

Schulunterricht während der SARS-CoV-2 Pandemie – Welches Konzept ist sicher, realisierbar und ökologisch vertretbar?

Christian J. Kähler, Thomas Fuchs, Benedikt Mutsch, Rainer Hain

Universität der Bundeswehr München
Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Übersicht

Kindern gehört die Zukunft und damit sie die Zukunft vorausschauend und absichtsvoll gestalten können benötigen sie Bildung. Kinder haben daher das Recht auf Bildung, gemäß Artikel 29 der UN-Konvention über die Rechte des Kindes [1]. Fachliche Bildung ist aber nicht alles, denn die Kinder müssen auch im Miteinander ihre Stärken und Schwächen erfahren und sich gegenseitig zu verantwortungs- und rücksichtsvollen Menschen erziehen, damit sie gesellschaftsfähige Persönlichkeiten werden. Nur so können sie die Zukunft auch friedlich und menschenwürdig gestalten. Daher ist der Besuch der Schule unerlässlich. Kinder haben aber auch das Recht auf Schutz und Fürsorge durch ihre Eltern und den Staat, denn auch das Wohl des Kindes ist gemäß Artikel 3 der UN-Konvention über die Rechte des Kindes vorrangig zu berücksichtigen. Die Frage ist daher, wie der Schulunterricht in Gemeinschaft während der SARS-CoV-2 Pandemie realisiert werden kann, ohne die Kinder einem unnötigen Infektionsrisiko auszusetzen. Es geht dabei nicht nur um die Kinder, denn wenn die Kinder gefährdet sind, dann sind es auch deren Eltern und die Großeltern und schließlich die gesamte Gesellschaft. Es gibt zahlreiche Konzepte, die während der Pandemie Sicherheit in Schulen versprechen. Bei der Auswahl der Konzepte müssen natürlich die Kosten im Verhältnis zum Nutzen abgewogen werden. Die Menschen erwarten zu Recht einen effizienten Mitteleinsatz. Das bedeutet, dass entweder das gesteckte Ziel mit möglichst geringen Mitteln erreicht wird oder, dass mit den verfügbaren Mitteln eine größtmögliche Annäherung an das Ziel erfolgt. Neben den finanziellen Mitteln sind aber auch die Langzeitfolgen für Staat, Wirtschaft, Bevölkerung und Umwelt unter dem Druck der Pandemie zu berücksichtigen. Auch der gesellschaftliche Zusammenhalt und die Demokratie dürfen nicht gefährdet werden. Es werden gegenwärtig verschiedene Schutzkonzepte diskutiert. Oft werden die Vorteile überhöht dargestellt und die Nachteile verschwiegen. Ferner beruhen manche Argumente auf Annahmen, die nicht zutreffen. Diese Studie verfolgt das Ziel, die wesentlichen Schutzkonzepte vergleichend zu bewerten und mit Hilfe von experimentellen Analysen nachzuweisen, inwieweit die Schutzkonzepte wirksam sind. Wir werden zeigen, dass eine vergleichsweise hohe Sicherheit vor einer Infektion in den Klassenzimmern technisch gewährleistet werden kann, ohne die Kinder mit Masken zu belasten. Gleichzeitig ist das Schutzkonzept ökonomisch sinnvoll und die Belastung für die Umwelt ist vergleichsweise gering, so dass Infektionsschutz und Klimaschutz nicht gegeneinander abgewogen werden müssen, denn Infektionsschutz und Klimaschutz sind politische und gesellschaftliche Ziele, die zusammen erreicht werden müssen.

1. Einleitung

Schule ist nicht gleich Schule, das ergibt sich schon aus dem unterschiedlichen Alter der Bauten und deren technischer Ausstattung. Es gibt daher auch kein einheitliches Schutzkonzept während der SARS-CoV-2 Pandemie, welches für alle Schulen gleichermaßen empfohlen und umgesetzt werden kann. Es gilt daher unter den jeweiligen Randbedingungen der Schulen ein Konzept zu etablieren, das größtmögliche Sicherheit vor einer Infektion verspricht und die ökonomischen Rahmendbedingungen und die ökologische und gesellschaftliche Belastbarkeit beachtet. Dass der ökologische Aspekt bedeutsam ist, bedarf keiner Erläuterung [2, 3]. Der ökonomische Aspekt ist wichtig, denn es wäre nicht verantwortungsvoll, wenn unsere Kinder durch die aktuellen politischen Entscheidungen mit langfristigen Belastungen in ihrem Handlungsspielraum bei der Gestaltung der Zukunft übermäßig eingeschränkt würden. Die zu erwartenden Belastungen für die Kinder durch Staatsverschuldung, Rentenlast, EU-Rettungsschirme, usw. ist schon jetzt erheblich, insbesondere im Hinblick auf die alternde Gesellschaft und dem bevorstehenden Renteneintritt der Babyboomer [4, 5]. Ferner sorgt ein verschwenderischer Umgang mit Steuergeldern stets dafür, dass auch gesellschaftlich wenig nutzbringende Investitionen getätigt werden. Das führt nicht nur zu unnötigen Belastungen, die den Handlungsspielraum zukünftig einschränken und Abhängigkeiten von Finanzinstitutionen schaffen, sondern stellt auch die Legitimation der Investition in Frage. Daher ist es ganz wesentlich, dass ein politisches Ziel entweder mit möglichst geringem Budget erreicht wird oder dass man dem Ziel möglichst nahekommt, wenn nicht genug Mittel zur Verfügung stehen. Zum Schutz der Bevölkerung während der Pandemie werden aktuell drei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten erwogen und die Zuteilung der Mittel wird gegenwärtig im gesellschaftlichen und politischen Prozess ausgehandelt.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Mittel für die Behandlungsmethoden zur Genesung der erkrankten Personen einzusetzen. Aufgrund der Schwere und Dauer der Infektionskrankheit Covid-19 sind die Behandlungskosten oft hoch und für die Patienten leidvoll [6]. Da diese Möglichkeit das Infektionsgeschehen nicht beeinflussen kann, besteht die Gefahr, dass die Infektionszahlen während der kalten Jahreszeit rasch zunehmen und das medizinische System unter Druck setzen, so dass eine optimale medizinische Behandlung nicht mehr gewährleistet werden kann. Hinzu kommt, dass auch viele Patienten mit anderen Erkrankungen bei steigenden Infektionszahlen in Mitleidenschaft gezogen werden, wenn deren Behandlung aufgeschoben wird und ihre Versorgung unter der Last der Pandemie leidet. Allein auf die Covid-19 Behandlung zu setzen wäre nur dann sinnvoll, wenn ein wirksames und gut verträgliches Medikament für alle erkrankten verfügbar wäre. Dies ist aber aktuell nicht der Fall und daher ist diese Möglichkeit derzeit nicht allein zielführend. Die Entwicklung eines Medikaments ist aber natürlich sehr wichtig, um zukünftig einen milden Infektionsverlauf und Heilung ohne Leid und zu geringen Kosten zu ermöglichen.

Zweitens besteht die Möglichkeit, die Schwere der Erkrankung im Falle einer Infektion mit Hilfe eines Impfstoffes abzumildern. Dieser Weg hat sich bei vielen Infektionskrankheiten bewährt und daher werden große Hoffnungen in die Entwicklung eines Impfstoffes gesetzt. Die Verheißungen des „erlösenden“ Impfstoffes nehmen in den Medien teilweise religiöse Züge an. Es muss aber betont werden, dass dieses Konzept mit zwei großen Risiken verbunden ist. Einerseits muss die Bevölkerung eine Impfung auch wollen und praktisch umsetzen. Inwieweit die Bevölkerung dazu bereit ist, lässt sich nicht vorhersagen. Andererseits muss ein hoch wirksamer und gut verträglicher Impfstoff erstmal entwickelt, getestet, hergestellt und weltweit

verfügbar sein. Aktuell gibt es aber keinen Impfstoff, der vor einer SARS-CoV-2 Infektion wirksam schützt. Die Entwicklung und Erprobung eines Impfstoffes ist in der Regel ein langer Prozess, so dass dieser Weg zwar vielversprechend erscheinen mag, in der gegenwärtigen Situation kann er aber keinen Beitrag zur Bewältigung der Pandemie leisten. Daher wäre es fatal, allein auf einen Impfstoff zu hoffen, um der Pandemie zu begegnen. Es ist auch nicht vorhersehbar, ob ein Impfstoff überhaupt einen umfassenden Schutz bietet oder nur zu einem gewissen Prozentsatz schützend wirkt. Auch wenn die gegenwärtigen Erwartungen an einen Impfstoff überhöht sind, ist die Entwicklung eines Impfstoffes natürlich sehr wichtig, denn selbst wenn sich nicht alle impfen ließen, oder/und nur ein Teil der Impfungen zur Immunität führen würden, würde eine Impfung zur Entlastung des medizinischen Systems beitragen und ggf. die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Virus verzögern.

Drittens kann versucht werden, die Übertragung des Virus präventiv zu verhindern. Wenn die Infektionszahlen über einen längeren Zeitraum hinreichend niedrig sind, dann besteht grundsätzlich die Hoffnung, dass SARS-CoV-2 bedeutungslos wird. Diese Hoffnung gleicht aber auch einer Erlösungsreligion, denn die dafür notwendigen gesellschaftlichen Anstrengungen werden in einer freiheitlichen Gesellschaft nicht aufgebracht. Trotzdem ist es in der aktuellen Situation sehr wichtig, die Zahl der Infektionen zu minimieren, um menschliches Leid zu verhindern und die Belastungen des Gesundheitssystems und des gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und öffentlichen Bereiches zu reduzieren [6]. Aber wie kann das in der Praxis umgesetzt werden?

Ein Weg besteht darin, dass alle Infizierten zu einem Zeitpunkt solange isoliert werden, bis kein Mensch mehr infektiös ist. Selbst wenn ein Schnelltest global verfügbar wäre, der unmittelbar und mit 100% Zuverlässigkeit nachweist, ob eine Person in Quarantäne muss oder nicht, würde dieser Weg praktisch nicht durchführbar sein. Trotzdem wäre natürlich ein zuverlässiger Schnelltest sehr sinnvoll, denn er könnte dazu beitragen das Infektionsgeschehen zu verlangsamen und unnötige Quarantänezeiten zu verhindern. Daher ist auch die Investition zur Entwicklung eines schnellen Nachweisverfahrens sinnvoll.

Ein anderer Weg besteht darin, die Infektionswege wirksam zu unterbrechen, so dass eine Infektion nicht mehr stattfinden kann. Dieser Weg erfordert, dass die Infektionswege bekannt sind und dass Techniken existieren, die in der Lage sind eine SARS-CoV-2 Übertragung wirksam zu verhindern. Ferner müssen die Menschen bereit sein, die Technologien zu nutzen. Ohne Akzeptanz in der Bevölkerung sind alle Konzepte zum Scheitern verurteilt. Auch wenn dieser Ansatz nicht zu einem völligen Verschwinden von SARS-CoV-2 führen kann, stellt er aktuell das wirksamste Instrument dar, um das Infektionsgeschehen und damit die Kosten für den Staat, die Wirtschaft und die Gesellschaft einzudämmen. Das ist wichtig, denn so lässt sich Zeit gewinnen, um ein Medikament oder einen wirksamen, sicheren und gut verträglichen Impfstoff zu entwickeln. Da es nicht absehbar ist, wie lange die Entwicklung eines Impfstoffes oder Medikaments dauert, wäre es fahrlässig, die einzige aktuell wirksame Schutzmöglichkeit finanziell randständig zu behandeln, denn allein diese Technologien und deren Nutzung bestimmen den Infektionsverlauf in den nächsten Monaten und vielleicht Jahren. Versäumnisse in diesem Bereich führen unmittelbar zu hohen Kosten und Leid in anderen Bereichen.

Nach gegenwärtigem Stand der Forschung wird SARS-CoV-2 hauptsächlich über Tröpfchen und Aerosolpartikel übertragen, die beim Atmen, Sprechen, Singen, Husten oder Niesen entstehen und über die Atemluft aus- und eingeatmet werden [7, 8, 9, 10]. Um wirksame

Maßnahmen zur Verhinderung einer Infektion zu etablieren, ist es zunächst sinnvoll, zwischen einer *direkten* und einer *indirekten* Infektion zu unterscheiden. Eine *direkte* Infizierung kann stattfinden, wenn viele emittierte Tröpfchen und Aerosolpartikel mit infektiösen Viren über kurze Distanz (kleiner 1,5 m) von einer nicht infizierten Person eingeatmet werden. Je kleiner der Abstand, umso größer ist die Virenlast und damit das Infektionsrisiko. Dies ist einfach eine Folge der Strömungsphysik, denn mit zunehmendem Abstand vom Mund weitet sich der ausgeatmete Luftstrahl aufgrund von Reibungseffekten auf, verlangsamt sich dabei aufgrund der Impulserhaltung und durch überlagerte turbulente Mischungsprozesse und Diffusion wird die Virenlast zusätzlich reduziert. Daher bieten Abstände einen sehr guten Schutz vor diesem Übertragungsweg. Darüber hinaus spielt aber auch noch die Dauer der Belastung eine wichtige Rolle, denn die Inhalation einer hohen Virenkonzentration für kurze Zeit ist genauso gefährlich wie die Inhalation einer geringen Virenkonzentration über einen längeren Zeitraum. Letztlich ist nämlich das Produkt aus Virenkonzentration \times Zeit die entscheidende Größe. Ob es zu einer Infektion kommt, hängt von der minimalen Infektionsdosis ab, also der Virenanzahl die notwendig ist, um eine Infektion tatsächlich auszulösen [11, 12]. Die direkte Infektion kann sowohl in Innenräumen als auch in der freien Natur auftreten. Im Außenbereich sind direkte Infektionen allerdings sehr selten, da die konvektiven und thermischen Luftbewegungen die gradlinige Strahlausbreitung zum Gegenüber behindern und für einen schnellen Abtransport der Viren sorgen.

Eine *indirekte* Infektion kann nur dann auftreten, wenn die Virenlast im Raum multipliziert mit der Verweildauer der Person die infektiöse Dosis übertrifft [11, 12]. Dieser Infektionsweg kann folglich nur in Innenräumen auftreten, wenn das Raumvolumen klein ist im Verhältnis zu der Anzahl der infizierten Personen. In großen Werk- oder Lagerhallen oder riesigen Kirchen werden selbst viele infizierte Personen nicht in der Lage sein, eine infektiöse Virendosis im Raum zu erzeugen und daher ist die indirekte Infektionsgefahr in diesen Räumlichkeiten unbedeutend. Es ist klar, dass eine indirekte Infektion nicht durch Sicherheitsabstände zu infizierten Personen verhindern werden kann, da ja die Raumluft überall mit infektiösen Viren kontaminiert ist. Schutz vor einer Infektion kann unter diesen Bedingungen nur über kurze Verweilzeiten erreicht werden oder technische Hilfsmittel.

Neben der direkten und indirekten Infektion über die Aerosolpartikel gibt es auch noch den Infektionsweg über einen Kontakt. Dieser Infektionsweg wird aber bereits durch das veränderte Sozialverhalten bei Begegnungen (Vermeidung von Händeschütteln und anderen Berührungen) und durch die allgemeinen Hygienemaßnahmen effizient verhindert, so dass er hier nicht weiter betrachtet werden muss. Berücksichtigen wir nur den direkten und indirekten Infektionspfad, dann stellt sich die Frage, mit welchen Konzepten diese beiden Infektionswege unter den Bedingungen des Schulunterrichtes wirksam verhindert werden können.

2. Wie lässt sich das Infektionsrisiko in Klassenräumen reduzieren?

Die Beantwortung der Frage erfordert zunächst ein Verständnis der wesentlichen Schutzkonzepte und deren Vor- und Nachteile. Bei der Bewertung betrachten wir insbesondere die Sicherheit vor einer Infektion, die Kosten der Maßnahme, die technische und gesellschaftliche Realisierbarkeit und die Umweltverträglichkeit.

Schutzkonzept I: Freies Lüften, RLT Anlage und CO₂ Ampel

Das einfachste Konzept besteht darin, den Schulunterricht ohne zusätzliche Schutzvorkehrungen durchzuführen und lediglich durch das regelmäßige freie Lüften über geöffnete Fenster für eine Reduzierung der möglichen Virenlast im Raum zu sorgen. Diese Variante erscheint zunächst sehr kostengünstig und einfach umsetzbar, da die Klassenräume in der Regel mit Fenstern ausgestattet sind. Es ist daher nicht verwunderlich, dass dieses Konzept häufig sehr positiv dargestellt wird. Die praktische Umsetzung dieses Konzepts scheint den Befürwortern Recht zu geben, denn die Infektionszahlen steigen gegenwärtig nicht sprunghaft an. Das liegt aber nicht daran, dass dieses Konzept Sicherheit vor einer Infektion bietet, sondern daran, dass die aktuellen Infektionszahlen in Deutschland recht gering sind und daher Infektionen recht unwahrscheinlich sind. Wenn die Infektionszahlen im Herbst und Winter zunehmen sollten, dann werden auch sofort die Schwächen und Risiken des Konzepts sichtbar.

Der größte Mangel des Schutzkonzepts besteht darin, dass keinerlei Vorkehrungen zur Verhinderung direkter Infektionen getroffen werden. Weder eine Vergrößerung der Abstände zwischen den Schülerinnen und Schülern, noch Atemschutzmasken, Mund-Nasen-Bedeckungen oder Gesichtsvisiere (Faceshields) werden verwendet. Darüber hinaus wird auch die Möglichkeit, die Virenlast im Raum durch das regelmäßige freie Lüften zu reduzieren, überschätzt. Die freie Lüftung ist physikalisch nur dann wirkungsvoll, wenn entweder ein großer Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen besteht oder der Wind vor den Fenstern weht [13, 14]. Ein Temperaturunterschied ist oft nicht vorhanden und wenn er besteht, dann wird er beim freien Lüften schnell reduziert, so dass dieser Mechanismus meist nur für kurze Zeit wirksam ist. Der Luftaustausch wird daher entsprechend lange dauern, wie wir in Kapitel 3 experimentell nachweisen werden. Der Wind vor dem Fenster ist auch nur selten stark genug, um eine ausreichende Lüftung zu gewährleisten. Da die Wirksamkeit der freien Lüftung abhängig ist von nicht beeinflussbaren Faktoren (Temperatur, Wind, Größe/Position der Fenster) bleibt die Frage, wie gelüftet werden soll, wenn diese physikalischen Mechanismen nicht nutzbar sind.

Da das Lüften oft nicht effektiv funktioniert, ist es in der warmen Jahreszeit empfehlenswert, alle Fenster während der gesamten Raumnutzungszeit sehr weit zu öffnen. Die Querlüftung ist besonders effektiv [15], aber Fenster an gegenüberliegenden Seiten des Raumes sind selten. Wenn in der warmen Jahreszeit selbst mit weit geöffneten Fenstern kein effizienter Lüftungserfolg über die physikalischen Mechanismen erzielt werden kann, dann ist es empfehlenswert in ein Fenster einen Ventilator zu stellen, der den Raum mit virenfreier Außenluft versorgt. Der Abtransport der Viren aus dem Raum wird dann automatisch über die anderen Fenster erfolgen. Das Absaugen der Raumluft mit einem Ventilator ist weniger zu empfehlen, auch wenn es physikalisch zunächst sinnvoll erscheint, jedenfalls wenn die Innenluft wärmer ist als die Außenluft. Der Grund dafür ist, dass der leichte Unterdruck im Raum beim Absaugen dazu führt, dass auch Raumluft durch Türspalte und Lüftungskanäle etc., aus anderen Gebäudeteilen angesaugt wird. Da diese Luft in den benachbarten Räumen kontaminiert sein kann, ist die Druckerhöhung in dem Raum durch das Einblasen von Außenluft aus Sicherheitsgründen empfehlenswert [15].

Das freie Lüften ist während der warmen Jahreszeiten sicher die kostengünstigste Methode, um den Anstieg der Virenlast im Raum zu begrenzen und die indirekte Infektion zu verhindern. Während der kalten Jahreszeit führt dieses Lüftungskonzept allerdings zu Erkältungen und

das Wohlbefinden der Menschen wird beeinträchtigt. Dauerlüften ist daher keine Option im Herbst und Winter. Wird zum regelmäßigen Stoßlüften übergegangen, dann muss stets daran gedacht werden und die Schülerinnen und Schüler müssen es auch wollen und können (in vielen Schulen lassen sich die Fenster nicht öffnen). Ferner entsteht bei der Stoßlüftung die Frage, in welchen Abständen und für wie lange gelüftet werden soll. Regelmäßig wird eine CO₂ Ampel als Lösung des Problems angepriesen. Es wird dabei unterstellt, dass der CO₂ Wert mit der Virenlast im Raum korreliert. Diese Unterstellung ist aber falsch. Zunächst ist zu bedenken, dass die Virenlast von der Anzahl der infizierten Personen im Raum, deren Verweildauer und deren Aktivität abhängig ist. Wenn aus welchen Gründen auch immer angenommen wird, dass die Virenlast in einem Raum nach t Minuten erreicht ist, sofern nur eine einzige Person infiziert ist, dann müsste bei zwei infizierten Personen bereits nach $t/2$ gelüftet werden, obwohl der angenommene kritische CO₂ Wert erst nach t Minuten erreicht ist. Wenn sich noch mehr infizierte Personen in dem Raum aufhalten, dann reduziert sich die Zeit weiter entsprechend der Anzahl N der infizierten Personen gemäß t/N . Dabei ist die Aktivität der Personen noch nicht einmal berücksichtigt. Daher ist eine CO₂ Anzeige allenfalls dann ein grobes Maß für die Virenlast, wenn die Zahl der infizierten Personen in dem Raum bekannt ist. Aber diese Zahl ist ja gerade unbekannt und daher ist die CO₂ Ampel überhaupt kein Indikator für eine Infektionsgefahr. Das Problem lässt sich auch mit einem anderen Beispiel illustrieren. Wenn 10 gesunde Personen in einem Raum sind, wird sich nach einer gewissen Zeit eine bestimmte CO₂ Konzentration ergeben und die Virenlast ist Null. Wenn 5 Personen heraustraten und dafür 5 infizierte Personen eintreten, dann wird sich am Verlauf der CO₂ Konzentration kaum etwas ändern, aber die Virenlast im Raum steigt sehr schnell an und damit das indirekte Infektionsrisiko. Der Wunsch, eine Lösung für 25 Euro pro Klassenzimmer in Aussicht zu stellen, die Sicherheit suggeriert, ist nachvollziehbar, aber diese vermeintliche Lösung erfüllt nicht den Zweck. Es könnte eingewendet werden, dass die Zahl der infizierten Personen klein ist und daher zu erwarten wäre, dass sich in den meisten Klassen keine oder allenfalls eine infizierte Person statistisch befindet. Das ist gegenwärtig sicherlich richtig, allerdings müssen zwei Dinge berücksichtigt werden. Zum einen ist zu befürchten, dass die derzeit niedrige Zahl der Infizierten im Winter stark ansteigen wird. Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich infizierte Personen in den Klassenräumen aufhalten. Zweitens muss berücksichtigt werden, dass ein infiziertes Kind mit hoher Wahrscheinlichkeit andere Kinder anstecken wird, wenn es keine ausreichenden Schutzvorkehrungen gibt. Dies lässt sich damit begründen, dass die Kinder sehr vertraut sind und sich im Unterricht über lange Zeit nahekommen. Es ist daher zu befürchten, dass gerade in Schulen bei ungenügendem Schutz Superspreader Ereignisse eine große Bedeutung gewinnen werden [16].

Die CO₂ Ampel ist aber äußerst nützlich, um festzustellen, ob durch das Stoßlüften ein Lüftungserfolg zu verzeichnen ist und somit lässt sich die notwendige Lüftungsdauer ermitteln. Ändert sich der CO₂ Wert während der Stoßlüftung nicht wesentlich, dann ist zweifelsfrei klar, dass das freie Lüften nicht funktioniert, weil entweder die Temperatur drinnen und draußen gleich ist oder kein Wind weht. Was in diesem Fall zu tun ist, wird von den Befürwortern des Konzepts leider nicht beantwortet.

Das wesentliche Argument, dass gegen das freie Lüften während der kalten Jahreszeit spricht, ist aber die Verschwendung von thermischer Energie. Um Ressourcen zu schonen und die Erderwärmung zu begrenzen, werden die Häuser aufwendig und kostenintensiv isoliert und hoch effiziente Heizungen werden installiert. Es ist weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll, erst diese Maßnahmen umzusetzen, um dann die thermische Energie aus dem

geöffneten Fenster herauszulassen. Die Forderung, dass die Klimaziele während der Pandemie von nachrangiger Bedeutung sein sollen, ist nicht nachvollziehbar. Es muss doch das Ziel sein eine Lösung zu finden, die den Infektionsschutz mit dem Klimaschutz in Einklang bringt.

In neuen modernen Schulen kann einigen Nachteilen des freien Lüftens durch sogenannte raumlufttechnische (RLT) Anlagen begegnet werden [17]. Wenn die Anlagen mit 100% Außenluft betrieben werden und die Luftwechselrate pro Stunde dem sechsfachen des Raumvolumens entspricht, dann ist der Lüftungserfolg unabhängig von der Temperatur- und Wettersituation geregelt und es muss auch niemand an das regelmäßige Lüften denken und es praktisch umsetzen. Insofern bieten diese Anlagen eine deutliche Verbesserung gegenüber der freien Lüftung. Daher sollten sie auch unbedingt genutzt und wie oben beschrieben betrieben werden, wenn sie vorhanden sind, um eine hohe Sicherheit vor einer indirekten Infektion zu schaffen [18]. Es ist aber klar, dass diese RLT Anlagen mit 100% Außenluft und einer Luftwechselrate von 6 pro Stunde keinen energetischen Vorteil gegenüber der freien Lüftung bieten. Ferner ist zu bedenken, dass RLT Anlagen mit Frostwächtern ausgestattet sind, die im Winter dafür sorgen, dass die Anlagen nicht anlaufen, wenn der Frischluftanteil 100% beträgt. Sonst könnten sie einfrieren und Schaden erleiden. Um das technische Problem zu beheben, können die RLT Anlagen bei tiefen Temperaturen mit einem großen Umluftanteil betrieben werden. In diesem Betriebsmodus arbeiten sie energetisch günstig, allerdings werden sie dann zu Virenschleudern, da die Viren in der Regel nicht wirksam abgeschieden, sondern von Raum zu Raum geleitet werden. Dieses Problem ist lange bekannt und bedarf keiner weiteren Erläuterung [19, 20, 21, 22, 23, 24]. Der Umluftbetrieb muss daher vermieden werden oder es müssen Filter verwendet werden, die in der Lage sind die Viren zuverlässig abzuscheiden [17]. Oft wird argumentiert, dass die typischerweise in RLT Anlagen verbauten Filter der Klasse F7 oder F9 auch in der Lage sind Aerosolpartikel abzuscheiden. Das ist richtig, aber der Abscheidegrad ist nicht ausreichend. Laut Beschluss der Projektgruppe „Labortechnik“ des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) sind nur Filter der Klasse H14 geeignet um Viren abzuscheiden [25]. Es wäre daher sinnvoll, Filter der Klasse H14 in die RLT Anlagen der modernen Schulen zu integrieren, damit ein sicherer und energetisch günstiger Umluftbetrieb während der kalten Jahreszeit möglich wird. Leider lassen sich bestehende RLT Anlagen nicht so einfach umrüsten, da dann der Volumenstrom abnimmt oder die Anlagen Schaden erleiden. Ob UV-C Strahlung eine sichere Lösung des Problems bieten könnte, muss sich bei den großen Volumenströmen noch erweisen.

Es wird gelegentlich auch argumentiert, dass Luftwechselraten von 6 pro Stunde nicht erforderlich sind und bei Luftwechselraten von 1 – 2 würde die RLT Anlagen auch im Winter mit einem hohen Außenluftanteil funktionieren. Dieser Ansicht muss ausdrücklich widersprochen werden. Luftwechselraten von 1 – 2 sind sicherlich ausreichend, um die CO₂ Anreicherung im Raum zu begrenzen und somit ein konzentriertes Arbeiten der Schülerinnen und Schüler zu ermöglichen. Sie sind aber bei weitem nicht ausreichend, um Schutz vor einem gefährlichen Virus zu bieten [26]. Nicht umsonst werden Räume in Krankenhäusern, in denen infektiöse Patienten liegen, mit Luftwechselraten zwischen 12 und 15 betrieben [26, 27, 28]. In einem Patientenzimmer wird laut DIN 1946-4 ein Mindestluftvolumenstrom von 40+100 m³/(h·Person) je Patient gefordert. Vor diesem Hintergrund anzunehmen, dass die Kinder bei Luftwechselraten von 1 – 2 vor einer indirekten Infektion sicher seien, ist nicht nachvollziehbar und geradezu fahrlässig im Hinblick auf das tödliche Risiko, das mit einer Covid-19 Erkrankung verbunden ist. Infektionen billigend in Kauf zu nehmen führt, aber auch zu hohen Kosten für

das Gesundheitssystem. Die von uns empfohlene Luftwechselrate, die mindestens dem 6-fachen des Raumvolumens pro Stunde entspricht, stellt aus unserer Sicht einen guten Kompromiss zwischen Sicherheit und technischer Machbarkeit dar. Sollte sich erweisen, dass dieser Wert nicht ausreicht, weil z.B. zu viele Menschen infiziert sind, dann muss er weiter angehoben werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Schutzkonzept, das allein auf das freie Lüften vertraut, nur ein Minimum an Sicherheit vor einer Infektion bietet. Das Konzept bietet keinerlei Schutz vor einer direkten Infektion, obwohl diese am wahrscheinlichsten ist. Das ist die größte Schwäche des Konzepts. Das freie Lüften durch dauerhaft geöffnete Fenster oder mit RLT Anlagen, die 100% Außenluft mit einer Luftwechselrate von 6 pro Stunde zuführen, ist während der warmen Jahreszeit sinnvoll, um wenigstens das indirekte Infektionsrisiko zu minimieren. Im Winter ist das freie Lüften aber energetisch ungünstig. Ferner ist zweifelhaft, ob überhaupt die Bereitschaft besteht regelmäßig zu lüften. Ferner ist völlig unklar, wie regelmäßig gelüftet werden muss, da ja die Anzahl der infizierten Personen nicht bekannt ist. RLT Anlagen bieten im Winter keinen energetischen Vorteil, wenn sie mit 100% Außenluftanteil und sechsfacher Luftwechselrate pro Stunde betrieben werden. Wenn sie im Umluftbetrieb laufen, dann kann viel Energie eingespart werden, allerdings werden die Anlagen in diesem Betriebsmodus zu Virenschleudern und gefährden die Sicherheit der Kinder. Das lässt sich nur durch die Integration eines Filters der Klasse H14 verhindern, der die Aerosolpartikel und damit die Viren beim einmaligen Durchströmen der Luft zu 99,995% abscheidet. Alternativ können auch andere Technologien genutzt werden (UV-C, Ionisation,...), aber es muss sichergestellt sein, dass diese Technologien in der Lage sind 99,995% der Viren beim einmaligen Gerätedurchlauf zu inaktivieren. Wird die enorme Energieverschwendung des Konzepts zur Verhinderung von indirekten Infektionen in der kalten Jahreszeit berücksichtigt und die Tatsache, dass jede direkte Infektion, die hier billigend in Kauf genommen wird, mit erheblichen Kosten verbunden ist, dann ist nicht nachvollziehbar, warum dieses unsichere, unangenehme sowie ökonomisch und ökologisch bedenkliche Konzept so viel Unterstützung erfährt in der aktuellen Diskussion.

Schutzkonzept II: Sicherheitsabstände

Ein Vorschlag, der immer wieder gemacht wird, besteht darin, die Abstände zwischen den Kindern im Klassenraum zu vergrößern, um das Infektionsrisiko zu senken. Es besteht kein Zweifel daran, dass eine direkte Infektion über die Atemwege über kurze Distanz zu einer SARS-CoV-2 Infektion führen kann. Es ist auch erwiesen, dass die direkte Infektionswahrscheinlichkeit mit dem Abstand reduziert wird und bei großen Abständen (größer 3 m) faktisch nicht mehr auftreten kann. Große Sicherheitsabstände bieten daher einen sehr wirksamen Fremd- und Eigenschutz vor einer direkten Infektion.

Ein gravierender Nachteil des Schutzkonzepts besteht aber darin, dass in den Klassenräumen praktisch keine ausreichenden Sicherheitsabstände realisiert werden können, da die entsprechenden Räumlichkeiten nicht zur Verfügung stehen. Eine Verdoppelung der Abstände zwischen den Kindern und Jugendlichen in beide Raumrichtungen würde eine Vervierfachung der benötigten Klassenraumfläche erfordern. Der Mangel an Klassenräumen könnte durch einen Schulbetrieb in vier Schichten zwar theoretisch gelöst werden, allerdings fehlen dafür die Lehrkräfte und deren Ausbildung und Einstellung wäre mit immensen Kosten verbunden.

Ein weiterer wesentlicher Nachteil des Konzepts besteht darin, dass Abstände alleine in einem geschlossenen Raum keine Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion gewährleisten können. Da die Virenlast in einem Raum mit der Anzahl der infizierten Personen und deren Aufenthaltsdauer und Aktivität abhängt, müssen zusätzlich Maßnahmen ergriffen werden, um die Virenlast in der Raumluft zu begrenzen, da sonst indirekte Infektionen auftreten können.

Der indirekten Infektionsgefahr kann durch das freie Lüften oder RLT Anlagen in der warmen Jahreszeit begegnet werden, wie bereits ausgeführt, da alle Fenster weit geöffnet werden können oder die RLT Anlage mit 100% Außenluft und einer Luftwechselrate von mindestens 6 pro Stunde betrieben werden können. Auf die Probleme während der kalten Jahreszeit wurde bereits ausführlich eingegangen.

Es lässt sich daher feststellen, dass das Konzept der Sicherheitsabstände weder sicher, noch praktisch umsetzbar und schon gar nicht finanzierbar ist. Die Notwendigkeit des freien Lüftens lässt das Konzept auch aus ökonomischer und ökologischer Perspektive als nachteilig erscheinen während der kalten Jahreszeit. Die einzige Möglichkeit, dieses Konzept zu realisieren besteht darin, die Schülerinnen und Schüler häuslich zu beschulen. Dieser Weg ist aber aus mehreren Gründen nicht empfehlenswert. Einerseits vermittelt die Schule nicht nur Bildung, sondern sie leistet auch einen sehr großen Beitrag, um die Kinder gesellschaftsfähig zu machen. Eine online Beschulung oder Unterricht durch die Eltern kann das nicht leisten. Ferner ist die Beschulung durch die Eltern höchst ineffizient. Einerseits sind sie in der Regel keine Pädagogen, die wirklich zu einer Stoffvermittlung befähigt sind. Darüber hinaus verfügen nicht alle Eltern über das nötige Fachwissen. Dies würde zu einer großen Bildungsungerechtigkeit führen. Zu berücksichtigen ist aber auch, dass viele Eltern bereits durch ihren Beruf oder familiäre Tätigkeiten ausgelastet sind. Jetzt diese wertvolle Arbeitsleistung abzuziehen, um die Kinder im Einzelunterricht zu unterrichten, ist nicht nur aufgrund der nötigen Einarbeitung in den Lehrstoff und der schlechteren Stoffvermittlung höchst ineffizient und daher ökonomisch nachteilig. Bedenkt man zusätzlich, dass in der Schule eine Lehrkraft 20 – 30 Kinder unterrichtet, dann ist es bestimmt nicht sinnvoll zu einem System überzugehen, bei dem das Verhältnis 1:1 ist. Ein häusliches Schutzkonzept kann zwar eine hohe Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion bieten, aber die Nachteile für die Kinder, die Eltern, die Wirtschaft und die Gesellschaft sind viel zu groß.

Schutzkonzept III: Nutzung von FFP2/3 Masken im Unterricht

Eine direkte und indirekte Infizierung kann mit Hilfe von hochwertigen partikelfiltrierenden Atemschutzmasken (FFP2/3 oder besser) wirksam verhindert werden, da diese Atemschutzmasken Tröpfchen und Aerosolpartikel beim Ein- und Ausatmen bis zu einer festgelegten Größenklasse zuverlässig abscheiden, wenn sie fest und dicht am Gesicht anliegen [29, 30]. Werden diese Masken ohne Auslassventil verwendet, dann sind keine großen Sicherheitsabstände zwischen Personen erforderlich, um eine direkte Infektion zu verhindern. Darüber hinaus muss nichts unternommen werden, um indirekte Infektionen durch eine erhöhte Virenlast im Raum zu unterbinden, da partikelfiltrierende Atemschutzmasken auch vor diesem Übertragungsweg sicher schützen [29, 30].

Die Schutzfunktion dieser Masken wird gelegentlich angezweifelt, weil sie nicht 100% dicht sind. Fakt ist, dass partikelfiltrierende Atemschutzmasken zum Arbeitsschutz in Krankenhäusern, Laboratorien, Isolierstationen, OP-Sälen und sehr vielen technischen Arbeitsbereichen gehören, in denen mit Feinstaub und gesundheitsschädlichen Stoffen

gearbeitet wird (z.B. Schleifen, Schweißen, Löten). Das Argument, dass die SARS-CoV-2 Viren nicht zuverlässig abgeschieden werden könnten, weil die Viren kleiner als $0,16 \mu\text{m}$ sind, ist auch nicht richtig, denn SARS-CoV-2 wird ja über Tröpfchen oder Tröpfchenkerne übertragen und diese sind deutlich größer als einzelne Viren und können von geeigneten partikelfiltrierenden Masken recht zuverlässig abgeschieden werden [30]. Es ist auch zu berücksichtigen, dass ganz kleine Aerosolpartikel oft keine Viren tragen und selbst wenn sie ein Virus mit sich führen, müssten sehr viele dieser sehr kleinen Aerosolpartikel eingeatmet werden, um eine Infektion hervorzurufen [31]. Schätzungen gehen davon aus, dass eine Dosis von mindestens 500 – 2000 Viren erforderlich ist, um eine SARS-CoV-2 Infektion auszulösen [11, 12]. Würden in einem Klassenraum alle Personen diese Masken tragen, dann gebe es einen doppelten Schutz. Einerseits werden kaum Viren von einer infizierten Person in die Raumluft gelangen. Andererseits könnten die wenigen Viren, die es in die Raumluft schaffen, kaum die Maskenbarriere einer nicht infizierten Person überwinden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieses Schutzkonzept ein sehr hohes Maß an Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion bietet.

Ein wesentlicher Nachteil der partikelfiltrierenden Masken ohne Ventil besteht darin, dass sie die Atmung erschweren und das Tragen kann auf Dauer unangenehm sein. Um eine Überbeanspruchung der Träger zu verhindern, sollten sie nur für maximal 3×75 Minuten am Tag getragen werden, wobei alle 75 Minuten eine Tragepause von mindestens 30 Minuten empfohlen wird [32]. Für Schulen sind sie daher kaum geeignet, um dauerhaft Schutz zu bieten.

Es ist aber auch zu berücksichtigen, dass diese Masken nicht nur die Atmung erschweren und teilweise unbequem sind, sondern dass sie auf Dauer auch nennenswerte Kosten verursachen. Verwendet eine Schulklasse mit 25 Kindern täglich FFP2/3 Atemschutzmasken für einen Stückpreis von 4 Euro, dann ergäbe sich bei 200 Schultagen im Jahr eine Summe von 20000 Euro pro Klasse und Jahr oder 800 Euro pro Kind im Jahr. Neben diesen Kosten ist noch zu berücksichtigen, dass die Masken viel Müll produzieren, dessen Verarbeitung weitere Kosten verursacht.

Es bleibt festzustellen, dass fest und dicht am Gesicht anliegende FFP2/3 Atemschutzmasken zwar einen sehr guten Schutz vor einer direkten und indirekten Infektion bieten, aber das dauerhafte Tragen wirkt sich nachteilig auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Trägerinnen und Träger aus. Daher ist das Konzept nicht wirklich umsetzbar. Ferner ist das Tragen von Atemschutzmasken weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Es muss aber betont werden, dass diese Atemschutzmasken unbedingt getragen werden müssen, sobald die Kinder ihren Platz verlassen und durch die Klasse oder Schule gehen oder morgens oder nach der Pause zu ihrem Platz gehen. Die Tragedauer ist dann minimal und der mobile Schutz vor einer Tröpfchen- und Aerosolpartikelinfektion maximal.

Schutzkonzept IV: Raumluftreiniger + Mund-Nasen-Bedeckung / Gesichtsvisioner

Aktuell werden vermehrt Konzepte diskutiert, die Raumluftreiniger oder Entkeimungsgeräte zum Schutz vor einer indirekten Infektion nutzen und individuelle Schutzvorkehrungen vorsehen, um den direkten Infektionspfad zu verhindern. Raumluftreiniger mit Filtern der Klasse H14 und Entkeimungsgeräte mit elektrostatischer Filterung, UV-C und Ionisationseinheit wurden in zwei Studien analysiert, um deren Wirksamkeit zu überprüfen [33, 34]. Das wesentliche Ergebnis der Studie ist, dass die Virenlast im Raum sehr schnell

abgebaut wird und die Verweildauer der Viren nach der Freisetzung kurz ist, wenn drei Kriterien erfüllt sind:

1. Der Volumenstrom der Geräte muss mindestens dem sechsfachen des Raumvolumens pro Stunde entsprechen. Für einen 80m² großen Raum mit einem Volumen von 200 m³ muss das Gerät folglich mindestens 1200 m³/h leisten. Geringe Luftwechselraten mögen ausreichen, um weitgehend gefahrlose Kontaminationen wie CO₂, Pollen oder Feinstaub aus der Raumluft zu beseitigen, aber für die schnelle und sichere Entfernung gefährlicher Viren sind deutlich höhere Luftwechselraten erforderlich. Eine Luftwechselrate vom sechsfachen des Raumvolumens pro Stunde stellt bereits ein Kompromiss zwischen Sicherheit und technischer Realisierbarkeit dar. In Krankenhäusern oder Laboratorien, in denen die Raumluft mit gefährlichen Viren kontaminiert ist, werden üblicherweise Luftwechselraten von 12 – 15 gefordert [26, 27, 28]. Wenn sich herausstellt, dass eine Luftwechselrate von 6 pro Stunde nicht ausreichen sollte, weil z.B. die Anzahl der Infizierten pro Raum im Mittel groß ist, dann müssen höhere Luftwechselraten umgesetzt werden. Es ist auch zu bedenken, dass die am Gerät gewählte Luftwechselrate nur dann der tatsächlichen Luftwechselrate entspricht, wenn eine gute Luftdurchmischung im Raum vorhanden ist.
2. Der Filter muss bei dem benötigten Volumenstrom eine Filterleistung nach der EN 1822-1 aufweisen, um 99,995% der Aerosolpartikel ab einem Durchmesser von 0,1 – 0,3 µm abzuscheiden oder die Viren müssen mit dieser Effektivität beim einmaligen Durchlauf durch das Gerät mittels UV Strahlung oder elektrischen Ladungen inaktiviert werden. Die beim Atmen, Sprechen, Singen und Husten erzeugten Tröpfchen und die sich daraus durch Verdunstung bildenden Tröpfchenkerne sind nur bis zu wenigen Mikrometern groß und daher können sie nur mit wirklich hochwertigen Filtern der Klasse H14 nahezu vollständig und effizient abgeschieden werden [25]. Das Argument, dass dieser Abscheidegrad auch mit einem einfachen Filter durch Mehrfachfilterung erreicht werden kann, konnte in früheren Versuchen nicht bestätigt werden [33]. Dieses Argument ist aber auch nicht zielführend, da dieser Ansatz eine Verdoppelung oder sogar Vervielfachung der geforderten Luftwechselrate erfordern würde, um eine vergleichbare Sicherheit vor einer Infektion zu erreichen, wie sie mit einem Filter der Klasse H14 beim einmaligen Durchströmen erreicht wird. Das ist technisch kaum realisierbar und die Behaglichkeit im Raum würde unter dem Lärm und dem Luftzug leiden.
3. Das Gerät muss hinreichend geräuscharm sein, damit es im Betrieb nicht stört. Stört der Lärm, dann besteht die Gefahr, dass das Gerät ganz abgeschaltet oder nicht mit dem erforderlichen Volumenstrom betrieben wird. Eine hohe Sicherheit vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion ist dann nicht gegeben. Die Lautstärke der Geräte ist in der Regel abhängig von deren Größe. Geräte mit großen Lüftern sind leise und kleine Geräte mit hohen Drehzahlen sind bei gleichem Volumenstrom laut.

Kleine und günstige Geräte erfüllen diese drei Forderungen in der Regel nicht. Daher können die meisten dieser Geräte auch keine hohe Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion bieten. Vermeidliche Qualitätssiegel, die viele günstigen und kompakten Geräte aufweisen, wie HEPA Filter, suggerieren zwar Sicherheit, bieten sie aber nicht, denn es kommt auf die Filterklasse nach dem Filterstandard EN 1822-1 an. Zertifikaten mit kryptischen Schriftzeichen sollte nicht vertraut werden und Beteuerungen, dass ausländische Zertifizierungen oder andere Vorschriften dem EN 1822-1 Standard entsprechen, sollte keinen Glauben geschenkt werden. Namhafte Hersteller mögen vertrauenswürdig erscheinen, aber letztlich kommt es auf die

technischen Daten des Gerätes an und nicht auf den Ruf des Herstellers. Wichtig ist, dass beim Kauf solcher Geräte unbedingt auf die drei zuvor genannten Kriterien geachtet wird. Nur wenn die drei Kriterien erfüllt sind, bieten die Geräte einen sehr guten Schutz vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion in Schulen und anderen Umgebungen. Ob die Angaben in den Datenblättern stimmen, ist allerdings nicht nachprüfbar.

Ein wesentlicher Vorteil der Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte besteht darin, dass sie dauerhaft für eine geringe Virenlast im Raum sorgen, ohne sich um das Öffnen von Fenstern kümmern zu müssen und ohne, dass sie das Wohlbefinden im Raum beeinträchtigen. Ferner sorgen sie im Gegensatz zur freien Lüftung mit Fenstern auch dafür, dass eine wirkliche Reduzierung oder Inaktivierung der Virenlast erfolgt, was durch geöffnete Fenster oft nicht gewährleistet werden kann. Sie bieten auch gegenüber fest in Gebäuden integrierten RLT Anlagen, die ohne oder mit einem geringen Außenluftanteil betrieben werden, den Vorteil, dass die Viren wirklich abgeschieden oder inaktiviert werden und nicht über Lüftungsschächte im Gebäude verteilt werden. Gelegentlich wird der Vorwurf erhoben, dass die Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte „Virenschleudern“ darstellen. Das trifft auf einfache Geräte mit schlechten Filtern sicherlich zu. Geräte mit Filtern der Klasse H14 können aber keine Virenschleudern sein, denn der Filter scheidet ja nahezu alle Aerosolpartikel ab. Die Annahme, dass der Filter durchlässig ist für Viren oder dass sich Teile vom Filter ablösen, sind schlichte Unterstellungen, denn der Filter wäre kein Filter, wenn er die Aerosolpartikel, Viren, Bakterien, Pollen und den Feinstaub nicht sicher abscheiden könnte. Daher werden diese Filter ja auch in Krankenhäusern und Laboratorien eingesetzt. In dem Beschluss 16/2010 des ABAS vom 02.12.2010 steht unmissverständlich die Forderung zur Abscheidung von Viren: *„Die HEPA-Filter sollten mindestens der Klasse H14 nach DIN EN 1822-1 entsprechen. Auf Grundlage der Gefährdungsbeurteilung können beim Vorliegen besonderer Gründe, wie z.B. bei ausschließlich bakteriologischen Arbeiten, auch H13-Filter in Frage kommen“* [25].

Als Ergebnis der wissenschaftlichen Untersuchungen [33, 34] steht fest, dass Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte mit einem Volumenstrom pro Stunde, der mindestens dem sechsfachen des Raumvolumens entspricht, und hochwertigen Filtern der Klasse H14 eine sehr sinnvolle technische Lösung darstellen, um in Klassenzimmern die indirekte Infektionsgefahr durch Aerosole stark zu verringern. Sie können auch in Gebäuden mit leistungsschwachen RLT Anlagen unterstützend eingesetzt werden. Auch im Winter, wenn die RLT Anlagen keine großen Volumenströme mit Außenluft realisieren können, können Raumlufreiniger und geeignete Entkeimungsgeräte ergänzend eingesetzt werden, um die gewünscht Sicherheit vor einer indirekten Infektion zu gewährleisten. Bei der Aufstellung der Geräte ist lediglich darauf zu achten, dass der Ansaugbereich des Gerätes nicht zugestellt wird und die Decke möglichst eben ist, so dass eine gute Luftausbreitung gewährleistet werden kann [33].

Es ist aber zu beachten, dass Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte nur geeignet sind, das indirekte Infektionsrisiko zu minimieren. Daher müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um auch das direkte Infektionsrisiko zu verhindern. Für die Verhinderung direkter Infektionen bieten sich Mund-Nasen-Bedeckungen, OP Masken oder transparente Gesichtsvisiere an. Diese Vorkehrungen bewirken, dass die Ausbreitung der ausgeatmeten Luft nach vorne stark begrenzt wird [29, 31]. Daher bieten sie beim Gespräch von Angesicht zu Angesicht einen guten Fremdschutz, selbst wenn dabei gehustet wird. Es ist allerdings zu bedenken, dass diese technischen Hilfsmittel die Aerosolpartikel nicht nennenswert aus der

Atemluft herausfiltern, weil einerseits die Filterwirkung des Materials zu schlecht ist und andererseits, weil die Masken nicht fest genug oder überhaupt nicht mit dem Gesicht abschließen. Da die Strömung im Wesentlichen den Weg des geringsten Widerstands folgt, tritt die Luft beim Atmen primär durch die Spalte am Maskenrand ein und aus. Bei der Mund-Nasen-Bedeckung ist das zur Seite und damit zum Sitznachbarn [30]. Daher bieten Mund-Nasen-Bedeckungen in der Klassenraumsituation weder einen nennenswerten Fremd- noch einen Eigenschutz. Folglich ist diese Schutzmethode nicht empfehlenswert, wenn Personen über längere Zeit direkt neben einander sitzen.

Mund-Nasen-Bedeckungen und OP Masken sind aber nicht nur aufgrund des seitlichen Austretens der Atemluft unsicher, sondern auch weil sie selten richtig aufgesetzt werden. Oft ist in der Praxis die Nase nicht bedeckt und die Spalte am Gesicht sind viel zu groß. Darüber hinaus werden sie beim längerem Tragen als lästig empfunden, weil das Material oft juckt oder drückt und bei Feuchtigkeit unangenehm ist. Diese Reizungen und Komfortnachteile können nicht nur das Wohlbefinden vermindern, sondern auch die Aufmerksamkeit für das Unterrichtsgeschehen.

Bei einem Gesichtsvisier wird die Atemluft primär nach unten und teilweise nach oben umgelenkt. Das ist unter Berücksichtigung der Sitzanordnung in den Klassenräumen als sicherer zu bewerten als ein seitliches Austreten der Atemluft. Kürzlich wurden in einer Veröffentlichung die Gesichtsvisier als unsicher bewertet, weil die Atemluft trotz des Gesichtsvisiers nennenswert nach vorne austrat [35]. Es ist allerdings zu betonen, dass die Gesichtsvisier während der Experimente stark nach vorne geneigt waren und daher nicht korrekt aufgesetzt wurden. Die Gesichtsvisier haben auch den großen Vorteil gegenüber Mund-Nasen-Bedeckungen und OP Masken, dass sie angenehmer zu tragen sind und die Gesichtsmimik sichtbar ist. Trotzdem sind Gesichtsvisier im Unterrichtsbetrieb unpraktisch, da sie das Neigen des Kopfes behindern. Dadurch wird die Bewegungsfreiheit am Platz eingeschränkt und gerade beim Schreiben kann es zu Behinderungen durch das Gesichtsvisier kommen. Daher kann auch dieses Schutzkonzept zwar als sicherer eingestuft werden als Schutzkonzept I und es ist trotz der Investitionskosten für den Raumlufreiniger von 2000 bis 4000 Euro und der Gesichtsvisier auch günstiger als die anderen Konzepte, weil die Zahl der direkten Infektionen vermindert wird, verglichen mit dem Schutzkonzept I, keine Energie durch Fenster oder RLT Anlagen verschwendet wird, wie bei Schutzkonzept I und II und weil auch keine teuren Masken zu beschaffen sind, wie im Falle des Schutzkonzeptes III. Aber eine wirkliche Normalität des Schulbetriebs kann auch mit diesem Konzept nicht auf Dauer hergestellt werden, weil die Nutzung der Gesichtsvisier zu sehr einschränkt und behindert.

Schutzkonzept V: Raumlufreiniger + transparente Schutzwände

Wenig Beachtung hat bislang ein Konzept gefunden, dass die indirekte Infektion mit einem Raumlufreiniger oder Entkeimungsgerät minimiert und die direkte Infektion zwischen benachbarten Kindern über transparente Zwischenwände realisiert, die sich einfach am Tisch montieren lassen. Die Vorzüge der Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte wurden bereits ausführlich geschildert. Auch die Nachteile, die sich ergeben, wenn bei der Anschaffung nicht auf die drei wichtigen Kriterien geachtet wird, wurden klar benannt. Eine Frage, die bleibt, ist, ob diese Raumlufreiniger auch das indirekte Infektionsrisiko wirksam begrenzen können, wenn die Klassenräume mit Tischen und Stühlen, Personen mit Rucksäcken etc. aufgefüllt sind. Nur wenn dies gewährleistet ist, können Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte einen

sinnvollen Beitrag zum Infektionsschutz in Schulen leisten. Ferner ist die Frage, wie der direkte Infektionsschutz im Unterricht realisiert werden kann ohne die geschilderten Nachteile von Mund-Nasen-Bedeckungen, OP Masken und Gesichtsvisieren.

Den wirksamsten Schutz vor einer direkten Infektion bieten feste Trennwände zwischen benachbarten Personen, da sie für Aerosolpartikel und Viren völlig undurchlässig sind. Wenn diese Trennwände ausreichend groß dimensioniert sind, dann ist es auch sehr unwahrscheinlich, dass die ausgeatmete Luft aufsteigt, über die Begrenzung strömt und dann am Nachbarplatz niedersinkt. Somit bieten Trennwände den bestmöglichen Schutz zwischen benachbarten Personen im Klassenzimmer. Die Tischnachbarn können sich durch die Schutzwand beliebig nahekomen und auch direkt unterhalten und anhusten ohne sich zu infizieren. Ferner stören die Zwischenwände die Arbeitsweise der Schülerinnen und Schüler nicht, die Mimik ist sichtbar und der Raum ist vollständig einsehbar, sofern die Schutzwände aus transparentem Plexiglas ausgeführt werden. Werden die Trennwände gut dimensioniert und ausgeführt, dann stellen sie auch im Brandfall kein Problem dar, weil die Fluchtmöglichkeit kaum eingeschränkt wird.

Ein Nachteil dieser Wände besteht darin, dass beim direkten Gespräch zwischen den Tischnachbarn von Angesicht zu Angesicht die Luftströmung längs der Wand strömt, am Ende ablöst und dann weiter auf die nächste Sitzreihe zuströmt. Durch eine Aufstellung der Tische in Form eines U lässt sich das Problem vollständig beheben. Aber was ist, wenn der Platz im Klassenraum für diese Anordnung nicht ausreicht? Wenn die transparente Trennwand mit einer umlaufenden Kannte versehen wird, die ca. 30 mm auf beiden Seiten übersteht, dann wird die sich entlang der Wand ausbreitende Luft durch diese Begrenzung um 90° umgelenkt und es bildet sich ein Wirbel, der an der Position verbleibt, bis er vom Raumlufreiniger angesaugt wird. Diese einfache Schutzvorkehrung kann das Infektionsrisiko auch für die Personen auf den benachbarten Sitzreihen vermindern. Zusätzlich sollte der Abstand zwischen den Sitzreihen maximiert werden, so dass auch in Blickrichtung zur Lehrkraft nicht die Personen in den vorderen Reihen einem erhöhten Infektionsrisiko ausgesetzt werden.

Das Schutzkonzept, bestehend aus Raumlufreiniger plus Schutzwand, erscheint aussichtsreich, da es Sicherheit vor einer direkten und indirekten Infektion verspricht, ohne dass die Kinder während des Unterrichts lästige Masken tragen müssen. Masken sind nur dann erforderlich, wenn die Kinder ihren Platz verlassen und durch die Schule gehen. Die Mimik der Kinder und Jugendlichen wäre somit im Unterricht erkennbar und der Raum erscheint transparent. Durch dieses Konzept werden aber auch Allergiker weniger Beschwerden haben, da auch Pollen und Feinstaub abgeschieden werden und eine Infektion mit anderen Infektionskrankheiten wird ebenfalls reduziert. Die Anschaffungs- und Betriebskosten sind vergleichsweise gering und es wird keine Energie verschwendet oder Müll produziert, so dass dieses Konzept auch aus ökonomischer und ökologischer Perspektive vorteilhaft ist. Ferner lässt sich das Konzept leicht umsetzen und es schafft eine hohe Sicherheit ohne menschlichen Einsatz. Da es in Deutschland viele Produzenten solcher Geräte gibt, kann davon ausgegangen werden, dass die Geräte auch in großen Stückzahlen verfügbar sind. Darüber hinaus würde eine Nutzung dieser Geräte nicht nur für Sicherheit in den Klassenräumen und Büros sorgen, sondern auch Arbeitsplätze in Deutschland sichern. Wenn sich die Technologie in unseren Schulen bewährt, dann ist es wahrscheinlich, dass auch andere Länder diesen Weg nachahmen und die Technologie vielleicht sogar in Deutschland kaufen. Die positiven Aspekte für die Wirtschaft und Beschäftigung sind offensichtlich. Da

dieses Konzept aber weit weniger analysiert wurde als die anderen Schutzkonzepte, muss für eine abschließende Bewertung zunächst die Wirksamkeit der Schutzeinrichtungen in einer generischen Klassenraumsituation nachgewiesen werden.

4. Versuchsaufbau und Durchführung der Konzentrationsmessungen

Um das Schutzkonzept, bestehend aus Raumlufreiniger und Schutztrennwand, für den Schulbetrieb zu qualifizieren, wurde ein 80 m² großer generischer Klassenraum mit einem Raumvolumen von 200 m³ und 24 Sitzplätzen mit Tischen aufgebaut. Die Anordnung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

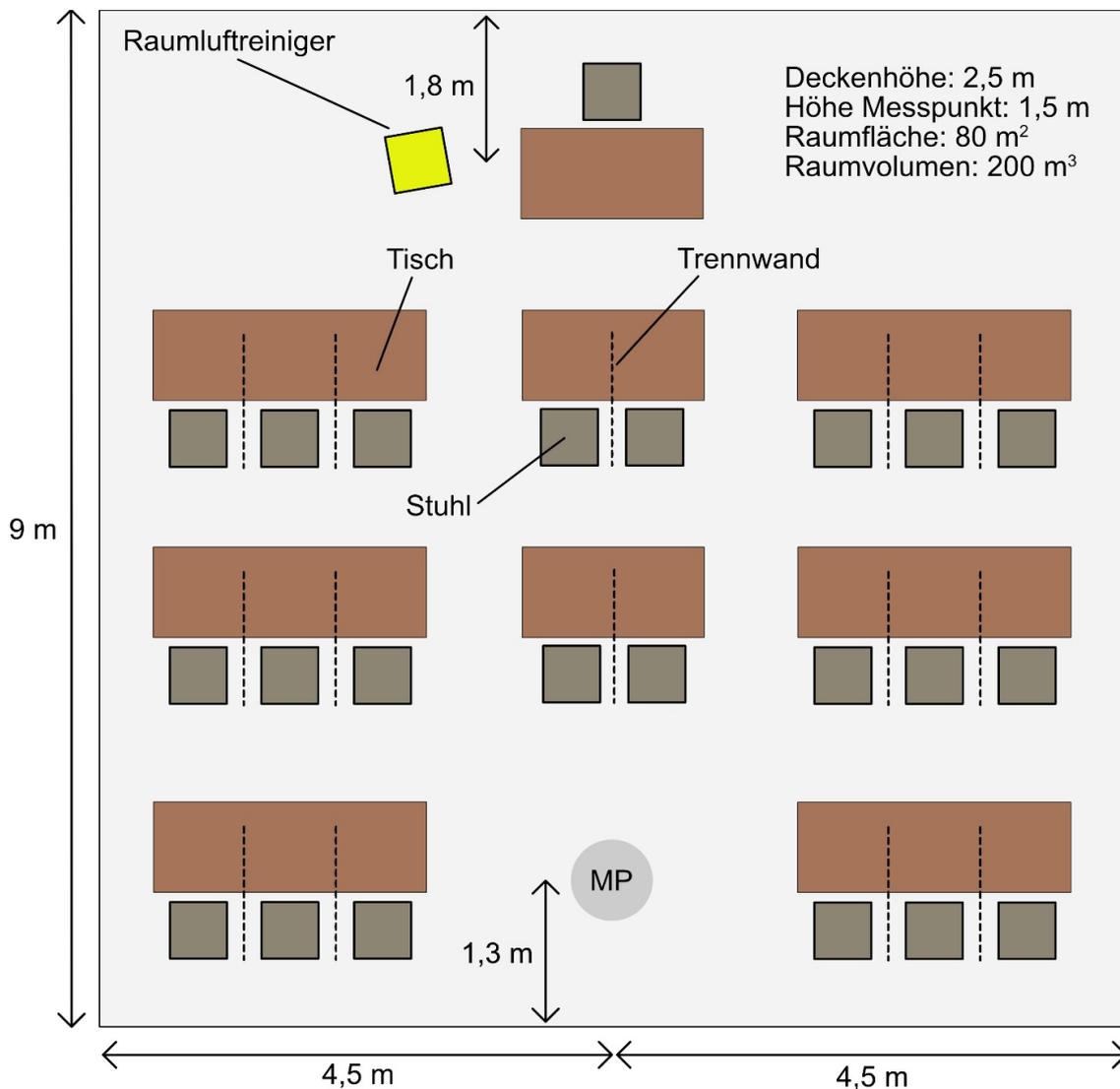


Abbildung 1: Anordnung der Komponenten im Raum für die Konzentrationsmessungen

Zwei der Sitzplätze sind nicht ausgeführt, da dort das Laser Messsystem installiert wurde, um die Konzentration der Aerosolpartikel zu bestimmen. Da die Abnahme der Aerosolkonzentration im Raum gemäß [33, 34] nur sehr geringfügig von der Position abhängt,

wurde für die Untersuchungen nur ein Messgerät verwendet. Zusätzlich wurde aber noch in den Ecken des Raumes die Partikelanzahl mit einem Analysator bestimmt, um nachzuweisen, dass die Partikelkonzentration im Raum homogen ist.

Der Raumlufreiniger (TROTEC TAC V+) wurde dicht am Pulttisch positioniert und mit einem Volumenstrom von 1200 m³/h betrieben, um eine nominelle Luftwechselrate von 6 pro Stunde zu erreichen. Die tatsächliche Luftwechselrate kann niedriger sein, wenn die Raumluf sehr ruhig ist. Ferner wurde eine Messung mit ausgeschaltetem Raumlufreiniger als Referenz analysiert (0 m³/h) und ein Vergleichsfall mit 1000 m³/h. Darüber hinaus wurde zum Vergleich analysiert, wie schnell die Konzentration abnimmt, wenn nur eine 2,05 m hohe und 0,89 m breite Tür maximal geöffnet wird. Diese Messung verdeutlicht, wie effektiv die freie Lüftung funktioniert wenn der Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen gering ist und vor der Tür kein Wind weht. Neben der Konzentrationsmessung wurde auch der CO₂ Gehalt in der Luft, die Temperatur und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Während der Versuche, mit 13 Personen im Raum, ist die Temperatur um ca. 1°C gestiegen und die CO₂ Konzentration von 0,08% auf 1,7%.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Aerosolpartikelanzahl im Messvolumen kann die Abklingkonstante, die Halbwertszeit und die mittlere Verweilzeit der Aerosolpartikel im Raum ermittelt werden [13, 14]. Der Wert der Abklingkonstante entspricht theoretisch genau der Luftwechselrate. Die Halbwertszeit ist ein Maß dafür, wie lange es dauert, bis sich die Anzahl der Aerosolpartikel an der betrachteten Messposition um 50% reduziert hat. Die mittlere Verweildauer ist die Zeit, die die freigesetzten Aerosolpartikel im Mittel benötigen, um von der jeweiligen Messposition bis zum Abscheidungsort im Entkeimungsgerät zu gelangen. Aufgrund des großen Abstandes zwischen Raumlufreiniger und Messsystem, ist der gemessene Wert nahe am Maximalwert, d.h. die Konzentrationen wurden am ungünstigsten Ort gemessen. Je geringer der Abstand der Personen, umso geringer wird auch die Verweilzeit der freigesetzten Aerosolpartikel im Raum sein, bis sie abgeschieden oder die Viren inaktiviert werden.

Zur Ermittlung der zeitlichen Abnahme der Aerosolpartikel in der Raumluf wurde der Raum zunächst homogen mit sehr langlebigen Di-2-ethylhexyl-sebacat (DEHS) Aerosolpartikeln mit einer Größenverteilung zwischen 0,1 – 2 µm und einem mittleren Durchmesser von ca. 1 µm vernebelt [36]. Die Größenverteilung der Aerosolpartikel ist vergleichbar mit den beim Atmen, Sprechen und Singen emittierten Aerosolpartikeln [37, 38, 39]. Die Aerosolpartikel wurden mit einem Litron Nano L 200-15 PIV Nd:YAG Doppelpuls laser beleuchtet und mit einer PCO.edge 5.5 sCMOS Kamera mit 50 mm Zeiss Objektiv digital gespeichert. Die Kamera und der Laser wurden mit der Software DAVIS von LaVision zentral angesteuert. Die Aufnahme rate betrug bei den Messungen 1 Hz. Die Anzahl der Partikelbilder auf dem Sensor entspricht der Anzahl der Aerosolpartikel im beleuchteten Messvolumen. Wird für die Messung der Raumlufreiniger eingeschaltet, dann ergibt sich als Ergebnis der Messungen die Anzahl der Aerosolpartikel im Messvolumen in Abhängigkeit von der Zeit. Abbildung 2 (links) zeigt in einer verzerrten Panoramaaufnahme die Versuchsanordnung.



Abbildung 2: Optisch verzerrte Panoramaaufnahme des Versuchsraumes (links) und eine Detailaufnahme der transparenten Trennwand mit umlaufender Kante (rechts). Die anderen Trennwände wurden baugleich aus Holz gefertigt, wie links im Bild zu erkennen.

Für die Analyse wurden drei unterschiedliche Raumsituationen betrachtet.

1. Klassenraum ohne Personen
2. Klassenraum mit 13 erwachsenen Personen, Taschen und Rucksäcken
3. Klassenraum mit 11 erwachsenen Personen, Taschen und Rucksäcken sowie Trennwänden zwischen benachbarten Plätzen an einem Tisch.

Die Anzahl der Personen im Raum war aufgrund der Sicherheitsbestimmungen der Universität der Bundeswehr München begrenzt. Die Trennwände haben eine Größe von 1,2 m × 0,8 m. Das besondere an den Trennwänden ist eine umlaufende Kante, die beidseitig ca. 30 mm übersteht, siehe Abbildung 2 (rechts). Diese Kante hat eine sehr wichtige Schutzfunktion. Wird gegen die Trennwand gesprochen, gepustet oder gehustet, dann wird die Luftströmung an der Wand umgelenkt und sie breitet sich dann zunächst tangential entlang der Wand aus. Befindet sich am Rand der Wand keine Begrenzung, dann strömt die Luft einfach weiter über den Rand hinaus und kann Personen in den davor- oder dahinterliegenden Sitzreihen erreichen, sofern sie schnell genug strömt. Wird hingegen die umlaufende Kante verwendet, dann lenkt diese die Luftströmung um und es entsteht ein Wirbel am Trennwandrand, der dort verbleibt bis er aufgrund von Reibungseffekten an dem Ort dissipiert ist. Die Aerosolpartikel können folglich nicht die benachbarten Sitzreihen erreichen. Ferner wird die Verdünnung durch den Wirbel befördert und damit die lokale Abnahme der Virenlast.

Damit sich die Trennwände gut aufstellen lassen, wurden sie mit einem geschlitzten Fuß gehalten, der mit doppelseitigem Klebeband und einer kleinen Schraubzwinde am Tisch befestigt wurde. Der Fuß wurde bis zum anderen Tischrand ausgedehnt, damit dort eine kleine Schraubzwinde zur Fixierung angebracht werden konnte, an der sich die Kinder nicht die Beine stoßen können. Die Schutzwand ragt ca. 0,6 m hinter dem Tischende hinaus, damit die Schutzwand die Kinder auch dann sicher vor einer direkten Infektion schützt, wenn sie sich zurücklehnen oder leicht mit dem Stuhl kippeln und dabei unterhalten.

Experimente mit homogener Aerosolpartikelverteilung im Raum

Abbildung 3 (links) zeigt die Abnahme der gemessenen Konzentration in Abhängigkeit von der Zeit in normierter Darstellung. Der Verlauf der Referenzmessung (0 m³/h) verdeutlicht (schwarze Punkte), dass die Aerosolkonzentration im Raum kaum abnimmt, wenn der Raumlüfter nicht betrieben wird. Infektiöse Aerosolpartikel im Raum können somit zu einer großen Gefahr werden, da die kleinen Aerosolpartikel kaum an den Wänden und dem Boden abgeschieden werden.

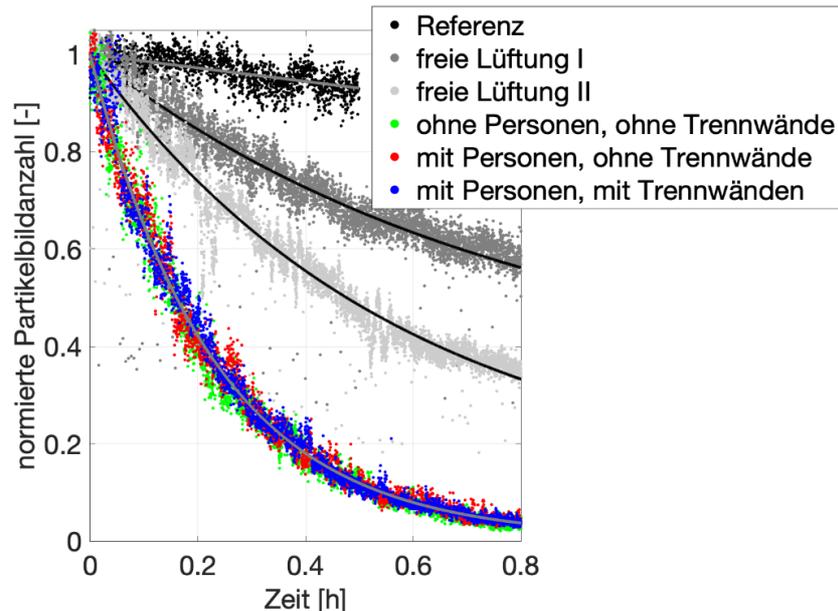


Abbildung 3: Abnahme der Aerosolpartikelkonzentration mit der Zeit für verschiedene Konfigurationen und freier Lüftung

Wird die Referenzmessung wiederholt und dabei die Tür weit geöffnet, dann ergeben sich die in Abbildung 3 (graue Punkte) dargestellten Verläufe. Damit ist klar, dass die freie Lüftung in der Lage ist die Virenlast im Raum grundsätzlich zu reduzieren, allerdings dauert es unter diesen Bedingungen rund 30 Minuten, bis die Virenlast halbiert ist. Ferner variiert die Reduktion selbst bei kleinen Änderungen in den Temperaturunterschieden recht stark, wie der Vergleich der beiden grauen Kurvenverläufe verdeutlicht. Der Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen betrug weniger als 1,5 °C und die Windgeschwindigkeit vor der Tür war vernachlässigbar. Daher ist die geringe Luftwechselzahl von 1,27 bzw. 1,75 pro Stunde nicht verwunderlich. Die quantitativen Messergebnisse zeigen zweifelsfrei, dass die Methode des freien Lüftens, wie sie an vielen Schulen praktiziert wird, ihre Grenzen hat. Um mit der Methode der freien Lüftung eine Luftwechselzahl von 6 pro Stunde zu realisieren, müssten bei diesen Temperaturunterschieden und Windbedingungen mindestens 3,5 bzw. 2,5 Türen der genannten Größe in dem Raum dauerhaft geöffnet sein. Es ist fraglich, ob Klassenzimmer über derart große Fensteröffnungen verfügen. Es ist auch zu berücksichtigen, dass sich die Außen- und Raumtemperatur immer weiter angleichen und daher eine große Luftwechselzahl in der Praxis nicht dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Aufgrund der unzureichenden Wirksamkeit der freien Lüftung halten wir Sicherheitskonzepte, die allein auf dem freien Lüften beruhen, für nicht sicher.

Die Behauptung mancher RLT Anlagenbauer, dass eine Luftwechselrate von 1 – 2 ausreichend sein soll, um die Kinder in dem Klassenzimmer vor einer indirekten Infektion zu schützen, obwohl in Räumen mit gefährlichen Viren Luftwechselraten von 12 – 15 gefordert werden, haben wir schon als fahrlässig bezeichnet. Anhand der Ergebnisse kann jetzt aber sehr gut illustriert werden wie stark die Virenkonzentration im Raum tatsächlich abnehmen würde, wenn man dieser Empfehlung folgt. Nach einer Stunde ist in diesem Fall die tatsächliche Abnahme der Virenlast gerade mal 75%. Es kann wohl kaum behauptet werden, dass diese geringe Abnahme der Virenkonzentration für Sicherheit vor einer indirekten Infektion sorgen kann. Geht man davon aus, dass die RLT Anlagen im Winter mit einem sehr geringen Außenluftanteil betrieben werden und der Abscheidegrad der integrierten Filter der Klasse F7 oder F9 deutlich schlechter ist als der eines Filters der Klasse H14, dann ist klar, dass in diesem Betriebsmodus keine Sicherheit vor einer indirekten Infektion erwartet werden kann.

Zum Vergleich zeigen die Ergebnisse mit geschlossener Tür und laufendem Raumlufreiniger klar die Leistungsfähigkeit und den Vorteil des Konzepts. Mit diesen Geräten lässt sich die Aerosolpartikelkonzentration bei einer am Gerät eingestellten Luftwechselrate von 6 pro Stunde innerhalb von 9 ½ Minuten halbieren. Daher können mit diesen Geräten hohe Virenlasten im Raum schnell abgebaut und beim Vorhandensein von Virenquellen auf einem sehr niedrigen Niveau gehalten werden. Die Filterleistung ist auch völlig unabhängig von der Jahreszeit, der Fenstergröße und der Bereitschaft der Kinder und Lehrkräfte die Fenster zu öffnen.

Der Vergleich der Funktionsverläufe zeigt auch klar, dass es keinen nennenswerten Unterschied macht, ob der Raum nur möbliert ist oder ob sich Personen mit Taschen, Rucksäcken und Jacken in dem Raum zusätzlich aufhalten. Selbst die Trennwände haben keinen wesentlichen Effekt auf die Filtereffizienz. Daher sind die Einwände, die unterstellen, dass die Filterleistung der Raumlufreiniger in vollen Räumen deutlich reduziert ist, falsch. Die Filterleistung der Geräte kann lediglich dann nennenswert reduziert werden, wenn der Ansaug- und Ausblasbereich des Gerätes massiv blockiert wird [41]. Aber selbst ein blockierter Raumlufreiniger ist in den meisten Fällen noch effizienter als die freie Lüftung.

Aus den in Abbildung 3 dargestellten Verläufen der Aerosolpartikelkonzentration kann die Halbwertszeit und die mittlere Verweilzeit berechnet werden. Die Werte für die verschiedenen Experimente sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Der Vergleich der in grün dargestellten Werte zeigt, dass erst nach rund 5 Stunden eine Reduzierung der Aerosolkonzentration um 50% in einem Raum ohne Lüftung erreicht ist. Die freie Lüftung stellt eine deutliche Verbesserung dar mit 24 Minuten, aber auch dieser Wert wird das Infektionsrisiko nicht ausreichend reduzieren. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Raumlufreiniger die Virenlast innerhalb von 9,6 Minuten um 50% reduziert wird. Ein dauerhafter Filterbetrieb wird daher eine Anreicherung der Raumluft mit infektiösen Aerosolpartikel sicher verhindern. Selbst mehrere infizierte Personen werden es vermutlich nicht schaffen, eine infektiöse Virenlast im Raum zu erzeugen, wenn der Raumlufreiniger mit einer Luftwechselrate von 6 pro Stunde betrieben wird. Daher kann mit diesen Geräten selbst unter ungünstigen Bedingungen das indirekte Infektionsrisiko enorm reduziert werden.

Tabelle 1: Abnahme der Aerosolkonzentration mit der Zeit für verschiedene Konfigurationen. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

0 m ³ /h (Referenz, mit Personen, mit Trennwänden)	0,14 4,95 7,14
1200 m ³ /h (mit Personen, mit Trennwänden)	4,35 0,16 0,23
1200 m ³ /h (mit Personen, ohne Trennwände)	4,37 0,16 0,23
1200 m ³ /h (ohne Personen, ohne Trennwände)	4,51 0,15 0,22
1000 m ³ /h (ohne Personen, mit Trennwänden)	4,15 0,17 0,24
Freie Lüftung I (ohne Personen, ohne Trennwände)	1,75 0,40 0,57
Freie Lüftung II (ohne Personen, ohne Trennwände)	1,27 0,55 0,79
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]	

Werden in dem Raum an der Messposition kontinuierlich Aerosolpartikel freigesetzt, dann dauert es gemäß der in blau dargestellten Angaben ca. 13 Minuten, bis sie zum Gerät geströmt und abgeschieden werden. Durch eine zentralere Positionierung des Gerätes im Raum lässt sich dieser Wert bei Bedarf verringern. Manchmal wird behauptet, dass es besser ist nichts zu tun als die Viren mit einem Raumlufreiniger durch den Raum zum Abscheideort zu bewegen. Diese Vorstellung geht davon aus, dass die Viren am Freisetzungsort verbleiben. Das ist aber nicht der Fall, denn durch die thermische und konvektive Luftbewegung im Raum werden die Viren bereits nach kurzer Zeit homogen im Raum verteilt. Es ist daher viel sicherer, die Viren zum Filter zu führen und abzuscheiden, als eine Verteilung im Raum zu riskieren.

Experimente mit lokaler Quelle

Die bisher diskutierten Experimente ermöglichen es, wichtige Größen zu bestimmen, die für eine Qualifizierung der Abscheideleistung und der Bewertung der Virenlast im Raum fundamental wichtig sind. Es könnte eingewendet werden, dass in der Realität eine infizierte Person an einem Platz bei Atmen, Sprechen, Singen, Husten und Niesen Aerosolpartikel freisetzt. Um zu ermitteln, ob die freigesetzten Aerosolpartikel direkt über die Trennwand hinweg zum Sitznachbarn gelangen können, wurde ein kleiner Vorversuch durchgeführt. Bei dem Vorversuch wurde neben das Messsystem ein Tisch mit Trennwand positioniert, so dass mit dem Messsystem analysiert werden konnte, ob bei laufendem Betrieb des Raumlufreinigers Aerosolpartikel zum Nachbarplatz gelangen, wenn am Nebenplatz hinter der Trennwand kontinuierlich Aerosolpartikel freigesetzt werden. Mit dem verwendeten Aerosolgenerator ist es nicht möglich, so wenige Aerosolpartikel freizusetzen, wie es eine einzelne Person vermag. Die freigesetzte Menge könnte vielleicht von mehreren Dutzend Personen realisiert werden. Somit analysiert der Versuch einen Fall, der viel extremer ist als jede reale Situation. Das in Abbildung 4 dargestellte Ergebnisse zeigt, dass selbst bei dieser enorm hohen Freisetzung von Aerosolpartikeln offenbar keine kontinuierlich zunehmende Belastung durch Aerosolpartikel am Nachbarplatz auftritt. Daher ist davon auszugehen, dass diese Schutzwände einen umfassenden Schutz vor einer direkten Infektion in Klassenräumen oder Büros bietet. Die Kombination aus Raumlufreiniger und Trennwänden ist daher ein sehr

sinnvolles Schutzkonzept gemäß dieser Studie, um einen sehr guten Schutz vor einer indirekten und direkten SARS-CoV-2 Infektion in Klassenzimmern und Büros zu erreichen.

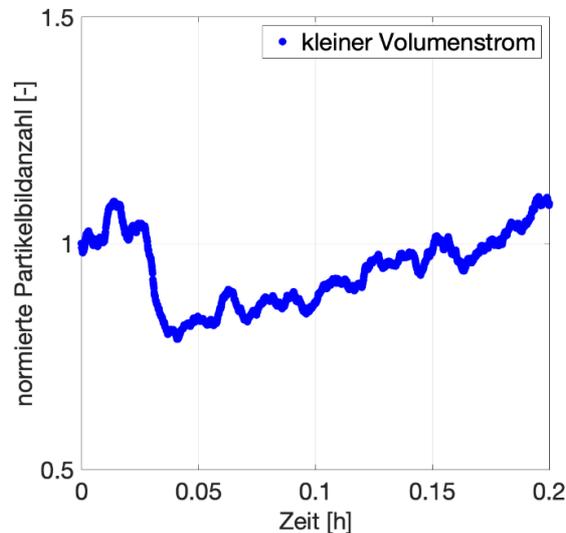


Abbildung 4: Aerosolpartikelkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit bei lokaler Freisetzung von Aerosolpartikeln hinter der Trennwand

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das wesentliche Ziel dieser Studie bestand darin, verschiedene Schutzkonzepte, die einen sicheren Schulunterricht während der Pandemie versprechen, vergleichend zu bewerten und zu ermitteln, ob ein Konzept existiert, das nicht nur sicher, sondern auch umsetzbar, kostengünstig und umweltschonend ist. Aufgrund der enormen Bedeutung dieser Frage für die Kinder und Jugendlichen, aber auch deren Eltern und Großeltern, haben wir fehlende Daten durch wissenschaftliche Experimente erhoben, um unsere Bewertungen bestmöglich abzusichern. Als Ergebnis lässt sich folgendes feststellen und empfehlen:

Ein Schutzkonzept, das allein auf das freie Lüften vertraut, ist einfach umsetzbar, aber es bietet nur ein Minimum an Sicherheit, da es keinerlei Schutz vor einer direkten Infektion gewährleistet. Infektionen werden bei diesem Konzept billigend in Kauf genommen. Durch Infektionen entstehen enorme Kosten, sobald infizierte Kinder und Jugendliche medizinisch versorgt werden müssen. Aber auch wenn die Eltern ihrer Tätigkeit nicht nachgehen können, weil sie sich um die Kinder kümmern müssen, z.B. wenn sich die Klasse in Quarantäne befindet, ist dieses Konzept mit erheblichen Folgekosten verbunden. Das indirekte Infektionsrisiko kann bei diesem Konzept mittels freier Lüftung durch dauerhaft geöffnete Fenster oder mit RLT Anlagen, die 100% Außenluft mit einer Luftwechselrate von 6 pro Stunde zuführen, während der warmen Jahreszeit reduziert werden. Im Winter ist das freie Lüften aber reine Energieverschwendung und daher keine Option, denn Infektionsschutz und Klimaschutz dürfen sich nicht ausschließen. RLT Anlagen bieten im Winter auch keinen energetischen Vorteil, wenn sie mit 100% Außenluftanteil und sechsfacher Luftwechselrate pro Stunde betrieben werden. Das Schutzkonzept ist daher unsicher, für die Kinder und Jugendlichen aufgrund der Kälte im Klassenraum unangenehm, sowie ökonomisch und ökologisch bedenklich. Folglich sollte das Konzept nicht verwirklicht werden.

Das Schutzkonzept, dass auf Abstände setzt, kann in der Realität nicht umgesetzt werden, da weder der Raum noch die Lehrkräfte zur Verfügung stehen. Die Kosten für die Umsetzung wären massiv und es würde sehr lange dauern es umzusetzen, so dass dieses Konzept lediglich dann realisiert werden kann, wenn die Beschulung zuhause erfolgt. Das wäre aber nicht nur nachteilig für die soziale Entwicklung der Kinder und Jugendlichen, sondern auch enorm belastend, da die Eltern sich stark engagieren müssten bei der Beschulung. Es wäre auch ökonomisch ineffizient, da die Eltern ihre berufliche Tätigkeit einschränken müssten und da das Verhältnis Schüler zu Lehrer quasi 1:1 wäre anstatt 1:25. Das Konzept ist zudem ungerecht, da nicht alle Eltern die Zeit, Geduld und Qualifikation haben, um die Kinder und Jugendlichen zu beschulen.

Ein Schutzkonzept, das auf hochwertige partikelfiltrierende Atemschutzmasken (FFP2/3) setzt, bietet eine sehr hohe Sicherheit vor einer Infektion. Aber das dauerhafte Tragen wirkt sich nachteilig auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Trägerinnen und Träger aus. Daher ist das Konzept nicht wirklich umsetzbar. Ferner ist das Tragen von Atemschutzmasken weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Die Kosten belaufen sich auf 20000 Euro pro Jahr und Klasse. Darüber hinaus entsteht viel Müll, was ökologisch ungünstig ist. Es muss aber betont werden, dass diese Atemschutzmasken unbedingt getragen werden müssen, sobald die Kinder ihren Platz verlassen und durch die Klasse oder Schule gehen oder morgens oder nach der Pause zu ihrem Platz gehen.

Schutzkonzepte, bei denen die indirekte Infektionsgefahr durch Raumlufreiniger oder Entkeimungsgeräte realisiert werden, haben den Vorteil, dass die Viren im Raum nach kurzer Zeit abgeschieden oder inaktiviert werden, sofern (1.) die Luftwechselrate pro Stunde mindestens dem sechsfachen des Raumvolumens entspricht. (2.) 99,995% der Viren beim einmaligen Durchlauf durch das Gerät abgeschieden (mit einem Filter der Klasse H14) oder inaktiviert (mit UV-C oder Ionisation) werden und (3.) das Gerät leise ist, so dass es auch betrieben wird. Da die Geräte die Viren in der Raumluft lokal abscheiden oder inaktivieren und dabei keine Wärmeenergie verschwenden, wie die freie Lüftung oder RLT Anlagen, können sie als energetisch effizient betrachtet werden. Die technische Realisierung ist einfach und die Geräte sind kurzfristig in großer Stückzahl verfügbar, da sie vielfach in Deutschland hergestellt werden. Daher würde ihre Nutzung nicht nur für Sicherheit vor einer indirekten Infektion, sondern gleichzeitig auch für den Erhalt von Arbeitsplätzen sorgen. Die laufenden Kosten sind aufgrund der Langlebigkeit der Filter (mehrere Jahre) gering und Wartungskosten fallen bei Geräten, die auf Filterbasis arbeiten, nicht an. Staatliche Programme sollten aufgelegt werden, um eine schnelle Ausstattung der Schulen zu ermöglichen.

Weil die Raumlufreiniger und Entkeimungsgeräte zwar das indirekte Infektionsrisiko minimieren, aber keinen Schutz vor einer direkten Infektion leisten, sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich. Für die Verhinderung direkter Infektionen bieten sich Mund-Nasen-Bedeckungen, OP Masken oder transparente Gesichtsvisiere an. Masken sind oft störend und unbehaglich, sie sind auf Dauer unhygienisch, werden selten richtig getragen und führen zu Müll. Gesichtsvisiere haben diese Nachteile nicht und darüber hinaus ist die Mimik sichtbar. Allerdings stören sie die Bewegungsfreiheit und die Arbeitsweise. Es empfiehlt sich daher, transparente Schutzwände mit umlaufender Kante zwischen den Sitznachbarn zu positionieren. Diese sind für Aerosolpartikel und Viren völlig undurchlässig und wenn sie richtig dimensioniert sind, dann ist es auch sehr unwahrscheinlich, dass die ausgeatmete Luft aufsteigt, über die Begrenzung strömt und dann am Nachbarplatz niedersinkt. Somit bieten

Trennwände den bestmöglichen Schutz zwischen benachbarten Personen im Klassenzimmer. Die Tischnachbarn können sich durch die Schutzwand beliebig nahekomen und auch direkt unterhalten und anhusten ohne sich zu infizieren. Ferner stören die Zwischenwände die Arbeitsweise der Schülerinnen und Schüler nicht, die Mimik ist sichtbar und der Raum ist vollständig einsehbar, sofern die Schutzwände aus transparentem Plexiglas ausgeführt werden. Die Kinder und Jugendlichen können sich durch die Kombination aus Raumluftreiniger bzw. Entkeimungsgerät und Schutzwand vollständig auf den Unterricht konzentrieren und müssen nicht Angst vor einer Infektion haben, bei geöffneten Fenstern frieren oder ständig an das richtige Tragen von Masken denken. Somit kann ein weitgehend normaler Unterrichtsbetrieb realisiert werden.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Experimente bestätigen die sehr gute Wirkungsweise der Schutzwände zur Verhinderung direkter Infektionen. Darüber hinaus haben wir experimentell gezeigt, dass mit leistungsstarken Raumluftreinigern oder Entkeimungsgeräten eine sehr effiziente und schnelle Filterung der Raumluft auch dann realisiert werden kann, wenn der Raum mit Personen, Taschen und Schutzwänden vollgestellt ist. Aus unserer Sicht bietet dieses Schutzkonzept eine hohe Sicherheit, ist einfach zu realisieren, relativ kostengünstig, wenn man die Kosten der anderen Konzepte ernsthaft berücksichtigt, und ökologisch nachhaltig. Daher empfehlen wir auf der Basis dieser Analyse und Experimente die schrittweise Umsetzung des Konzepts unter Beachtung unserer Empfehlungen.

Wenn dieses Konzept umgesetzt wird, bleibt die Frage, was mit den Geräten nach der Pandemie geschehen soll. Aus unserer Sicht ist davon auszugehen, dass diese Geräte auch nach der jetzigen Pandemie Verwendung finden, um anderen Infektionskrankheiten zu begegnen, aber auch um dauerhaft Feinstaub und Pollen aus der Luft abzuscheiden, damit Allergiker und die Gesundheit der Menschen geschützt werden. Langfristig können sich die hier gewonnenen Erkenntnisse auch in RLT Anlagen niederschlagen, so dass diese Anlagen zukünftig die Aufgabe der mobilen Raumluftreiniger und Entkeimungsgeräte übernehmen. Das ist aber ein sehr langfristiger Prozess.

Anmerkung

Die Untersuchungen wurden durch die Firma TROTEC GmbH, Heinsberg, finanziell unterstützt. Der Raumluftreiniger TAC V+ wurde für die Untersuchungen von TROTEC bereitgestellt. Die Untersuchungen wurden unter Einhaltung der guten wissenschaftlichen Praxis durchgeführt. Die Unterstützung durch die Firma TROTEC hat keinerlei Auswirkung auf die dargestellten Ergebnisse.

Literatur

- [1] UN-Kinderrechtskonvention (1989) <https://www.unicef.de/informieren/ueber-uns/fuer-kinderrechte/un-kinderrechtskonvention>
- [2] Sinn HW (2020) Das grüne Paradoxon – Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik. Ullstein Verlag, ISBN 978-3-906212-57-9
- [3] Laughlin RB (2013) Der letzte macht das Licht aus. Die Zukunft der Energie. Piper Verlag, ISBN 978-3-492-30278-4

- [4] Sinn HW (2012) Die Target-Falle – Gefahren für unser Geld und unsere Kinder. Herder Verlag, ISBN 978-3-446-43391-5
- [5] Sinn HW (2016) Der Schwarze Juni: Brexit, Flüchtlingswelle, Euro-Desaster – Wie die Neugründung Europas gelingt. Herder Verlag, ISBN 978-3-451-37745-7
- [6] Kniesner TJ, Sullivan R (2020) The forgotten numbers: A closer look at COVID-19 non-fatal valuations. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3680348>
- [7] Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J (2020) Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. Environ Res. 2020 Sep; 188: 109819. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109819>
- [8] Morawska L, Cao J (2020) Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. Environment International, Volume 139, 105730
- [9] Zhang R, Lib Y, Zhang AL, Wang Y, Molina MY (2020) Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. PNAS (2020), 10.1073/pnas.2009637117, first published June 11
- [10] Stadnytskyi V, et al. (2020) The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. PNAS 117:11875–11877
- [11] Geddes L (2020) Does a high viral load or infectious dose make covid-19 worse? NewScientist, Magazine issue 3276, <https://www.newscientist.com/article/2238819-does-a-high-viral-load-or-infectious-dose-make-covid-19-worse/>
- [12] <https://www.erinbromage.com/post/the-risks-know-them-avoid-them>
- [13] Etheridge D, Sandberg M (1996) Building Ventilation: Theory and Measurement. Wiley, ISBN 978-0-471-96087-4
- [14] Etheridge D (2011) Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design. Wiley, ISBN 978-0-470-66035-5
- [15] Heinz E (2016) Wohnungslüftung – frei und ventilatorgestützt. Herausgeber DIN, Beuth Verlag, ISBN 978-410-25270-2
- [16] Lloyd-Smith JO, Schreiber SJ, Kopp PE, Getz WM (2005) Super spreading and the effect of individual variation on disease emergence. Nature, 438, pp. 355–359
- [17] Fachverband Gebäude-Klima e. V. (2020) Betrieb Raumluftechnischer Anlagen unter den Randbedingungen der aktuellen Covid-19-Pandemie. 03.08.2020, Version 3, www.fgk.de/images/Aktuelles/2020/08-20/RLT_Covid19_V3_200803.pdf
- [18] Dai H, Zhao B (2020) Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation. medRxiv. Preprint. Yale.
- [19] Li Y, Duan S, Yu ITS, Wong TW (2004) Multi-zone modeling of probable SARS virus transmission by airflow between flats in Block E, Amoy Gardens. Indoor Air, 15, 96-111. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00318.x

- [20] Brankston G, Gitterman L, Hirji Z, Lemieux C, Gardam M (2007). Transmission of influenza A in human beings. *The Lancet Infectious Diseases*, 7(4), 257-265. doi:10.1016/S1473-3099(07)70029-4
- [21] Park SY, Kim YM, Yi S, Lee S, Na BJ, Kim CB, . . . Jeong EK (2020) Coronavirus disease outbreak in call center, South Korea. *Emerg Infect Dis*, 26(8). doi:10.3201/eid2608.201274
- [22] Kenji M, Katsushi K, Alexander Z, Gerardo C (2020) Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *Euro Surveill*. 2020;25(10):pii=2000180. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.10.2000180>
- [23] Lu J, Gu J, Li K, Xu C, Su W, Lai Z, et al. (2020) COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerg Infect Dis*. 2020;26(7):1628-1631. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200764>
- [24] Risk of Transmission from HVAC Systems (2020) COVID-19 scientific advisory group rapid evidence report, Alberta health services, June 5, 2020, COVID-19 scientific advisory group, <https://www.albertahealthservices.ca/assets/info/ppih/if-ppih-covid-19-sag-risk-transmission-hvac-systems-rapid-review.pdf>
- [25] Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (2010) Technischer Bericht/Stellungnahme zum Thema „Einsatz von HEPA-Filtern in Raumlufotechnischen Anlagen in Schutz-/Sicherheitsstufe 3 und 4 – Laboratorien und Tierhaltungsbereiche“. Beschluss 16/2010
- [26] DIN 1946-4 – Raumluftechnik im Gesundheitswesen
- [27] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2002) Leitlinienentwurf: Ausführung und Betrieb von raumlufotechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Krankenhäusern. *Hyg Med* 27. Jahrgang 2002 – Heft 3
- [28] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2015) Krankenhaushygienische Leitlinie für die Planung, Ausführung und den Betrieb von Raumlufotechnischen Anlagen in Räumen des Gesundheitswesens. *Hyg Med* 2015; 40 – 12DIN 1946 Teil 2 (1994) Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [29] Kähler CJ, Hain R (2020) Fundamental protective mechanisms of face masks against droplet infections. *Journal of Aerosol Science* 148:105617, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105617>
- [30] DIN EN 149 (2009) Respiratory protective devices – filtering half masks to protect against particles – requirements, testing, marking. German version EN, 149 (2009) 2001+A1, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- [31] Kähler CJ, Hain R (2020) Strömungsanalysen zur SARS-CoV-2 Schutzmaskendebatte. <https://www.unibw.de/lrt7/stroemungsanalysen-zur-sars-cov-2-schutzmaskendebatte> <https://youtu.be/SM2QrPFC3MY> <https://youtu.be/SM2QrPFC3MY>
- [32] DGUV Regeln 112–190 (2011) Benutzung von Atemschutzgeräten. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/DGUV-Regeln/112_190.pdf

- [33] Kähler CJ, Fuchs T, Hain R (2020) Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? DOI: 10.13140/RG.2.2.27503.46243 <https://www.unibw.de/lrt7/raumlufreiniger.pdf>
<https://youtu.be/3Y3KEIUdFFU>
- [34] Kähler CJ, Fuchs T, Hain R (2020) Quantifizierung eines Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes zur Reduzierung der indirekten SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosolpartikel. <https://www.unibw.de/lrt7/entkeimungsgeraet.pdf>
- [35] Verma S, Dhanak M, Frankenfield J (2020) Visualizing droplet dispersal for face shields and masks with exhalation valves. *Phys. Fluids* 32, 091701 (2020); doi: 10.1063/5.0022968
- [36] Kähler CJ, Sammler B, Kompenhans J (2002) Generation and control of tracer particles for optical flow investigations in air. *Experiments in Fluids* 33:736–742
- [37] Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD (2019) Aerosol emission and super emission during human speech increase with voice loudness. *Nature Scientific Reports*, 9, p. 2348
- [38] Johnson GR, Morawska L, Ristovski ZD, Hargreaves M, Mengersen K, Chao C, Wan MP, Li Y, Xie X, Katoshevski D, Corbett S (2011) Modality of human exposed aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42, pp. 839–851, 10.1016/j.jaerosci.2011.07.009
- [39] Lee J, Yoo D, Ryu S, Ham S, Lee K, Yeo M, Min K, Yoon C (2019) Quantity, size distribution, and characteristics of cough generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, pp. 840–853
- [40] Kähler CJ, Hain R (2020) Musizieren während der Pandemie – was rät die Wissenschaft? <https://www.unibw.de/lrt7/musizieren-waehrend-der-pandemie>
<https://youtu.be/0JmciRhV-rs>
- [41] Küpper M, Asbach C, Schneiderwind U, Finger H, Spiegelhoff D, Schumacher S (2019) Testing of an indoor air cleaner for particulate pollutants under realistic conditions in an office room. *Aerosol and Air Quality Research* 19:1655–1665, doi: 10.4209/aaqr.2019.01.0029