand des Lehrers/ der Lehrerin zu der ersten Bankreihe ausreichend groß sein (mind. 1,5 m), um das Infektionsrisiko im Nahfeld des Lehrers/ der Lehrerin bestmöglich zu senken. Ein größtmögliches Abstandhalten der Schüler und Schülerinnen untereinander kann das Infektionsrisiko zwar weiter senken, ist jedoch aufgrund der begrenzten Klassenzimmergrößen meist nicht möglich. Da im Rahmen des Schulalltages vor allem der/die Lehrkraft viel und laut spricht, kann der Einsatz eines Mikrofons sinnvoll sein, um die Sprechintensität und damit die potentielle Virusemission zu reduzieren (Stabile, 2021; Zivelonghi, 2021).

Wie zuvor beschrieben, wurde vor dem Hintergrund der SARS-CoV-2 Pandemie der Fokus dieses Scoping Reviews auf die Vermeidung der Transmission von SARS-CoV-2 bzw. anderen Erregern gelegt, die durch luftgetragene Transmission verbreitet werden. Darüber hinaus sind jedoch weitere Erreger zu berücksichtigen, die sich aufgrund der großen Personenanzahl und engen Kontakte innerhalb einer Klasse oder Schule schnell verbreiten können. Liu et al. haben einen Ausbruch mit *B. pertussis* in einer chinesischen Grundschule beschrieben, bei dem a.e. enger Kontakt zu dem Indexfall zur Transmission des bakteriellen Erregers geführt habe (Liu et al., 2018). Zhang und Iacono haben einen Ausbruch mit Hepatitis A Virus in einer chinesischen Grundschule beschrieben, welcher ebenfalls durch a.e. Kontaktübertragung verursacht wurde (Zhang & Iacono, 2018).

Die Transmission durch Kontaktübertragung kann durch Reinigung/Desinfektion von Oberflächen und insbesondere durch eine gute Händehygiene reduziert werden (Aiello et al., 2008; Guinan et al., 2002; Robert-Koch-Institut, 2016). Das Waschen der Hände mit Seife kann beispielweise das Auftreten von Diarrhoeen deutlich senken (Ejemot et al., 2008). Dafür müssen die Schulgebäude mit ausreichend Sanitäreinrichtungen mit Waschbecken ausgestattet sein. Eine zusätzliche Bereitstellung von Händedesinfektionsmitteln ist nicht nötig (Priest et al., 2014).

Du et al. haben den Einfluss einer verbesserten Lüftung auf einen Tuberkulose Ausbruch in schlecht belüfteten Universitäten untersucht. Hierdurch konnten die maximalen CO₂ Konzentrationen von ca. 3200 ppm auf Werte von ca. 600 ppm reduziert werden und die Inzidenz von Tuberkulose bei Kontaktpersonen um 97% gesenkt werden. Zusammenfassend konnte das Einhalten von maximalen CO₂ Konzentrationen von 1000 ppm das Infektionsrisiko bei einem Tuberkulose Ausbruch in einer Universität effektiv kontrollieren (Du et al., 2020).

Limitationen

Dieses Review hat mehrere Limitationen. Die Zahl der identifizierten Interventionsstudien, war gering. Es wurden nur Studien beachtet, die im Zeitraum bis 30.04.2022 publiziert wurden. In der Zwischenzeit wurden weitere Studien veröffentlicht, welche im Rahmen des Reviews, bis auf die oben genannte Ausnahme, nicht berücksichtigt wurden. Ebenfalls könnten ggf. durch die Erweiterung der Schlüsselwörter bei der Literaturrecherche mehr Studien gefunden werden.

Darüber hinaus wurden Beobachtungs- und Modellierungsstudien ausgeschlossen, welche vor 2020 publiziert wurden und den primären Endpunkt CO₂ Konzentration ohne Zusammenhang mit der Übertragung (luftgetragener) Infektionen hatten. Hierdurch wurden möglicherweise relevante Studien nicht identifiziert. Das gleiche gilt für den Ausschluss von Studien, die in Ländern mit niedrigem Einkommen und anderen Klimazonen als Deutschland durchgeführt worden. Die CO₂ Konzentration wurde als ein primärer Endpunkt gewählt, da diese oft als Surrogatparameter zur Abschätzung der Innenluftqualität dient. Das tatsächlich bestehende Infektionsrisiko, kann dadurch nur abgeschätzt werden. Möglicherweise sind andere Parameter dafür besser geeignet (z.B. CO₂ Dosis).

In den Studien mit primärem Endpunkt Infektions-/Transmissionsrisiko wurde hauptsächlich die Transmission von SARS-CoV-2 durch Aerosole untersucht. Die Kontakt- oder Tröpfchenübertragung wurde weniger untersucht.

Einige der Ergebnisse der Studien basierten auf mathematischen Modellen, für die Annahmen, z.B. das Vorliegen eines steady states bzw. einer gleichmäßigen Partikelverteilung im Raum, sowie gewisse Werte (z.B. Virusemission) auf Basis von vorliegenden Daten angenommen wurden. Vor dem Hintergrund der im Pandemieverlauf neuen Virusvarianten von SARS-CoV-2 bzw. der individuellen Emissionsrate und Suszeptibilität, muss jedoch die Übertragbarkeit auf die aktuelle Situation geprüft werden.

Der Fokus wurde auf infektionspräventive Maßnahmen im Rahmen von Lüftungsstrategien gelegt. Andere Maßnahmen wie das Tragen von Masken, regelmäßige Screening Tests, etc. wurden nicht diskutiert. Um einen sicheren Lehr- und Lernbetrieb zu gewährleisten, ist eine Kombination der verschiedenen Hygiene- bzw. Infektionspräventiven Maßnahmen nötig.

Schlussfolgerung

Die Belüftungssituation vieler Schulen ist nicht geeignet, um die erforderliche Innenraumluftqualität zu gewährleisten. Die Belüftung ist essentiell, um das Risiko luftgetragener Infektionen zu verringern. Schulen sollen über ein gut funktionierendes mechanisches oder natürliches Lüftungssystem verfügen, welches CO₂ Konzentrationen unter 1000 ppm garantiert, um luftgetragene Infektionen im Rahmen des Schulbetriebs weitgehend zu vermeiden. Um eine Lüftungsnotwendigkeit anzuzeigen bzw. um den Lüftungserfolg zu überprüfen, sollten die Schulräumlichkeiten mit CO₂ Messgeräten ausgestattet sein. Im Falle einer pandemischen Situation müssen schulspezifisch weitere hygiene- bzw. infektionspräventive Maßnahmen angewandt werden, um einen sicheren Lern- und Lehrbetrieb zu gewährleisten.

Quellen

Ad-hoc-Arbeitsgruppe_Innenraumrichtwerte. (2018). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft- Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden.

Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 51, 1358-1369.

<https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>

Aiello, A. E., Coulborn, R. M., Perez, V., & Larson, E. L. (2008). Effect of hand hygiene on infectious disease risk in the community setting: a meta-analysis. *Am J Public Health*, 98(8), 1372-1381.

<https://doi.org/10.2105/ajph.2007.124610>

Alonso, A., Llanos, J., Escandón, R., & Sendra, J. J. (2021). Effects of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort of Primary Schools in Winter in a Mediterranean Climate. *Sustainability*, 13(5), 2699. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2699>

Asadi, S. W., A.S.; Cappa, C.D.; Barreda, S.; Bouvier, N.M.; Ristenpart, W.D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep*, 9(1), 2348.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>

Azimi, P. K., Z.; Cedeno Laurent, J.G.; Allen, J.G. (2020). Estimating the nationwide transmission risk of measles in US schools and impacts of vaccination and supplemental infection control strategies. *BMC Infectious Diseases*, 20(1), 497.

<https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=med18&AN=32652940-/->

http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:medline&id=pmid:32652940&id=doi:10.1186%2Fs12879-020-05200-6&issn=1471-2334&isbn=&volume=20&issue=1&spage=497&pages=497&date=2020&title=BMC+Infectious+Diseases&atitle=Estimating+the+nationwide+transmission+risk+of+measles+in+US+schools+and+impacts+of+vaccination+and+supplemental+infection+control+strategies.&aulast=Azimi&pid=%3Cauthor%3EAzimi+P%3BKeshavarz+Z%3BCedeno+Laurent+JG%3BAllen+JG%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E32652940%3C%2FAN%3E%3CDT%3EJournal+Article%3C%2FDT%3E-/-

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7351650/pdf/12879_2020_Article_5200.pdf

- Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., & Williams, M. J. (2012). Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and Environment*, 48, 215-223.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>
- Baloch, R. M., Maesano, C. N., Christoffersen, J., Banerjee, S., Gabriel, M., Csobod, É., de Oliveira Fernandes, E., & Annesi-Maesano, I. (2020). Indoor Air Pollution, Physical and Comfort Parameters Related to Schoolchildren's Health: Data from the European SINPHONIE Study." *The science of the total environment*.
- Baumgarte, S., Hartkopf, F., Hölzer, M., von Kleist, M., Neitz, S., Kriegel, M., & Bollongino, K. (2022). Investigation of a Limited but Explosive COVID-19 Outbreak in a German Secondary School. *Viruses*, 14(1).
- Birmili, W., Selinka, H. C., Moriske, H. J., Daniels, A., & Straff, W. (2021). [Ventilation concepts in schools for the prevention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 64(12), 1570-1580.
<https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4> (Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft.)
- Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L., & Stabile, L. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Front Public Health*, 10, 1087087. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1087087>
- Burgmann, S., & Janoske, U. (2021). Transmission and reduction of aerosols in classrooms using air purifier systems. *Phys Fluids* (1994), 33(3), 033321. <https://doi.org/10.1063/5.0044046>
- Canha, N., Almeida, S. M., Freitas, M. C., Täubel, M., & Hänninen, O. (2013). Winter ventilation rates at primary schools: comparison between Portugal and Finland. *J Toxicol Environ Health A*, 76(6), 400-408.
<https://doi.org/10.1080/15287394.2013.765372>
- Canha, N., Mandin, C., Ramalho, O., Wyart, G., Riberon, J., Dassonville, C., Hanninen, O., Almeida, S. M., & Derbez, M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, 26(3), 350-365. <https://doi.org/10.1111/ina.12222>
- Chen, S. C., Liao, C. M. (2008). Modelling control measures to reduce the impact of pandemic influenza among schoolchildren. *Epidemiology & Infection*, 136(8), 1035-1045.
https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ovftj&AN=00003688-200808000-00004-/-http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:ovftdb&id=pmid:&id=doi:&issn=0950-2688&isbn=&volume=136&issue=8&spage=1035&pages=1035-1045&date=2008&title=Epidemiology+%26+Infection&atitle=Modelling+control+measures+to+reduce+the+im pact+of+pandemic+influenza+among+schoolchildren.&aulast=CHEN&pid=%3Cauthor%3E%3ECHEN%2C+S.%3BLIAO%2C+C.%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E00003688-200808000-00004%3C%2FAN%3E%3CDT%3EArticle%3C%2FDT%3E
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bakó-Biró, Z., Kochhar, N., & Williams, M. (2008). Ventilation rates in schools. *Building and Environment*, 43(3), 362-367.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.018>
- Coleman, K. K., & Sigler, W. V. (2020). Airborne Influenza A Virus Exposure in an Elementary School. *Sci Rep*, 10(1), 1859. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58588-1>
- Cornaro, C., Paravicini, A., & Cimini, A. (2013). Monitoring Indoor Carbon Dioxide Concentration and Effectiveness of Natural Trickle Ventilation in a Middle School in Rome. *Indoor and Built Environment*, 22(2), 445-455. <https://doi.org/10.1177/1420326x11430099>
- Curtius, J., Granzin, M., & Schrod, J. (2021). Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. *Aerosol Science and Technology*, 55(5), 586-599.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257>

- Dai, H., Zhao, B. (2020). Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. *Build Simul*, 13(6), 1321-1327. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5>
- de la Hoz-Torres, M.L.; Aguilar, A.J.; Ruiz, D.P.; Martínez-Aires, M.D.. (2021). Analysis of Impact of Natural Ventilation Strategies in Ventilation Rates and Indoor Environmental Acoustics Using Sensor Measurement Data in Educational Buildings. *Sensors (Basel)*, 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186122>
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., de Gennaro, G. (2021). CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- Du, C. R., Wang, S. C., Yu, M. C., Chiu, T. F., Wang, J. Y., Chuang, P. C., Jou, R., Chan, P. C., & Fang, C. T. (2020). Effect of ventilation improvement during a tuberculosis outbreak in underventilated university buildings. *Indoor Air*, 30(3), 422-432. <https://doi.org/10.1111/ina.12639>
- Duill, F. F., Schulz, F., Jain, A., Krieger, L., van Wachem, B., & Beyrau, F. (2021). The Impact of Large Mobile Air Purifiers on Aerosol Concentration in Classrooms and the Reduction of Airborne Transmission of SARS-CoV-2. *Int J Environ Res Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111523>
- ECDC. (2021). *COVID-19 in children and the role of school settings in transmission - second update*. Retrieved August 11, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/children-and-school-settings-covid-19-transmission>
- ECDC. (2022). *Factsheet for health professionals on Coronaviruses European Centre for Disease Prevention and Control*. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/factsheet-health-professionals-coronaviruses>
- Ejemot, R. I., Ehiri, J. E., Meremikwu, M. M., & Critchley, J. A. (2008). Hand washing for preventing diarrhoea. *Cochrane Database Syst Rev*(1). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004265.pub2>
- Euser, S., Aronson, S., Manders, I., van Lelyveld, S., Herpers, B., Sinnige, J., Kalpoe, J., van Gemeren, C., Snijders, D., Jansen, R., Schuurmans Stekhoven, S., van Houten, M., Lede, I., Cohen Stuart, J., Slijkerman Megelink, F., Kapteijns, E., den Boer, J., Sanders, E., Wagemakers, A., & Souverein, D. (2022). SARS-CoV-2 viral-load distribution reveals that viral loads increase with age: a retrospective cross-sectional cohort study. *Int J Epidemiol*, 50(6), 1795-1803. <https://doi.org/10.1093/ije/dyab145>
- Exner, M., Walger, P., Tatzel, J., Hübner, N., Pöschl, U., Knobloch, J. K., Herr, C., P. (2022). Stellungnahme der DGKH zu Lüftungskonzepten in Schulen als Teil eines Bündelkonzeptes unter Berücksichtigung von Wirksamkeit, Nachhaltigkeit und Kosten. https://www.krankenhaushygiene.de/pdffdata/2022_07_11_Stellungnahme-Luftreinigung-COVID-V2.pdf
- Ferrari, S., Blázquez, T., Cardelli, R., Puglisi, G., Suárez, R., & Mazzarella, L. (2022). Ventilation strategies to reduce airborne transmission of viruses in classrooms: A systematic review of scientific literature. *Build Environ*, 222, 109366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109366>
- Fleischer, M., Schumann, L., Hartmann, A., Walker, R. S., Ifrim, L., von Zadow, D., Luske, J., Seybold, J., Kriegel, M., & Murbe, D. (2022). Pre-adolescent children exhibit lower aerosol particle volume emissions than adults for breathing, speaking, singing and shouting. *J R Soc Interface*, 19(187), 20210833. <https://doi.org/10.1098/rsif.2021.0833>
- Gandini, S., Rainisio, M., Iannuzzo, M. L., Bellerba, F., Cecconi, F., & Scorrano, L. (2021). A cross-sectional and prospective cohort study of the role of schools in the SARS-CoV-2 second wave in Italy. *Lancet Reg Health Eur*, 5, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2021.100092>
- Geelen, L. M. J., Huijbregts, M. A. J., Ragas, A. M. J., Bretveld, R. W., Jans, H. W. A., van Doorn, W. J., Evertz, S. J. C. J., & van der Zijden, A. (2008). Comparing the effectiveness of interventions to improve ventilation behavior in primary schools. *Indoor Air*, 18(5), 416-424. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00542.x>

- Gettings, J., Czarnik, M., Morris, E., Haller, E., Thompson-Paul, A. M., Rasberry, C., Lanzieri, T. M., Smith-Grant, J., Aholou, T. M., Thomas, E., Drenzek, C., & MacKellar, D. (2021). Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools - Georgia, November 16-December 11, 2020. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*, 70(21), 779-784. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7021e1>
- Gettings, J. R., Gold, J. A. W., Kimball, A., Forsberg, K., Scott, C., Uehara, A., Tong, S., Hast, M., Swanson, M. R., Morris, E., Oraka, E., Almendares, O., Thomas, E. S., Mehari, L., McCloud, J., Roberts, G., Crosby, D., Balajee, A., Burnett, E. et al. (2022). Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Transmission in a Georgia School District-United States, December 2020-January 2021. *Clin Infect Dis*, 74(2), 319-326. <https://doi.org/10.1093/cid/ciab332>
- Gillespie, D. L., Meyers, L. A., Lachmann, M., Redd, S. C., & Zenilman, J. M. (2021). The Experience of 2 Independent Schools With In-Person Learning During the COVID-19 Pandemic. *J Sch Health*, 91(5), 347-355. <https://doi.org/10.1111/josh.13008>
- Goldstein, E., Lipsitch, M., & Cevik, M. (2021). On the Effect of Age on the Transmission of SARS-CoV-2 in Households, Schools, and the Community. *J Infect Dis*, 223(3), 362-369. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa691>
- Guinan, M., McGuckin, M., & Ali, Y. (2002). The effect of a comprehensive handwashing program on absenteeism in elementary schools. *Am J Infect Control*, 30(4), 217-220. <https://doi.org/10.1067/mic.2002.120366>
- Guo, Z. D., Wang, Z. Y., Zhang, S. F., Li, X., Li, L., Li, C., Cui, Y., Fu, R. B., Dong, Y. Z., Chi, X. Y., Zhang, M. Y., Liu, K., Cao, C., Liu, B., Zhang, K., Gao, Y. W., Lu, B., & Chen, W. (2020). Aerosol and Surface Distribution of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Hospital Wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), 1583-1591. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200885>
- Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., & Kriegel, M. (2020). Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10332>
- Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D. J., & Shaughnessy, R. J. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21(2), 121-131. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>
- Ismail, S. A., Saliba, V., Lopez Bernal, J., Ramsay, M. E., & Ladhani, S. N. (2021). SARS-CoV-2 infection and transmission in educational settings: a prospective, cross-sectional analysis of infection clusters and outbreaks in England. *Lancet Infect Dis*, 21(3), 344-353. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30882-3](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30882-3)
- Kienbaum, T. (2020). Hygienemanagement in Gesundheitseinrichtungen Teil 4: effektives Lüften während der Pandemie. *Hygienemanagement*, 10(3), 47-58.
- Korsavi, S. S., Montazami, A., & Mumovic, D. (2020). Ventilation rates in naturally ventilated primary schools in the UK; Contextual, Occupant and Building-related (COB) factors. *Building and Environment*, 181, 107061. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107061>
- Kriegel, M., Hartmann, A., Buchholz, U., Seifried, J., Baumgarte, S., & Gastmeier, P. (2021). SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010220>
- Kuhfeld, M., Soland, J., Tarasawa, B., Johnson, A., Ruzek, E., & Liu, J. (2020). Projecting the Potential Impact of COVID-19 School Closures on Academic Achievement. *Educational Researcher*, 49, 549-565. <https://doi.org/10.3102/0013189X20965918>
- Kurnitski, J. K., M.; Wargocki, P.; Boerstra, A.; Seppänen, O.; Olesen, B.; Morawska, L. (2021). Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Build Environ*, 206, 108387. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108387>

- Laß, I. (2021). *Eltern zwischen Homeoffice und Homeschooling: Arbeit und Familie in Zeiten von Kita- und Schulschließungen*. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (BiB). Retrieved 19.08.2022 from https://www.bib.bund.de/Publikation/2021/pdf/Datenreport-2021-Ein-Sozialbericht-fuer-die-Bundesrepublik-Deutschland-Kapitel-14.pdf;jsessionid=552F651E61CEA9763C9C6A3BD96A3E70.intranet261?_blob=publicationFile&v=2
- Laurent, M. R., & Frans, J. (2022). Monitors to improve indoor air carbon dioxide concentrations in the hospital: A randomized crossover trial. *Sci Total Environ*, 806(Pt 3), 151349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151349>
- Li, J., Gao, X., Ye, Y. L., Wan, T., Zang, H., Mo, P. H., & Song, C. L. (2018). An acute gastroenteritis outbreak associated with person-to-person transmission in a primary school in Shanghai: first report of a GI.5 norovirus outbreak in China. *BMC Infect Dis*, 18(1), 316. <https://doi.org/10.1186/s12879-018-3224-4>
- Liu, L., Li, Y., Nielsen, P. V., Wei, J., & Jensen, R. L. (2017). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 27(2), 452-462. <https://doi.org/10.1111/ina.12314>
- Liu, X., Wang, Z., Zhang, J., Li, F., Luan, Y., Li, H., Li, Y., & He, Q. (2018). Pertussis Outbreak in a Primary School in China: Infection and Transmission of the Macrolide-resistant Bordetella pertussis. *Pediatr Infect Dis J*, 37(6), e145-e148. <https://doi.org/10.1097/INF.0000000000001814>
- Makris, R., Tawackolian, K., Lausch, K., Kopic, C., & Kriegel, M. (2022). *Near-field exposure of pathogen-laden respiratory particles based on statistical evaluation of one emitting person indoors*.
- McNeill, V. F. C., R.; Huffman, J.A.; King, C.; Klein, R.; Lamore, M.; Maeng, D.Y.; Miller, S.L.; Ng, N.L.; Olsiewski, P.; et al. (2022). Room-level ventilation in schools and universities. *Atmospheric Environment: X*, 13, 100152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100152>
- Megahed, N. A.-G., E. M. (2021). Indoor Air Quality: Rethinking rules of building design strategies in post-pandemic architecture. *Environ Res*, 193, 110471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110471>
- Monge-Barrio, A. B.-R., M.; Dorregaray-Oyaregui, S.; González-Martínez, P.; Martín-Calvo, N.; López-Hernández, D.; Arriazu-Ramos, A.; Sánchez-Ostiz, A. (2022). Encouraging natural ventilation to improve indoor environmental conditions at schools. Case studies in the north of Spain before and during COVID. *Energy and Buildings*, 254, 111567. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111567>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*, 139, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Murbe, D., Kriegel, M., Lange, J., Schumann, L., Hartmann, A., & Fleischer, M. (2021). Aerosol emission of adolescents voices during speaking, singing and shouting. *PLoS One*, 16(2), e0246819. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246819>
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., Agha, M., & Agha, R. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *Int J Surg*, 78, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2020.04.018>
- Otte Im Kampe, E., Lehfeld, A. S., Buda, S., Buchholz, U., & Haas, W. (2020). Surveillance of COVID-19 school outbreaks, Germany, March to August 2020. *Euro Surveill*, 25(38). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.38.2001645>
- Park, S. C., Y.; Song, D.; Kim, E.K. (2021). Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease 2019 (COVID-19) airborne transmission in a school building. *Sci Total Environ*, 789, 147764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147764>
- Pavilonis, B. I., A.M.; Levine, L.; Mirer, F.; Kelvin, E.A. (2021). Estimating aerosol transmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. *Environmental Research*, 195, 110805. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110805>

- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *medRxiv*, 2020.2009.2009.20191676.
<https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>
- Pettenkofer, M. v. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta'sche Buchhandlung, Munich, Germany.
- Priest, P., McKenzie, J. E., Audas, R., Poore, M., Brunton, C., & Reeves, L. (2014). Hand sanitiser provision for reducing illness absences in primary school children: a cluster randomised trial. *PLoS Med*, 11(8), e1001700.
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001700>
- REHVA. (2021a). *CO₂ monitoring and indoor air quality*. Retrieved December 13, 2022 from <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/co2-monitoring-and-indoor-air-quality>
- REHVA. (2021b, April 15, 2021). *REHVA COVID19 Guidance version 4.1 How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces*. Retrieved November 10, 2022 from https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf
- Riley, R. L., Riley, E. C., & Murphy, G. (1978). Airborne Spread of Measles in a Suburban Elementary-School. *American Review of Respiratory Disease*, 117(4), 255-255. <Go to ISI>://WOS:A1978EV97400376
- Robert-Koch-Institut. (2016). Händehygiene in Einrichtungen des Gesundheitswesens Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI). *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 59, 1189-1220.
<https://doi.org/10.1007/s00103-016-2416-6>
- Rodríguez, D., Urbieto, I. R., Velasco, Á., Campano-Laborda, M., & Jiménez, E. (2022). Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infection in Spanish secondary school and university classrooms. *Build Environ*, 226, 109717. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109717>
- Rosbach, J. T., Vonk, M., Duijm, F., van Ginkel, J. T., Gehring, U., & Brunekreef, B. (2013). A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality: the FRESH study. *Environ Health*, 12, 110.
<https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-110>
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237-245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>
- Scheff, P. A., Paulius, V. K., Huang, S. W., & Conroy, L. M. (2000). Indoor air quality in a middle school, Part I: Use of CO₂ as a tracer for effective ventilation. *Appl Occup Environ Hyg*, 15(11), 824-834.
<https://doi.org/10.1080/10473220050175706>
- Schibuola, L., Tambani, C. (2021). High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments. *Energy and Buildings*, 240, 110882.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110882>
- Shen, J. K., M.; Dong, B.; Birnkrant, M.J.; Zhang, J. (2021). A systematic approach to estimating the effectiveness of multi-scale IAQ strategies for reducing the risk of airborne infection of SARS-CoV-2. *Build Environ*, 200, 107926. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107926>
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333-341.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>
- Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med*, 8(7), 658-659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)

Stabile, L. P., A.; Mikszewski, A.; Morawska, L.; Buonanno, G. (2021). Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms. *Build Environ*, 202, 108042.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>

Statistisches_Bundesamt. (2020, July 29, .2020). *Homeschooling: Digitale Ausstattung in Familien hängt stark vom Einkommen ab*. Retrieved August 19, 2022 from https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/07/PD20_N042_639.html

Statistisches_Bundesamt. (2022). Retrieved June 17, 2022 from https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Schulen/_inhalt.html

Stein-Zamir, C., Abramson, N., Shoob, H., Libal, E., Bitan, M., Cardash, T., Cayam, R., & Miskin, I. (2020). A large COVID-19 outbreak in a high school 10 days after schools' reopening, Israel, May 2020. *Eurosurveillance*, 25(29), 2-6. <https://doi.org/Artn200135210.2807/1560-7917.Es.2020.25.29.2001352>

Subahir, M. N., Jeffree, M. S., Hassan, M. R., Razak, M. F. A., Mohamad, S. N. G., Fong, S. Y., & Ahmed, K. (2019). Norovirus outbreak among students of a boarding school in Kluang, Johor, Malaysia. *J Infect Dev Ctries*, 13(4), 274-277. <https://doi.org/10.3855/jidc.11199>

The_Lancet_COVID-19_Commission. (2022). *Proposed Non-infectious Air Delivery Rates (NADR) for Reducing Exposure to Airborne Respiratory Infectious Diseases*. Retrieved January 18, 2023 from <https://covid19commission.org/safe-work-travel>

Thompson, H. A., Mousa, A., Dighe, A., Fu, H., Arnedo-Pena, A., Barrett, P., Bellido-Blasco, J., Bi, Q., Caputi, A., Chaw, L., De Maria, L., Hoffmann, M., Mahapure, K., Ng, K., Raghuram, J., Singh, G., Soman, B., Soriano, V., Valent, F., . . . Ferguson, N. M. (2021). Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) Setting-specific Transmission Rates: A Systematic Review and Meta-analysis. *Clin Infect Dis*, 73(3), e754-e764. <https://doi.org/10.1093/cid/ciab100>

Umweltbundesamt. (2020a, August 12, 2020). *Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt* Retrieved August 17, 2022 from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf

Umweltbundesamt. (2020b, November 16, 2020). *Einsatz mobiler Luftreiniger als Lüftungsunterstützende Maßnahme in Schulen während der SARS-CoV-2 Pandemie. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt*. Retrieved August 11, 2022 from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/201116_irk_stellungnahme_luftreiniger.pdf

UNESCO. *Adverse consequences of school closures*. Retrieved August 11, 2022 from <https://en.unesco.org/covid19/educationresponse/consequences>

van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382(16), 1564-1567.
<https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

Vassella, C. C. K., J.; Henzi, A.; Jordan, A.; Waeber, R.; Iannaccone, R.; Charriere, R. (2021). From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *International Journal of Hygiene & Environmental Health*, 234, 113746.
https://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=med19&AN=33819800-/-http://sfx.kobv.de/sfx_chb?sid=OVID:medline&id=pmid:33819800&id=doi:10.1016%2Fj.ijheh.2021.113746&issn=1438-4639&isbn=&volume=234&issue=&spage=113746&pages=113746&date=2021&title=International+Journal+of+Hygiene+%26+Environmental+Health&atitle=From+spontaneous+to+strategic+natural>window+ventilation%

[3A+Improving+indoor+air+quality+in+Swiss+schools.&aulast=Vassella&pid=%3Cauthor%3EVassella+CC%3BKoch+J%3BHenzi+A%3BJordan+A%3BWaeber+R%3BBlannaccone+R%3BCharriere+R%3C%2Fauthor%3E%3CAN%3E33819800%3C%2FAN%3E%3CDT%3EJournal+Article%3C%2FDT%3E](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092)

Villanueva, F. N., A.; Cabañas, B.; Martín, P.; Salgado, S.; Gabriel, M.F. (2021). Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2.5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. *Environ Res*, 197, 111092. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>

Viner, R. M., Mytton, O. T., Bonell, C., Melendez-Torres, G. J., Ward, J., Hudson, L., Waddington, C., Thomas, J., Russell, S., van der Klis, F., Koirala, A., Ladhani, S., Panovska-Griffiths, J., Davies, N. G., Booy, R., & Eggo, R. M. (2021). Susceptibility to SARS-CoV-2 Infection Among Children and Adolescents Compared With Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Pediatr*, 175(2), 143-156. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2020.4573>

Vouriot, C. V. M., Burrridge, H. C., Noakes, C. J., & Linden, P. F. (2021). Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air*, 31(4), 1154-1163. <https://doi.org/10.1111/ina.12818>

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558). <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>

Wargocki, P., & Da Silva, N. A. (2015). Use of visual CO₂ feedback as a retrofit solution for improving classroom air quality. *Indoor Air*, 25(1), 105-114. <https://doi.org/10.1111/ina.12119>

WHO. (2020, March 11, 2020). *WHO Director-General's opening remarks at the Mission briefing on COVID-19- 11 March 2020*. Retrieved August 17, 2022 from <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>

Xu, Y., Cai, J., Li, S., He, Q., & Zhu, S. (2021). Airborne infection risks of SARS-CoV-2 in U.S. schools and impacts of different intervention strategies. *Sustain Cities Soc*, 74, 103188. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103188>

Zafarnejad, R., Griffin, P. M. (2021). Assessing school-based policy actions for COVID-19: An agent-based analysis of incremental infection risk. *Computers in Biology and Medicine*, 134, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104518>

Zemitis, J., Bogdanovics, R., & Bogdanovica, S. (2021). The Study of CO₂ Concentration in A Classroom During The Covid-19 Safety Measures. *E3S Web of Conferences*, 246, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124601004>

Zhang, X. S., & Iacono, G. L. (2018). Estimating human-to-human transmissibility of hepatitis A virus in an outbreak at an elementary school in China, 2011. *PLoS One*, 13(9), e0204201. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204201>

Zivelonghi, A. L., M. (2021). Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring. *Building and Environment*, 204, 108139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108139>

Ergebnisse der Reinigbarkeitstests

Tabelle 34
Materiallisten

	#	Typ	Oberflächenvergütung		#	Typ	Oberflächenvergütung
Bodenbeläge	B1	PVC	PUR+Mat	Metalle	M1	Edelstahl	schwarz
	B2	Linoleum	LPX (Acrylat) (NEOCARE™)		M2	Edelstahl	gebürstet
	B3	PVC	PU (Evercare)		M3	Edelstahl	geschliffen K320
	B4	PVC	PU (Evercare)		M4	Aluminium	Eloxiert
	B5	PVC	Protecsol		M5	Aluminium	Polyesterpulver
	B6	PVC	Protecsol		M6	Aluminium	Polyester Fassaden Qualität Brillux 5910
	B7	PVC	Sparclean Oberflächenvergütung mit mineralischen Kristallpartikel		M7	Aluminium	Polyester Fassaden Qualität Brillux 5910
	B8	Acrylat-Kautschuk	-		M8	Aluminium	ohne Oberflächenbeschichtung
	B9	Acrylat-Kautschuk	-	Holz	H1	Holz	Lackierung von Holz
	W1	PVC	-		H2	Holz	Lackierung von Holz
	W2	PET	-		H3	Holz	Öl (Hart)
	B20	Linoleum	Topshield		H4	Holz	Lasur
	B21	Linoleum	xP ² ™		H5	Holz	Öl
	B22	PVC	PUR+	Kunststoffe	K1	PA	Polyamid
	B23	PVC	Pureclean		K2	PA + L	Polyamid mit Wasserlack versiegelt
	B24	PVC	Pureclean		K3	PP	Polypropylen
	B25	Linoleum	xP ² ™		K4	PP + L	Polypropylen mit Wasserlack versiegelt
	ST1	Steinzeug/Fliesen	-		K5	PP	Polypropylen
	ST2	Steinzeug/Fliesen	-		K6	PP + L	Polypropylen mit Wasserlack versiegelt
	ST3	Steinzeug/Fliesen	-		K7.1	PP	Polypropylen
	ST4	Steinzeug/Fliesen	-		K7.2	PP	Polypropylen
	ST5	Steinzeug/Fliesen	-		K8.1	PU	Polyurethan-Integralschaumsysteme
	ST6	Steinzeug/Fliesen	silber + titan oxide		K8.2	PU	Polyurethan-Integralschaumsysteme
	ST7	Steinzeug/Fliesen	silber + titan oxide		K9	PU	Polyurethan-Integralschaumsysteme
	ST8	Steinzeug/Fliesen	silber + titan oxide		K9.1	PU	Polyurethan-Integralschaumsysteme
	W1	Polyvinylchlorid	PVC				
	W2	hart Vinyl PVC frei	-				

Quelle: IBMB

Tabelle 35
Chemische Alterung mit Incidin Pro; Freie Oberflächenenergie und Rauheit

Nr.	freie Oberflächen Energie γ_s [N/mm]			Rauheit $Ra3$ [μm]		
	0 Wochen	2 Wochen	4 Wochen	0 Wochen	2 Wochen	4 Wochen
B1	19,24	23,24	37,53	2,43	2,02	2,68
B2	21,35	27,49	30,82	2,05	2,47	2,73
B3	17,66	48,93	37,96	2,22	2,40	2,47
B4	24,83	27,08	35,34	2,05	1,65	2,15
B5	14,28	21,75	18,16	3,85	3,35	2,69
B6	49,43	48,91	53,50	3,14	1,44	1,34
B7	21,41	52,98	40,74	3,82	3,57	2,58
B8	31,46	31,47	34,76	3,63	4,08	3,23
B9	23,66	30,83	31,36	3,50	3,10	3,83
B20	20,23	35,95	46,84	3,87	3,94	5,96
B21	18,6	32,87	39,70	2,52	3,08	2,65
B22	20,96	26,32	23,89	4,70	3,94	4,19
B23	25,63	24,64	20,13	1,77	1,15	1,72
B24	26,12	25,33	23,53	3,28	3,41	2,52
B25	19,64	23,75	31,10	2,67	2,67	3,19
W1	14,11	27,05	26,20	4,01	4,01	4,32
W2	28,95	36,19	30,95	15,47	15,47	16,75
ST1	98,81	35,40	34,15	11,15	10,27	7,73
ST2	73,00	28,07	21,90	2,32	2,99	2,19
ST3	45,89	32,95	23,89	5,07	4,53	4,22
ST4	82,84	25,91	23,92	4,85	3,94	4,87
ST5	99,73	25,11	24,34	3,31	2,99	3,10
ST6	76,14	24,33	23,14	2,65	2,75	2,69
ST7	57,37	31,32	25,78	1,93	2,10	2,14
ST8	37,98	25,01	23,99	0,10	0,11	0,10

Quelle: IBMB

Tabelle 36
Chemische Alterung mit Incidin Pro; Restpartikelmenge

Probennummer	Restpartikelmenge vor Alterung			Restpartikelmenge nach 2 Wochen			Restpartikelmenge nach 4 Wochen		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	3,89E+04	8,39E+02	1,81E+02	1,22E+04	5,17E+02	1,55E+02	8,77E+03	1,87E+03	1,12E+03
B2	1,38E+04	4,93E+02	1,36E+02	2,07E+04	1,15E+03	3,82E+02	2,01E+04	1,72E+03	6,78E+02
B3	2,50E+04	5,53E+02	1,21E+02	3,37E+03	2,15E+03	2,21E+03	8,15E+03	1,58E+03	9,29E+02
B4	1,23E+04	5,84E+02	1,86E+02	6,19E+03	3,84E+02	1,43E+02	8,91E+03	1,07E+03	5,28E+02
B5	5,30E+06	1,04E+04	7,52E+02	2,39E+05	3,81E+03	6,87E+02	8,52E+04	1,27E+03	2,29E+02
B6	1,18E+03	2,81E+03	4,54E+03	1,18E+04	1,52E+03	9,13E+02	1,74E+04	2,11E+03	1,30E+03
B7	7,38E+05	8,01E+03	1,19E+03	2,88E+02	3,06E+03	8,69E+03	6,20E+03	1,86E+03	1,31E+03
B8	4,37E+04	4,83E+03	1,95E+03	6,69E+04	8,03E+03	3,21E+03	1,61E+04	3,04E+03	1,60E+03
B9	2,18E+05	4,68E+03	9,50E+02	2,94E+04	2,64E+03	1,03E+03	5,43E+04	6,07E+03	2,41E+03
B20	1,13E+06	9,00E+03	1,17E+03	1,68E+04	5,87E+03	3,74E+03	1,00E+02	1,01E+04	5,29E+04
B21	5,19E+04	9,57E+02	1,92E+02	2,05E+04	2,60E+03	1,18E+03	6,84E+03	1,91E+03	1,29E+03
B22	6,32E+06	3,30E+04	3,40E+03	2,46E+05	8,18E+03	1,93E+03	7,84E+05	1,28E+04	2,21E+03
B23	7,40E+03	4,12E+02	1,43E+02	2,38E+03	1,60E+02	6,30E+01	6,51E+03	2,71E+02	8,10E+01
B24	8,81E+04	3,34E+03	8,79E+02	1,29E+05	4,03E+03	9,65E+02	3,24E+04	1,10E+03	2,90E+02
B25	6,81E+04	1,26E+03	2,52E+02	k. A.	k. A.	k. A.	3,07E+04	2,93E+03	1,16E+03
W1	9,24E+06	1,42E+04	9,16E+02	k. A.	k. A.	k. A.	4,72E+05	1,38E+04	2,99E+03
W2	2,85E+11	1,24E+10	1,19E+09	k. A.	k. A.	k. A.	3,05E+10	1,84E+10	4,44E+09
ST1	k. A.	k. A.	3,88E+06	3,21E+05	2,58E+06	3,13E+06	2,73E+05	2,91E+05	2,00E+05
ST2	7,02E+02	5,08E+03	1,65E+04	4,04E+04	2,28E+03	7,30E+02	1,84E+04	6,29E+02	1,69E+02
ST3	3,76E+02	7,32E+03	2,17E+04	6,07E+04	1,22E+04	5,81E+03	8,31E+05	1,34E+04	2,29E+03
ST4	k. A.	4,20E+02	1,52E+05	2,76E+05	8,29E+03	1,88E+03	2,87E+06	3,46E+04	4,99E+03
ST5	k. A.	2,14E+03	2,37E+05	6,41E+04	2,23E+03	5,78E+02	8,88E+04	2,60E+03	6,20E+02
ST6	1,15E+02	4,33E+03	2,65E+04	4,62E+04	1,57E+03	4,08E+02	4,75E+04	1,40E+03	3,45E+02
ST7	5,29E+03	2,86E+03	3,09E+03	1,03E+04	8,49E+02	3,50E+02	1,38E+04	6,93E+02	2,24E+02
ST8	6,29E+03	2,14E+02	7,90E+01	3,84E+02	3,80E+01	1,90E+01	3,02E+02	3,30E+01	1,70E+01

Quelle: IBMB

Tabelle 37
Chemische Alterung mit Incidin Active

Nr.	freie Oberflächen Energie γ_s [N/mm]			Rauheit $Ra3$ [μm]		
	0 Wochen	2 Wochen	4 Wochen	0 Wochen	2 Wochen	4 Wochen
B1	19,24	35,65	30,10	2,03	2,09	2,49
B2	21,35	21,14	20,30	2,05	2,15	2,79
B3	17,66	28,72	29,76	2,22	2,37	2,49
B4	24,83	32,86	37,74	2,05	1,66	1,73
B5	14,28	16,43	18,77	3,68	2,51	2,05
B6	49,43	16,23	20,69	3,14	1,77	1,33
B7	21,41	26,11	21,08	3,84	3,05	2,12
B8	31,46	30,43	31,22	3,63	3,27	3,25
B9	23,66	28,83	33,97	3,50	3,32	3,14
B20	20,23	22,14	24,18	3,87	4,13	3,75
B21	18,6	24,35	38,98	2,52	3,13	2,91
B22	20,96	22,22	61,05	4,70	4,10	4,16
B23	25,63	18,86	21,27	1,77	1,67	1,67
B24	26,12	19,18	35,59	3,28	3,78	2,93
B25	19,64	25,15	24,14	2,67	25,15	2,83
W1	14,11	21,68	22,35	4,01	21,68	2,73
W2	28,95	30,81	29,99	15,47	30,81	15,70
ST1	98,81	67,36	36,58	11,76	12,50	7,69
ST2	73,00	61,90	35,08	2,32	2,63	2,20
ST3	45,89	46,65	33,74	5,07	4,19	3,75
ST4	82,84	77,65	72,14	4,85	4,34	4,38
ST5	99,73	78,50	47,05	3,31	2,73	2,73
ST6	76,14	70,18	59,81	2,65	2,99	3,10
ST7	57,37	86,74	75,25	1,93	1,42	2,22
ST8	37,98	67,65	71,36	0,10	0,10	0,11

Quelle: IBMB

Tabelle 38

Chemische Alterung mit Incidin Active; Restpartikelmenge

Probennummer	Restpartikelmenge vor Alterung			Restpartikelmenge nach 2 Wochen			Restpartikelmenge nach 4 Wochen		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	1,41E+04	4,30E+02	1,10E+02	8,57E+03	1,03E+03	5,10E+02	1,68E+04	1,28E+03	4,88E+02
B2	1,38E+04	4,93E+02	1,36E+02	1,75E+04	5,72E+02	1,51E+02	8,41E+04	1,56E+03	3,09E+02
B3	2,50E+04	5,53E+02	1,21E+02	1,63E+04	1,05E+03	3,78E+02	1,73E+04	1,26E+03	4,74E+02
B4	1,23E+04	5,84E+02	1,86E+02	6,88E+03	5,69E+02	2,48E+02	7,50E+03	8,34E+02	4,22E+02
B5	3,09E+06	7,57E+03	6,03E+02	6,20E+04	8,85E+02	1,58E+02	1,51E+04	4,35E+02	1,08E+02
B6	1,18E+03	2,81E+03	4,54E+03	7,30E+03	2,32E+02	6,00E+01	2,62E+03	1,50E+02	5,30E+01
B7	7,72E+05	8,27E+03	1,22E+03	6,05E+04	2,44E+03	6,71E+02	1,64E+04	5,44E+02	1,45E+02
B8	4,37E+04	4,83E+03	1,95E+03	3,79E+04	3,23E+03	1,21E+03	3,19E+04	3,14E+03	1,25E+03
B9	2,18E+05	4,68E+03	9,50E+02	5,49E+04	3,46E+03	1,13E+03	1,77E+04	2,78E+03	1,37E+03
B20	1,13E+06	9,00E+03	1,17E+03	1,19E+06	1,27E+04	1,83E+03	3,12E+05	6,68E+03	1,33E+03
B21	5,19E+04	9,57E+02	1,92E+02	9,38E+04	2,72E+03	6,43E+02	7,38E+03	2,32E+03	1,59E+03
B22	6,32E+06	3,30E+04	3,40E+03	1,09E+06	1,20E+04	1,77E+03	9,00E+00	2,39E+03	2,48E+04
B23	7,40E+03	4,12E+02	1,43E+02	5,66E+03	2,30E+02	6,80E+01	5,86E+03	2,70E+02	8,50E+01
B24	8,81E+04	3,34E+03	8,79E+02	1,20E+06	8,00E+03	9,70E+02	1,22E+04	2,28E+03	1,24E+03
B25	6,81E+04	1,26E+03	2,52E+02	3,25E+02	3,30E+01	1,70E+01	5,51E+04	1,76E+03	4,42E+02
W1	9,24E+06	1,42E+04	9,16E+02	1,47E+02	2,10E+01	1,20E+01	5,67E+04	1,47E+03	3,39E+02
W2	2,85E+11	1,24E+10	1,19E+09	1,20E+03	7,30E+01	3,20E+01	5,90E+10	9,31E+09	1,45E+09
ST1	k. A.	k. A.	4,85E+06	k. A.	4,40E+01	1,46E+07	4,19E+04	1,72E+05	2,05E+05
ST2	7,02E+02	5,08E+03	1,65E+04	6,03E+02	3,16E+03	8,02E+03	9,24E+03	1,12E+03	5,45E+02
ST3	3,76E+02	7,32E+03	2,17E+04	6,63E+02	4,57E+03	9,85E+03	2,75E+04	5,21E+03	2,61E+03
ST4	k. A.	4,20E+02	1,52E+05	k. A.	9,78E+02	8,29E+04	k. A.	1,27E+03	5,98E+04
ST5	k. A.	2,14E+03	2,37E+05	5,90E+01	4,24E+03	3,38E+04	2,76E+03	2,34E+03	2,57E+03
ST6	1,15E+02	4,33E+03	2,65E+04	5,70E+01	3,12E+03	2,04E+04	2,12E+02	2,85E+03	9,82E+03
ST7	5,29E+03	2,86E+03	3,09E+03	7,07E+04	2,72E+04	3,46E+04	9,61E+02	5,98E+03	1,88E+04
ST8	6,29E+03	2,14E+02	7,90E+01	3,94E+06	1,16E+04	2,14E+03	8,45E+06	1,90E+04	3,25E+03

Quelle: IBMB

Tabelle 39

Physikalische Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 28 Tagen Bestrahlung

Nr.	freie Oberflächen Energie γ_s [N/mm]		Rauheit $Ra3$ [μm]	
	0 Wochen	4 Wochen	0 Wochen	4 Wochen
B1	19,24	30,85	2,43	1,45
B2	21,35	33,54	2,05	2,15
B3	17,66	33,41	2,22	1,68
B4	24,83	43,89	2,05	1,49
B5	14,28	21,70	3,85	2,20
B6	49,43	46,53	3,14	1,47
B7	21,41	39,31	3,82	3,45
B8	31,46	31,95	3,63	2,87
B9	23,66	33,69	3,50	2,57
B20	20,23	26,57	3,87	3,32
B21	18,6	23,49	2,52	2,58
B22	20,96	40,78	4,70	4,57
B23	25,63	32,11	1,77	1,75
B24	26,12	61,16	3,28	3,01
B25	19,64	26,35	2,67	2,06
W1	14,11	23,76	4,01	2,98
W2	28,95	32,11	15,47	11,11
ST1	98,81	70,58	11,15	5,91
ST2	73,00	71,38	2,32	2,63
ST3	45,89	59,52	5,07	5,01
ST4	82,84	73,43	4,85	3,43
ST5	99,73	69,07	3,31	2,52
ST6	76,14	66,49	2,65	2,76
ST7	57,37	72,89	1,93	1,75
ST8	37,98	62,59	0,10	0,15

Quelle: IBMB

Tabelle 40

Physikalische Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 28 Tagen Bestrahlung

Probennummer	Restpartikelmenge vor Alterung			Restpartikelmenge nach physikalischer Alterung		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	3,89E+04	8,39E+02	1,81E+02	5,37E+03	3,91E+02	1,62E+02
B2	1,38E+04	4,93E+02	1,36E+02	9,71E+03	9,91E+02	4,50E+02
B3	2,50E+04	5,53E+02	1,21E+02	7,03E+03	6,03E+02	2,66E+02
B4	1,23E+04	5,84E+02	1,86E+02	9,14E+03	1,07E+03	5,91E+02
B5	5,30E+06	1,04E+04	7,52E+02	1,90E+04	6,33E+02	1,68E+02
B6	1,18E+03	2,81E+03	4,54E+03	1,03E+04	1,28E+03	7,46E+02
B7	7,38E+05	8,01E+03	1,19E+03	6,80E+03	3,56E+03	2,85E+03
B8	4,37E+04	4,83E+03	1,95E+03	1,98E+04	2,05E+03	8,68E+02
B9	2,18E+05	4,68E+03	9,50E+02	1,27E+04	1,54E+03	7,20E+02
B20	1,13E+06	9,00E+03	1,17E+03	8,61E+04	3,52E+03	9,52E+02
B21	5,19E+04	9,57E+02	1,92E+02	3,67E+04	1,20E+03	3,10E+02
B22	6,32E+06	3,30E+04	3,40E+03	3,73E+03	7,84E+03	9,83E+03
B23	7,40E+03	4,12E+02	1,43E+02	7,35E+03	5,98E+02	2,55E+02
B24	8,81E+04	3,34E+03	8,79E+02	2,18E+02	2,91E+03	1,02E+04
B25	6,81E+04	1,26E+03	2,52E+02	1,18E+04	6,37E+02	2,14E+02
W1	9,24E+06	1,42E+04	9,16E+02	7,76E+04	2,18E+03	5,13E+02
W2	2,85E+11	1,24E+10	1,19E+09	2,45E+07	1,83E+07	7,97E+06
ST1	k. A.	k. A.	3,88E+06	k. A.	5,59E+02	1,53E+05
ST2	7,02E+02	5,08E+03	1,65E+04	2,13E+02	3,94E+03	1,76E+04
ST3	3,76E+02	7,32E+03	2,17E+04	k. A.	2,34E+03	4,43E+04
ST4	k. A.	4,20E+02	1,52E+05	k. A.	2,33E+03	3,51E+04
ST5	k. A.	2,14E+03	2,37E+05	4,22E+02	3,96E+03	1,35E+04
ST6	1,15E+02	4,33E+03	2,65E+04	2,29E+02	3,33E+03	1,29E+04
ST7	5,29E+03	2,86E+03	3,09E+03	8,67E+03	7,50E+03	1,13E+04
ST8	6,29E+03	2,14E+02	7,90E+01	1,13E+06	5,79E+03	1,27E+03

Quelle: IBMB

Tabelle 41

Mechanische Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 7 Tagen Belastung

Nr.	Freie Oberflächenenergie γ_s [mN/m]		Rauheit Ra3 [μm]	
	0 Wochen	1 Wochen	0 Wochen	1 Wochen
B1	19,24	29,14	2,43	1,73
B2	21,35	29,11	2,05	1,25
B3	17,66	28,89	2,22	1,06
B4	24,83	26,70	2,05	0,81
B5	14,28	28,76	3,85	1,18
B6	49,43	27,84	3,14	2,03
B7	21,41	26,01	3,82	2,38
B8	31,46	27,07	3,63	2,12
B9	23,66	31,83	3,50	3,95
B20	20,23	29,52	3,87	2,50
B21	18,60	29,20	2,52	2,11
B22	20,96	27,44	4,70	3,62
B23	25,63	25,85	1,77	1,28
B24	26,12	29,70	3,28	3,29
B25	19,64	30,52	2,67	1,10
W1	14,11	27,39	4,01	2,58
W2	28,95	30,72	15,47	8,50
ST1	98,81	29,62	11,15	4,82
ST2	73,00	34,47	2,32	2,52
ST3	45,89	32,64	5,07	3,37
ST4	82,84	56,93	4,85	3,27
ST5	99,73	31,05	3,31	2,77

Quelle: IBMB

Tabelle 42

Mechanische Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 7 Tagen Belastung

Probennummer	Restpartikelmenge vor Alterung			Restpartikelmenge nach mechanischer Alterung		
	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm	0,3 < d ≤ 0,5 µm	0,5 < d ≤ 1,0 µm	1,0 < d ≤ 3,0 µm
B1	3,89E+04	8,39E+02	1,80E+02	7,08E+03	4,85E+02	1,89E+02
B2	1,38E+04	4,93E+02	1,35E+02	3,88E+03	2,68E+02	1,09E+02
B3	2,50E+04	5,53E+02	1,21E+02	2,99E+03	2,07E+02	8,59E+01
B4	1,23E+04	5,84E+02	1,85E+02	1,65E+03	1,21E+02	5,15E+01
B5	5,30E+06	1,04E+04	7,52E+02	3,46E+03	2,38E+02	9,73E+01
B6	1,18E+03	2,81E+03	4,53E+03	1,07E+04	6,59E+02	2,37E+02
B7	7,38E+05	8,01E+03	1,19E+03	2,03E+04	9,72E+02	3,03E+02
B8	4,37E+04	4,83E+03	1,95E+03	1,26E+04	7,15E+02	2,45E+02
B9	2,18E+05	4,68E+03	9,49E+02	5,35E+04	6,84E+03	2,85E+03
B20	1,13E+06	9,00E+03	1,17E+03	1,79E+04	1,27E+03	4,69E+02
B21	5,19E+04	9,57E+02	1,91E+02	1,14E+04	7,78E+02	2,93E+02
B22	6,32E+06	3,30E+04	3,40E+03	1,13E+05	5,18E+03	1,44E+03
B23	7,40E+03	4,12E+02	1,43E+02	3,26E+03	2,12E+02	8,19E+01
B24	8,81E+04	3,34E+03	8,78E+02	4,46E+04	3,32E+03	1,17E+03
B25	6,81E+04	1,26E+03	2,51E+02	3,64E+03	2,53E+02	1,06E+02
W1	9,24E+06	1,42E+04	9,16E+02	2,45E+04	1,33E+03	4,30E+02
W2	2,85E+11	1,24E+10	1,19E+09	8,51E+06	1,42E+06	4,34E+05
ST1	k. A.	k. A.	3,88E+06	k. A.	k. A.	6,56E+03
ST2	7,02E+02	5,08E+03	1,65E+04	1,14E+04	1,49E+03	7,29E+02
ST3	3,76E+02	7,32E+03	2,17E+04	2,68E+04	3,56E+03	1,59E+03
ST4	k. A.	4,20E+02	1,52E+05	k. A.	2,83E+03	9,03E+03
ST5	k. A.	2,14E+03	2,37E+05	k. A.	1,81E+03	7,22E+02

Quelle: IBMB

Tabelle 43

Kombinierte Alterung, freie Oberflächenenergie und Rauheit im Ausgangszustand und nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanische Belastungen

Nr.	freie Oberflächen Energie γ_s [N/mm]		Rauheit $Ra3$ [μm]	
	0 Wochen	Kombiniert	0 Wochen	Kombiniert
B1	19,24	35,93	2,43	3,35
B2	21,35	32,53	2,05	2,26
B3	17,66	40,23	2,22	2,18
B4	24,83	66,57	2,05	2,21
B5	14,28	37,90	3,85	4,55
B6	49,43	50,19	3,14	5,20
B7	21,41	70,00	3,82	3,78
B8	31,46	30,00	3,63	3,56
B9	23,66	29,31	3,50	4,21
B20	20,23	31,66	3,87	4,92
B21	18,60	41,47	2,52	4,67
B22	20,96	37,37	4,70	9,61
B23	25,63	32,50	1,77	3,45
B24	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
B25	19,64	56,40	2,67	4,29

Quelle: IBMB

Tabelle 44

Kombinierte Alterung, Restpartikelmenge im Ausgangszustand und nach 4 Wochen physikalische und 7 Tagen mechanischen Belastungen

Probennummer	Restpartikelmenge vor Alterung			Restpartikelmenge nach kombinierter Alterung		
	0,3 < d ≤	0,5 < d ≤	1,0 < d ≤	0,3 < d ≤	0,5 < d ≤	1,0 < d ≤
	0,5 µm	1,0 µm	3,0 µm	0,5 µm	1,0 µm	3,0 µm
B1	3,89E+04	8,38E+02	1,80E+02	1,36E+04	3,38E+03	1,99E+03
B2	1,38E+04	4,93E+02	1,35E+02	1,11E+04	1,07E+03	4,65E+02
B3	2,50E+04	5,53E+02	1,21E+02	7,02E+03	1,36E+03	8,39E+02
B4	1,23E+04	5,84E+02	1,85E+02	1,63E+03	4,19E+03	8,73E+03
B5	5,30E+06	1,04E+04	7,52E+02	1,05E+04	9,22E+03	8,06E+03
B6	1,18E+03	2,81E+03	4,53E+03	4,99E+01	5,31E+03	3,10E+04
B7	7,38E+05	8,01E+03	1,19E+03	2,32E+00	2,00E+03	3,46E+04
B8	4,37E+04	4,83E+03	1,95E+03	5,72E+04	4,57E+03	1,62E+03
B9	2,18E+05	4,68E+03	9,49E+02	1,49E+05	1,03E+04	3,22E+03
B20	1,13E+06	9,00E+03	1,17E+03	1,37E+05	2,05E+04	8,27E+03
B21	5,19E+04	9,57E+02	1,91E+02	2,81E+03	8,05E+03	1,13E+04
B22	6,32E+06	3,30E+04	3,40E+03	3,28E+04	7,84E+05	1,56E+06
B23	7,40E+03	4,12E+02	1,43E+02	2,95E+04	3,88E+03	1,72E+03
B24	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
B25	6,81E+04	1,26E+03	2,51E+02	2,54E+01	2,94E+03	2,04E+04

Quelle: IBMB