

Strömungsanalysen zur SARS-CoV-2 Schutzmaskendebatte

Über Abstandsregeln, Mund-Nase-Schutz, partikelfiltrierenden Atemschutz, Filtermaterialien und Maskenfertigung

Christian J. Kähler, Rainer Hain

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

1. Einleitung

Seit vielen Wochen informieren Ärzten und Virologen sehr kompetent über das Corona Virus SARS-CoV-2 und die Berichterstattung über die Pandemie ist enorm. Die weltweite Ausbreitung des Virus steht noch ganz am Anfang und wenn es keinen Impfstoff gibt, dann befürchten die Experten, dass langfristig alleine in Deutschland bis zu 70% der Bevölkerung infiziert werden, also rund 58 Millionen Menschen. Die Belastung für das medizinische Personal ist bereits gewaltig und daher ist das oberste Ziel der Regierung, die Ausbreitung des Virus zu verzögern, damit die schwer kranken Menschen weiterhin optimal behandelt werden können und das medizinische System nicht überfordert wird. [1]

Das Konzept der Verzögerung hat sich bereits 1918 in St. Louis in den USA bei der Ausbreitung der Spanischen Grippe als wirksam herausgestellt und bewährt. Um die gewünschte Verzögerung zu erreichen, werden derzeit zwei wesentliche Konzepte verfolgt:

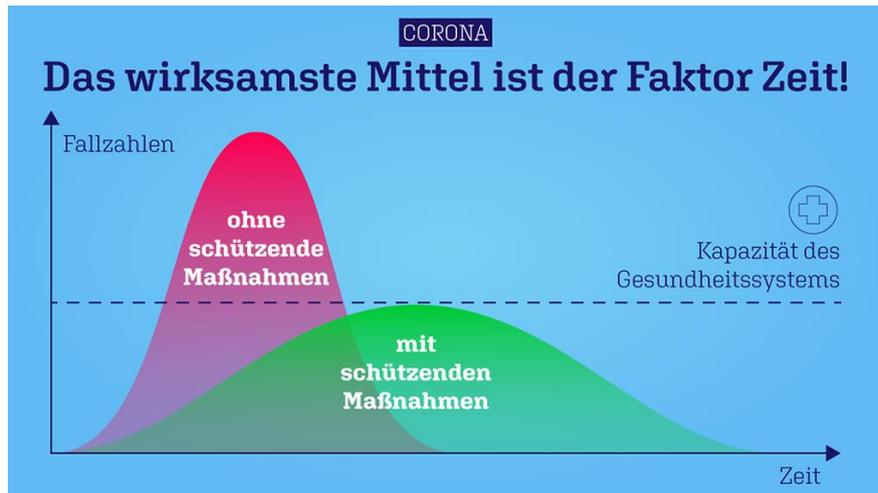
- **Hygienemaßnahmen** und
- **Soziale Distanzierung.**

Um letzteres zu erreichen wurde das gesellschaftliche und wirtschaftliche Leben massiv eingeschränkt, die Bildungseinrichtungen geschlossen und Ausgangsbeschränkungen verfügt.

Es lässt sich leicht ausrechnen, dass die aktuellen Beschränkungen sehr lange aufrechterhalten werden müssen, wenn alleine auf Hygienemaßnahmen und soziale Distanzierung gesetzt wird. Gehen wir von der Situation in Deutschland aus und nehmen an, dass 70% der Bevölkerung langfristig infiziert werden und 5% von den Infizierten intensivmedizinisch behandelt und beatmet werden müssen, so ergibt sich bei einer Verfügbarkeit von 6800 Beatmungsgeräten und einer mittleren Beatmungszeit von 6 Tagen pro Patient eine notwendige zeitliche Streckung der Pandemie auf fast 7 Jahre!

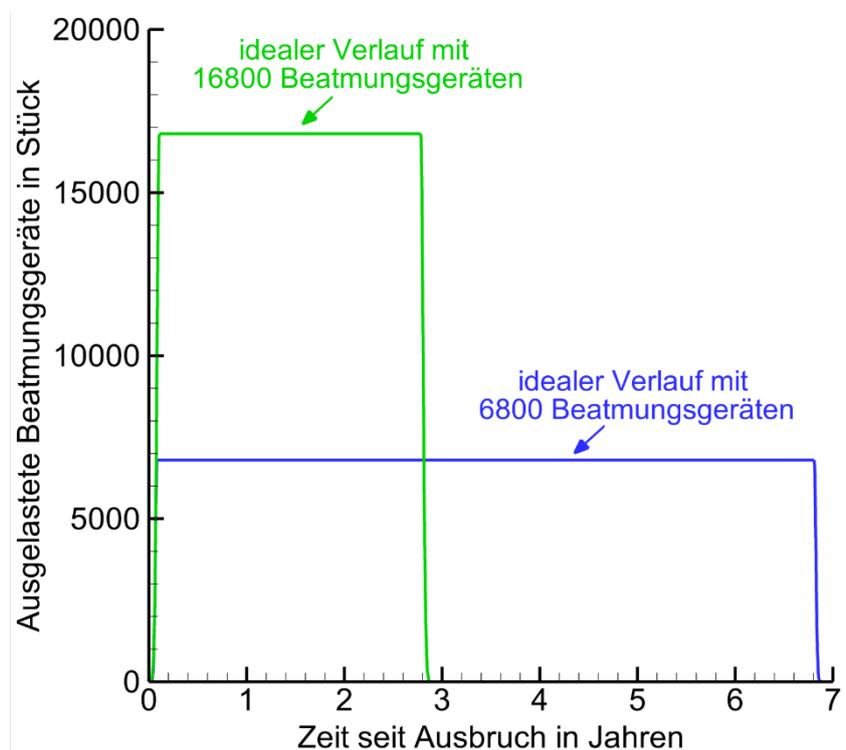
Laut Medienberichten wurden 10000 neue Beatmungsgeräte bestellt, siehe [2]. Damit würde sich die Dauer der Maßnahme auf knapp unter 3 Jahre verkürzen. Um die Dauer der Pandemie auf weniger als ein Jahr zu begrenzen, ohne das medizinische System zu überlasten, müssten über 45000 Geräte in Deutschland vorhanden sein!

In den Medien wird der Nutzen der Verzögerungsstrategie oft mit der folgenden Grafik veranschaulicht, die von der Homepage der Bundesregierung stammt:



Quelle: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/coronavirus/ausbreitung-coronavirus-1716188>, abgerufen am 04.04.2020

Diese in den Medien oft gezeigte Grafik ist leider irreführend, weil die Belastungsgrenzen des medizinischen Systems viel zu hoch eingezeichnet ist und der Verlauf der grünen Funktion und die zeitliche Streckung unrealistisch dargestellt werden. Bei diesem Verlauf wird die zur Verfügung stehende Kapazität - abgesehen von einem einzigen Zeitpunkt - nie ausgelastet und folglich müsste die Zeitachse viele Jahre umfassen. Richtig sieht der Verlauf für die beiden betrachteten Fälle folgendermaßen aus:



Zeitliche Auslastung der Intensivstationsbetten mit Beatmungsgeräten bei 6800 und 16800 verfügbaren Einheiten. Der Funktion ohne Maßnahmen (roter Graph in der ersten Abbildung) ist nicht dargestellt, da er einen riesigen Peak im Bereich der ersten 6 Monate ergeben würde, wenn 2,9 Mio Patienten beatmet werden müssen und ein Gauß-artiger Pandemieverlauf angenommen wird.

Je länger die Verzögerungsstrategie anhält, umso gravierender werden die Auswirkungen für Staat, Wirtschaft und Bevölkerung sein. Die Arbeitslosigkeit und Verunsicherung der Menschen wird zunehmen, was wiederum die Radikalisierung befördert und die Demokratie bedrohen kann. Es ist daher nachvollziehbar, dass schon jetzt viele eine Lockerung der Beschränkungen fordern.

Mit zunehmender Dauer der Pandemie besteht auch die Gefahr, dass sich die Menschen an die Bedrohung gewöhnen und ihr dann nicht mehr die erforderliche Aufmerksamkeit, den nötigen Respekt und den angemessenen Widerstand entgegenbringen. Bereits jetzt schätzen zahlreiche Menschen die aktuelle Berichterstattung über das Corona Virus als übertriebenen Medienhype ein und viele halten die aktuellen politischen Maßnahmen für überzogen. Es ist daher möglich, dass sich die Ausbreitung nicht wie gewünscht verzögern lässt. Dann würde die Pandemie über einige Monate ungebremst ihren Lauf nehmen, was für das medizinische System, die Risikogruppen, aber auch viele andere Menschen verheerend wäre. [1]

Es ist klar, dass die Strategie der Verzögerung nur kurzfristig durchführbar ist, ohne den Staat, die Wirtschaft und die Gesellschaft massiv zu gefährden. Daher ist es notwendig, auch andere Konzepte in Erwägung zu ziehen, solange kein Impfstoff oder wirksames Medikament verfügbar ist. Es genügt eben nicht einen möglichen Weg zu finden, um der Pandemie zu begegnen, sondern derjenige Weg muss gefunden werden, der das gesteckte Ziel zu möglichst geringen Kosten und minimalen Nebenwirkungen für den Staat, die Wirtschaft, das Gesellschaftsleben und die Menschen erreicht.

Derzeit werden zwei weitere Wege diskutiert. Der erste sieht eine kontrollierte Infizierung der Bevölkerung vor. Ziel dieser Strategie ist eine Herdenimmunität zu erreichen, bei der schrittweise rund 70% der Bevölkerung infiziert werden müssten, um die Ausbreitung des Virus zum Erliegen zu bringen. Die restlichen 30% blieben in diesem Szenario von einer Infizierung weitgehend verschont. Wie diese Strategie funktionieren soll ist derzeit nicht bekannt.

Der zweite Weg setzt auf die Nutzung technischer Hilfsmittel, also geeignete Atemschutzmasken, um eine personalisierte Isolation immer dann zu gewährleisten, wenn der Schutz erforderlich ist. Dieser Weg zielt darauf ab, die Übertragung dort zu bekämpfen, wo sie stattfindet. Es ist klar, dass das Virus theoretisch innerhalb weniger Wochen vollständig ausgerottet werden könnte, wenn weltweit die Übertragung des Virus von Mensch zu Mensch komplett verhindert würde! Praktisch ist dies nicht erreichbar, aber eine wirkliche Eindämmung der Ausbreitung wäre mit der individuellen Prophylaxe realisierbar und zwar auch dann, wenn die umfassenden Beschränkungen gelockert oder aufgehoben werden.

Strategie der kontrollierten Infizierung der Bevölkerung (Herdenimmunität)

Zur Strategie der kontrollierten Infizierung lässt sich sagen, dass sie für die Bevölkerung extrem Risikoreich ist. In der Anfangsphase der Pandemie schien sich abzuzeichnen, dass fast ausschließlich Risikogruppen, speziell ältere Menschen mit Vorerkrankungen, mit dem Tod rechnen müssten. Inzwischen verdeutlichen aber die Zahlen, dass diese Einschätzung nicht zutrifft. Selbst junge Menschen sterben deutlich häufiger an Covid-19 als an der Influenza. [3] Es ist auch möglich, dass eine schwere Infektion mit SARS-CoV-2 langfristige gesundheitliche Folgen haben könnte, weil z.B. das Immunsystem durch eine schwere Infektion seine Abwehrfähigkeiten stärker auf Viren ausrichtet und seine Schutzmöglichkeiten vor anderen Krankheiten reduziert.

Derzeit wird näherungsweise davon ausgegangen, dass in Deutschland bei einer optimalen medizinischen Versorgung von 100 infizierten Personen im Mittel eine Person stirbt, bzw. 1,4 laut Robert Koch Institut vom 3. April 2020. Die Sterblichkeitsrate ist stark abhängig von der Altersstruktur in den Ländern, der Qualität des medizinischen Systems und den Annahmen bei der Berechnung der Zahl. Eine Auswertung der Daten aus der chinesischen Provinz Hubei ergab im günstigsten Fall eine Tödlichkeit (Letalität) von 0,66%, siehe [3]. Die WHO geht im Mittel über alle Länder von einer Sterblichkeit von 3,4% aus, siehe [4]. Sollte dieses Risiko eingegangen werden in Anbetracht der aktuellen Situation für die Wirtschaft? Um diese Frage zu beantworten ist es sinnvoll sich klarzumachen, wo wir im täglichen Leben ein vergleichbares tödliches Risiko von rund 1:100 eingehen.

2018 betrug das Risiko bei einem Flugzeugabsturz tödlich zu verunglücken 1:7,7 Mio. Diese Zahl verdeutlicht, welche Zuverlässigkeit technische Systeme im Allgemeinen erreichen müssen, um eine Zulassung zu erhalten. Der Vergleich zeigt auch, dass eine SARS-CoV-2 Infektion statistisch rund 77000 Mal so gefährlich ist wie eine Reise mit einem Verkehrsflugzeug. Selbst wenn man nicht zu einer Risikogruppe gehört, ist das tödliche Risiko der Infektion um Größenordnungen höher als bei der Nutzung gewöhnlicher Verkehrsmittel im Alltag. Daher ist die Gefahr, die von dem Virus ausgeht, als sehr hoch einzuschätzen.

Bei den Apollo Missionen zum Mond wurde ein Risiko von 1:100 in Kauf genommen. Wer mit dem Space Shuttle geflogen ist, hatte sich einem tatsächlichen tödlichen Risiko von 1:67 ausgesetzt. Ein Risiko von 1:67 sind auch die alliierten Soldaten 2003 im Irakkrieg eingegangen. Bei einer möglichen Marsmission wird ein Risiko von 1:75 angestrebt. An einer SARS-CoV-2 Infektion zu sterben kommt demnach den Risiken der bemannten Raumfahrt und Kriegseinsätzen recht nahe. Nur ganz wenige Menschen gehen bei vollem Bewusstsein und ohne Not ein so hohes tödliches Risiko ein. Das muss man sich immer klarmachen, bevor man sich selbst oder andere diesem tödlichen Risiko aussetzt.

Eine kontrollierte Infizierung der Bevölkerung zuzulassen wäre angesichts der Zahlen aus meiner Sicht unverantwortlich. Allein was die 2,9 Millionen Patienten durchleben müssen, die auf der Intensivstation nach dieser Strategie beatmet werden müssten, ist unvorstellbar. Ich hoffe daher sehr, dass diese Strategie keine Mehrheit findet, denn es ist die Aufgabe des Staates, Schaden vom Volk abzuwenden und nicht Teile der Bevölkerung zu opfern. Aus meiner Sicht darf dieser Weg nur dann eingeschlagen werden, wenn es ein wirksames Medikament gibt, welches das tödliche Risiko im Falle einer Infektion um mehrere Größenordnungen reduziert.

Strategie der persönlichen Isolation (Schutzmasken)

Was ist mit dem zweiten Weg, der auf geeignete Schutzmasken setzt? In den Medien und der Bevölkerung wird zunehmend diskutiert, ob Masken einen wirksamen Schutz vor der Infektion bieten können. Die Aussagen der Politiker und Virologen sind widersprüchlich, da teilweise zwischen einem einfachen Mund-Nase-Schutz und einer partikelfiltrierenden Halbmaske nicht differenziert wird und weil von den geringen Schutzqualitäten einfachster Masken auf alle Masken in unzulässiger Weise verallgemeinert wird. Ferner wird unterstellt, dass viele Menschen die Masken nicht richtig und nicht konsequent genug tragen würden. Es wird auch befürchtet, dass das Tragen von Masken dazu führen könnte, dass die Menschen die Hygiene- und Abstandsregeln nicht mehr befolgen, weil sich die Träger der Masken sicher fühlen könnten. Zahlreiche Bürgerinnen und Bürger sind daher zu Recht verunsichert und beginnen aufgrund des Vertrauensverlusts sich inzwischen selbst zu helfen, indem sie Masken aus

handelsüblichen Materialien fertigen und hoffen, dass selbst gefertigte Masken einen wirksamen Schutz vor der Übertragung der Infektion über Tröpfchen bieten.

In mehreren Epidemien erprobten Ländern in Asien ist das Tragen von geeigneten Masken selbstverständlich. In Österreich müssen die Menschen künftig eine Schutzmaske beim Einkaufen tragen. In Deutschland nimmt die Diskussion über die Maskenpflicht auch langsam Fahrt auf und es ist zu erwarten, dass diese Kultur auch bei uns auch bald gesellschaftliche Anerkennung findet. Masken scheinen in der aktuellen Notsituation offenbar der größte Hoffnungsträger zu sein, weil ja auch die schnelle Entwicklung von wirksamen Medikamenten und Impfstoffen keinesfalls gesichert ist. Aber kann diese Hoffnung erfüllt werden? Das ist die große Frage, um die sich die Diskussion in den Medien aktuell dreht. Eine eindeutige Antwort scheint es bislang nicht zu geben. Es wird lediglich immer wieder darauf hingewiesen, dass es keine wissenschaftlichen Belege dafür gibt, dass man sich durch Masken schützen kann, siehe [5]. Aktuelle Analysen hingegen deuten darauf hin, dass geeigneten Schutzmasken durchaus einen positiven Nutzen haben könnten, siehe [6].

Kann die Strömungsmechanik zur Maskendebatte beitragen?

Interessanterweise wird die Diskussion über die Wirksamkeit der Schutzmasken von Politikern, Virologen und Medizinern geführt. Ich denke, dass sich zu diesem Thema auch Strömungsmechaniker in die Debatte einbringen sollten. Dafür sprechen zwei Gründe:

1. Damit sich die Viren verbreiten können, müssen sie von der Schleimhaut im Rachen oder der Lunge eines infizierten Menschen mit Hilfe sehr kleiner Tröpfchen durch die Nase oder den Mund in die freie Atmosphäre transportiert werden, da sie nur so von einer nicht infizierten Person eingeatmet werden können. Die beim Ausatmen erzeugte Strömung bewirkt also den Transport der Tröpfchen, in denen die Viren enthalten sind. Die Analyse und Erklärung diese Vorgänge erfordern Kenntnisse aus dem Fachgebiet der Strömungsmechanik und Aerodynamik.
2. Darüber hinaus ist auch die effektive Verhinderung der Ausbreitung von Mensch zu Mensch mit Hilfe von Barrieren oder Masken Forschungsgegenstand der Strömungsmechanik und Aerodynamik. Daher erlaube ich mir zu diesem Thema Stellung zu beziehen.

Ziele der Untersuchungen

Dass geeignete partikelfiltrierende Atemschutzmasken einen wirksamen Schutz vor der Übertragung der Viren durch Mund und Nase darstellen, ist zweifelsfrei erwiesen und daher ist es auch gesetzlich vorgeschrieben, dass diese Masken als Arbeitsschutz in Gefährdungsbereichen getragen werden müssen. Aber was sind Gefährdungsbereiche in Zeiten von SARS-CoV-2?

Neben den Krankenhäusern müssen inzwischen sicher auch die Einkaufsläden und die öffentlichen Verkehrsmittel als Gefährdungsbereiche angesehen werden. Bei einer Lockerung der Ausgangsbeschränkungen kämen viele weitere Bereiche hinzu, weil dann die Häufigkeit der Kontakte wieder stark ansteigt und die Infektionszahlen ohne weitere Schutzmaßnahmen rasant zunehmen werden.

Das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit schreibt, dass zum Schutz vor einer Ansteckung durch das Corona-Virus SARS-CoV-2 ein partikelfiltrierender

Atemschutz der Schutzklasse FFP2 oder besser notwendig ist, siehe [7]. Leider sind derzeit in allen Ländern diese Schutzmasken schwer oder nur zu völlig spekulativen Preisen erhältlich, so dass selbst die Versorgung des medizinischen Personals mit Masken nicht gewährleistet werden kann. Es ist daher verständlich, dass die Virologen bislang der Bevölkerung davon abraten, sich mit entsprechenden Schutzmasken auszustatten, da diese Masken dringend in den Krankenhäusern und Arztpraxen benötigt werden.

Da geeignete partikelfiltrierende Masken aber bei richtiger Verwendung einen staatlich anerkannten Schutz vor der Ausbreitung der Infektion über die Atmung bieten und die Unterbindung der Übertragung von Mensch zu Mensch die effektivste Maßnahme zur Verlangsamung der Ausbreitung ist, ist auch die weltweite Versorgung der Menschen mit diesen Masken dringend notwendig, solange es keinen Impfstoff und kein wirksames Medikament gibt.

Da diese Masken derzeit nicht verfügbar sind, stellen sich viele Menschen folgende Fragen:

1. Was bringen Atemschutzmasken überhaupt?
2. Wann müssen Atemschutzmasken getragen werden?
3. Welches Filtermaterial eignet sich, um die Tröpfchen effektiv herauszufiltern, die die Viren übertragen?
4. Wie muss eine Atemschutzmaske gefertigt und getragen werden, damit sie einen wirksamen Schutz bietet?

Diese Fragen sollen in diesem Video aus der Sicht der Strömungsmechanik und Aerodynamik beleuchtet werden. Da wissenschaftliche Experimente die Komplexität der wahren Verhältnisse besser berücksichtigen können als theoretische Betrachtungen und experimentelle Ergebnisse auch viel überzeugender sind als Mutmaßungen und spekulative Diskussionen in den Medien, habe ich in den letzten Tagen zusammen mit meinem Assistenten viele Versuche im Labor durchgeführt. Ich muss gestehen, dass die Ergebnisse der Experimente mich veranlassen haben, einige Dinge anders zu beurteilen als zuvor und daher halte ich die Ergebnisse auch für interessant genug, um sie hier mitzuteilen. Nur so kann sich jeder selber eine Meinung bilden und gegebenenfalls das eigene Verhalten ändern.

Um zu verdeutlichen, was eine Maske leisten muss, welche Materialien sich zur Herstellung eignen und wie sie richtig gefertigt und getragen wird, werde ich in drei Schritten vorgehen.

Im ersten Schritt wird zunächst visualisiert, wie schnell die Tröpfchen beim Atmen, Sprechen und Husten durch die Strömung aus dem Mund verbreitet werden. Diese Visualisierungen vermitteln einen guten Eindruck, was die Maske leisten muss und sie beantwortet die wichtige Frage, welche Sicherheitsabstände in Räumen eingehalten werden sollten, wenn keine Masken getragen werden. Zum Vergleich wird auch demonstriert, wie die Strömungsbewegung beim Atmen, Sprechen und Husten durch eine Hygienemaske, einen Mund-Nase-Schutz und einer partikelfiltrierenden Atemschutzmaske beeinflusst wird. Das Niesen wird nicht explizit betrachtet, da dieser Übertragungsweg bei der aktuellen Ausbreitung der Infektion laut Expertenmeinung von untergeordneter Bedeutung ist.

Im zweiten Schritt wird die Filterwirkung einer Hygienemaske und eines Mund-Nase-Schutz analysiert und es wird gezeigt, welche handelsüblichen Materialien aus dem Haushalt einen guten Schutz vor kleinen Tröpfchen aufweisen und welche nicht. Gerade der letzte Punkt ist bei der Maskenanfertigung außerordentlich wichtig zu beachten, um zu gewährleisten, dass die Maske auch wirklich vor einer Tröpfcheninfektion schützt.

Schließlich wird im letzten Teil des Videos vorgeführt, wie eine partikelfiltrierende Schutzmaske sehr einfach, schnell und kostengünstig gefertigt werden kann und wie sie getragen werden muss, damit sie auch einen verlässlichen Schutz bietet. Die Materialkosten für eine solche Maske liegen bei etwa 50 Cent und die Fertigung dauert mit etwas Übung rund 5 Minuten.

2. Experimentelle Untersuchungen

Da die Übertragung der Viren über Tröpfchen geschieht, ist die erste Frage, wie groß denn die Tröpfchen sind, die beim Atmen, Sprechen und Husten aus dem Mund austreten. Dazu gibt es Untersuchungen die zeigen, dass beim Husten Tröpfchen mit einem Durchmesser von 0,1 μm bis mindestens 0,9 mm erzeugt werden, siehe [8]. Beim Niesen entstehen bekanntlich auch deutlich größere Tröpfchen, die mehrere Millimeter groß sein können, siehe [9]. Die bis zu mehreren Millimeter großen Tropfen, die beim Niesen entstehen, können aber zuverlässig von einem einfachen Mund-Nase-Schutz oder einem Stofftuch geblockt werden. Die kleinen Partikel erfordern hingegen Materialien mit sehr guten Filtereigenschaften.

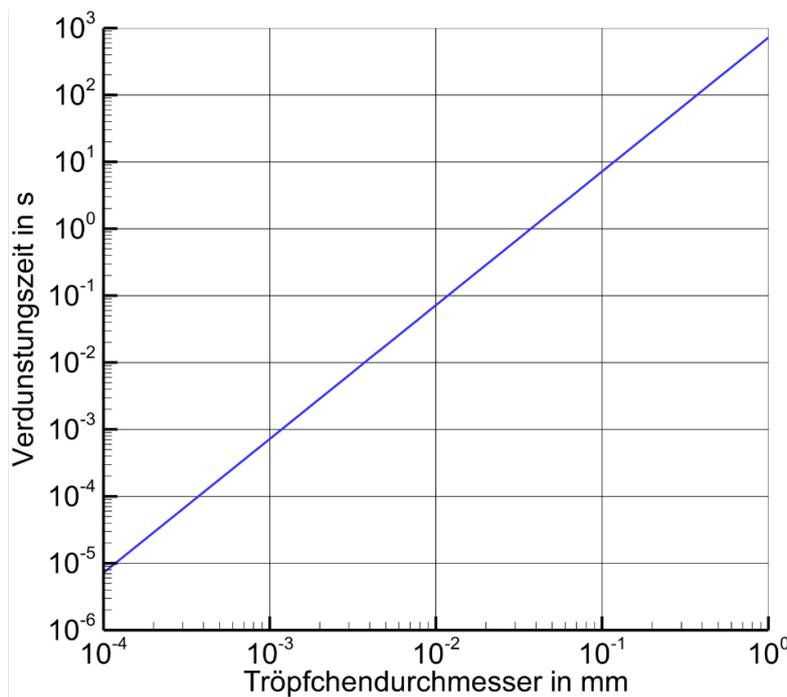
Da die Entfernung der kleinsten Tröpfchen in einem Luftstrom die größte Herausforderung bei der Maskenentwicklung darstellt, werden für die Strömungsexperimente nur Tröpfchen mit einem Durchmesser von 0,1 – 2 μm verwendet. Zum Vergleich sei gesagt, dass das SARS-CoV-2 Virus maximal 0,16 μm groß ist. Wenn es gelingt diese Tröpfchen wirksam herauszufiltern, dann wird es auch mit allen Tröpfchen gelingen, die größer als 2 μm sind. Tropfen, die kleiner als 0,1 μm sind, werden nicht explizit betrachtet, da sie einerseits schnell verdunsten und andererseits die mögliche Anzahl der Viren, die sie tragen können, vermutlich zu keiner Infektion führen kann.

Die gewünschte Größenverteilung der Tröpfchen wurde mit speziellen Aerosol-Generatoren erzeugt (PIVpart45, PIVTEC GmbH und AGF 2.0, Palas GmbH). Für die Beleuchtung der Tröpfchen wurden leistungsstarke Nd:YAG Doppelpuls-Laser (SpitLight PIV 1000-15, InnoLas Laser GmbH und Evergreen 200, Quantel) eingesetzt, deren Ausgangsstrahl mit einigen Linsen zu Lichtschnitten aufgefächert wurden. Die Lichtschnittebene wurde bei den ersten Messungen senkrecht zum Mund und parallel zur Wirbelsäule der Versuchsperson orientiert. Bei den zweiten Untersuchungen befand sich der Lichtschnitt in der Kanalmitte parallel zur Strömung. Die Visualisierung der Partikel in dem Lichtschnitt erfolgte mit hochsensitiven sCMOS Kameras (PCO edge 5.5, LaVision GmbH), die in der Lage sind, das Streulicht der Partikel zu registrieren. Für die Abbildung wurden Carl Zeiss Distagon T* Objektive mit 25 mm und 35 mm Brennweite verwendet.

Zunächst soll die Frage geklärt werden, wie groß der Abstand zwischen dem Spender und dem Empfänger der Tröpfchen sein muss, um eine Infektion auch ohne Maske mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Diese Frage wurde in den Medien oft thematisiert, aber die Aussagen variieren stark. Manche empfehlen einen Abstand von 2 m. Andere gehen von deutlich geringeren Distanzen aus. Es gibt aber auch Publikationen, die zeigen, dass viel größere Abstände sinnvoll sein könnten. Zur Beantwortung der Frage wurde das Geschwindigkeitsfeld der Strömung in dem erzeugten Lichtschnitt mit der Particle Image Velocimetry Messtechnik bestimmt, siehe [10].

Wenn die Geschwindigkeit in einem gewissen Abstand vor dem Mund nahe Null ist, dann kann das Virus sich nicht mehr weiter im Raum ausbreiten. Aus dieser Information folgen dann Abschätzungen für die Sicherheitsabstände, wobei natürlich ein ausreichender Sicherheitsfaktor berücksichtigt wird, um die menschlichen Unterschiede zu berücksichtigen.

Wie lange die Tröpfchen in dem kontaminierten Bereich infektiös sein können ergibt sich natürlich nicht aus diesen Experimenten. Fakt ist aber, dass Tröpfchen mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern und kleiner quasi nicht zu Boden sinken, so dass sie in der Luft verbleiben bis sie verdunstet sind. Bei trockener Luft dauert es einige Sekunden, bis kleine Wassertropfchen vollständig verdunstet sind, so dass der kontaminierte Bereich nach kurzer Zeit wieder betreten werden kann. Ein 100 μm großer Tropfen aus Wasser ist beispielsweise nach rund 10 Sekunden verdunstet und ein Tröpfchen mit einem Durchmesser von einem Mikrometer bereits nach einer tausendstel Sekunde gemäß der Abbildung, siehe [11]. Bei hoher Luftfeuchtigkeit nimmt die Verdunstungszeit allerdings stark zu und in sehr feuchter Umgebung verdunsten die kleinen Tröpfchen überhaupt nicht.

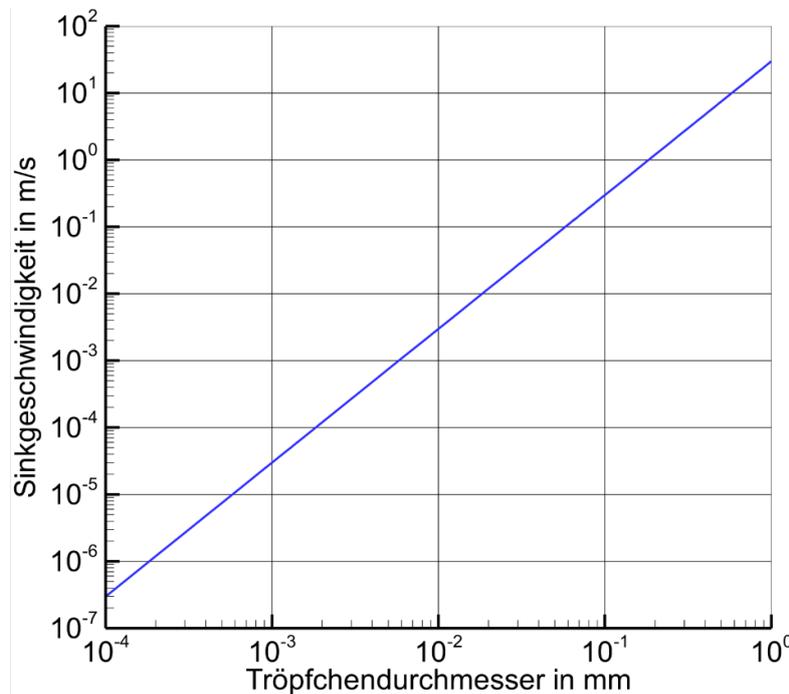


Verdunstungszeit von kleinen Wassertropfchen in trockener Luft

Große Tröpfchen verdunsten sehr langsam, aber sie sinken recht schnell zu Boden und können daher nach wenigen Sekunden nicht mehr eingeatmet werden. Ein 100 μm großer Wassertropfen beispielsweise hat in ruhender Luft eine Fallgeschwindigkeit von etwa 0,3 m/s und ein 300 μm Tropfen kommt auf eine Fallgeschwindigkeit von rund 1 m/s gemäß der folgenden Abbildung.

Sehr große Tropfen können aber natürlich die Oberflächen von Objekten kontaminieren und über den Kontakt eine Schmierinfektion auslösen. Daher sollte auf die Hygienemaßnahmen nicht verzichtet werden und auch das Tragen leichter Handschuhe beim Einkaufen oder in den öffentlichen Verkehrsmitteln erscheint sinnvoll, um das Risiko von Schmierinfektionen zu minimieren und den gewohnheitsmäßigen Griff ins eigene Gesicht zu unterdrücken.

Zur Durchführung der Versuche wird der gesamte Versuchsraum zunächst mit sehr langlebigen DEHS Tröpfchen mit einem mittleren Durchmesser von einem Mikrometer benebelt und anschließend wird die Luft durch Atmen, Sprechen und Husten in Bewegung versetzt. Zwischen den einzelnen Versuchen muss recht lange gewartet werden um sicherzustellen, dass die Luftbewegung abgeklungen ist. Auch die Auswertung der Messdaten erfordert etwas Zeit. Diese Vorgänge werden daher nicht im Video gezeigt.



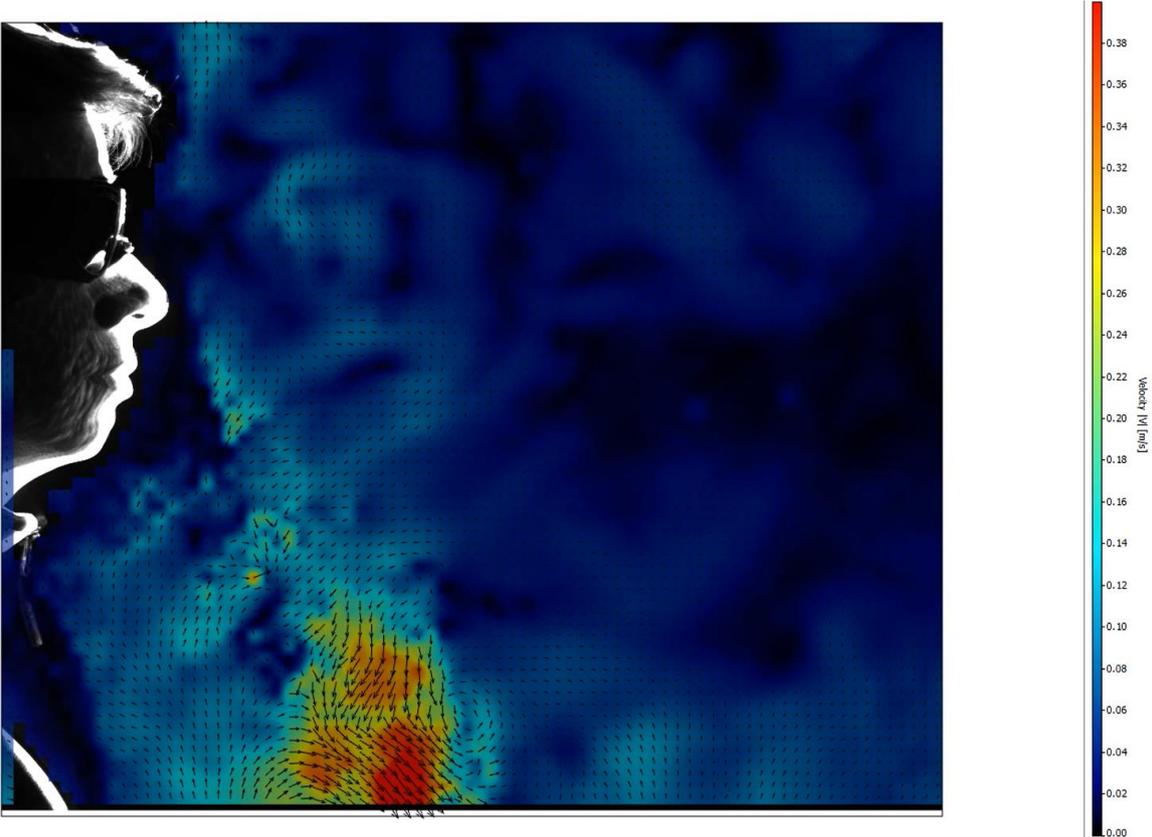
Sinkgeschwindigkeit von kleinen Wassertröpfchen Luft

Wir können in der Kürze der Zeit keine streng wissenschaftliche Analyse durchführen. Diese wäre sehr umfangreich und müsste mit vielen Versuchspersonen und sehr viel mehr Filtermaterialien mehrfach durchgeführt werden. Wir beschränken uns hier aus Zeit und Kostengründen auf eine Sensitivitätsanalyse. Das erscheint in Anbetracht der aktuellen Dringlichkeit der Problematik angemessen. Würde ich jetzt versuchen Drittmittel für diese Forschung zu beantragen, dann könnten wir frühestens in einem Jahr mit der Arbeit beginnen und das wäre natürlich viel zu spät, um in der aktuellen Krise einen Beitrag zu leisten. Eine kurzfristige, unbürokratische Bereitstellung von Forschungsmitteln für derartige Untersuchungen wäre sicher wünschenswert in Anbetracht der Krise.

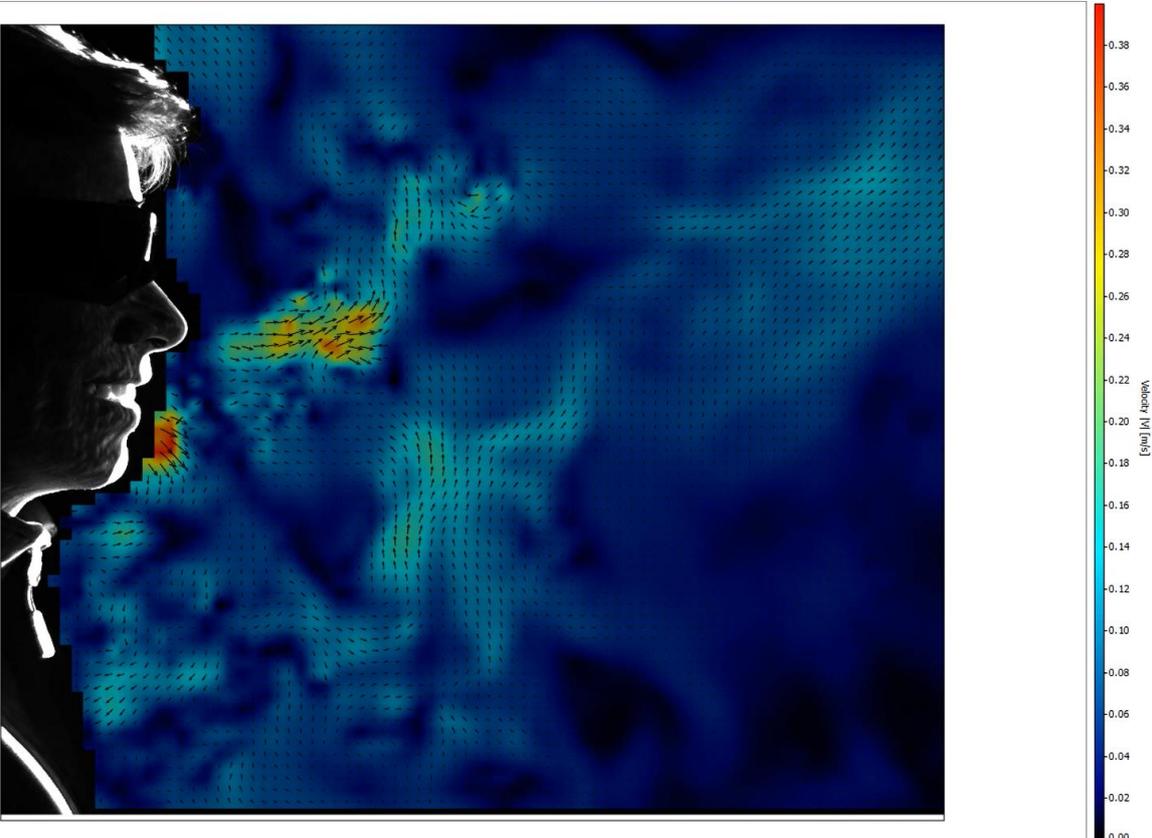
A: Atmen, Sprechen und Husten ohne Masken

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass beim normalen unbelasteten Atmen durch die Nase die Luft nur wenig in Bewegung versetzt wird. Die Austrittsgeschwindigkeit der Luft beträgt maximal ca. 0,5 m/s und der Bereich um den Mund, in dem eine Luftbewegung feststellbar ist, beläuft sich auf ungefähr 0,3 m. Es ist daher unwahrscheinlich sich zu infizieren, wenn man neben einer infizierten Person auf einer Bank, oder einer Person gegenüber an einem Tisch sitzt. In dieser Situation ist ein Schutz mit einer Maske folglich nicht nötig wenn ein Sicherheitsabstand von 1 m eingehalten wird.

Beim normalen Sprechen wird die Luft ebenfalls nur geringfügig in Bewegung versetzt. Die Austrittsgeschwindigkeit beträgt beim Sprechen nur ca. 0,3 m/s, da die Mundöffnung größer ist als die Nasenlöcher. Aufgrund der geringen Austrittsgeschwindigkeit bleibt auch die Reichweite recht gering mit ca. 0,2 m, obwohl beim Sprechen mehr Luft austritt als beim ruhigen Atmen durch die Nase. Ohne Maske reicht auch hier ein Sicherheitsabstand von einem Meter völlig aus, um sich effektiv vor einer Tröpfcheninfektion bei einem normalen Gespräch zu schützen. Bei hitzigen Gesprächen zwischen zwei Personen oder stark kontroversen Besprechungen mit mehreren Teilnehmern sollte besser ein Sicherheitsabstand von 1,5 m eingehalten werden.

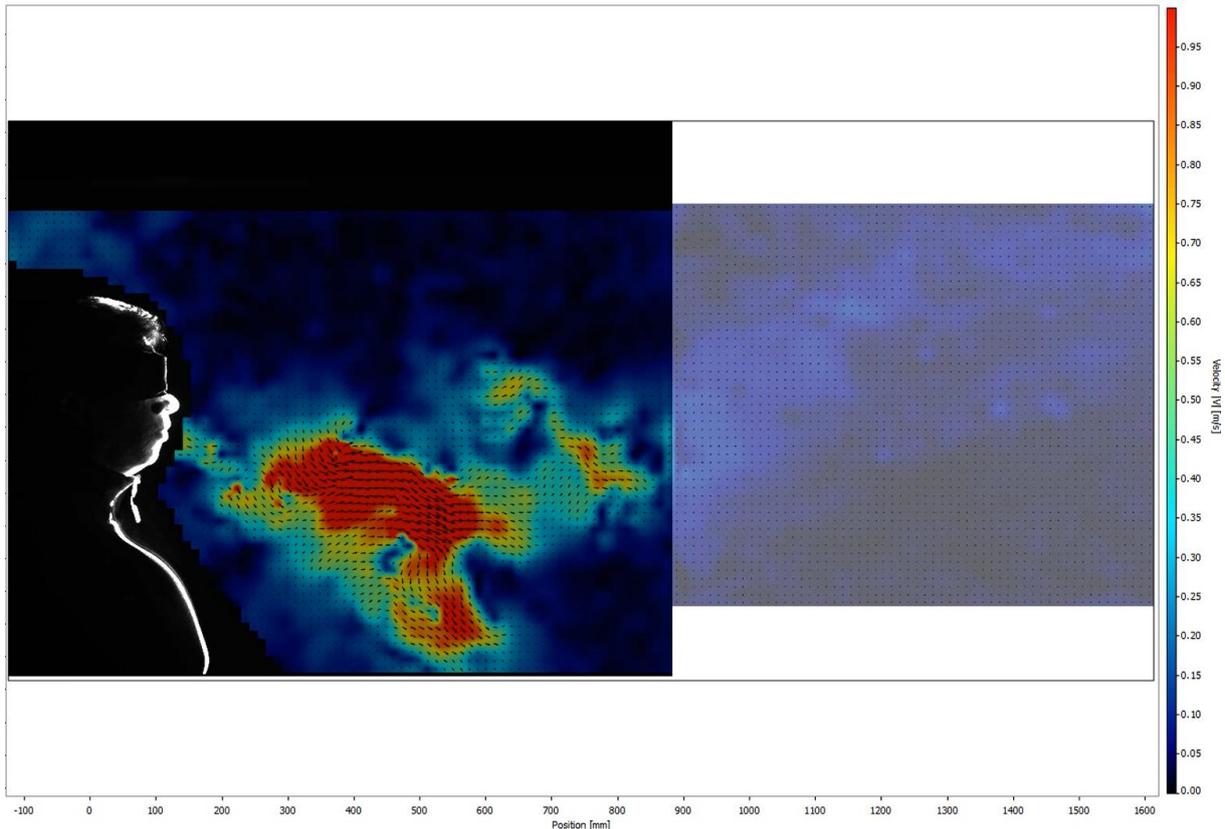


Strömungsfeld beim Atmen durch die Nase ohne Maske



Strömungsfeld beim Sprechen ohne Maske

Beim stoßartigen Husten ist die Situation anders, da hier die Luft deutlich schneller durch die Atemmuskulatur aus der Lunge gepresst wird, als beim Atmen oder Sprechen. Dies ist notwendig, da die Reinigungswirkung der Lunge umso besser ist, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist, die beim Husten erreicht wird. Das hängt damit zusammen, dass die Schubspannungen, die an den in der Lunge und im Rachen haftenden Partikeln wirken, mit der Strömungsgeschwindigkeit zunehmen. Je größer die Schubspannungen sind, die auf die Partikel wirken, desto besser ist der Reinigungserfolg. Die Messungen zeigen, dass die Austrittsgeschwindigkeit direkt an der Mundöffnung 4 – 5 m/s erreichen kann, was mit Literaturangaben gut übereinstimmt, siehe [12].



Strömungsfeld beim Husten ohne Maske (Stoßhusten über einen Atemzug)

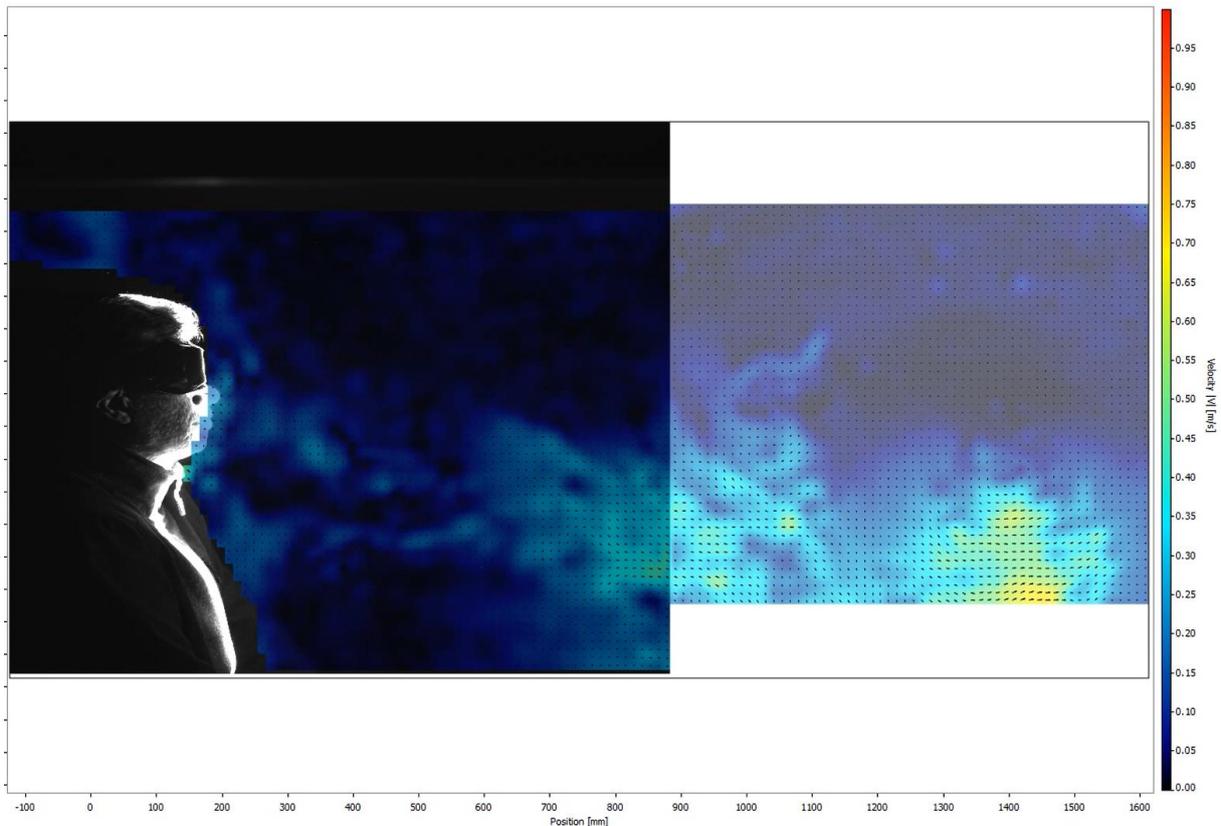
Die Experimente verdeutlichen, dass der Bereich, der beim Husten kontaminiert wird, ganz wesentlich von zwei Parametern abhängt:

1. von der Dauer des Hustenvorgangs und
2. von dem Winkel zur Horizontalen, unter dem ausgehustet wird.

Wird eine Lungenfüllung stoßartig ausgehustet, dann ist nach diesen Experimenten ein Sicherheitsabstand von 1,5 m ausreichend, da die Luftmenge in der Lunge nicht ausreicht, um bei typischen Strömungsgeschwindigkeiten einen größeren Bereich in Bewegung zu versetzen.

Bei länger anhaltenden Reizhusten kann der kontaminierte Bereich aber auch 2 – 3 m betragen. Um diesen Bereich zu kontaminieren ist es aber nicht nur notwendig länger anhaltend zu husten, sondern auch horizontal. Dies erfordert, dass der Kopf leicht nach hinten geneigt sein muss. Da diese Lage beim Husten eher unbequem ist, wird sie vermutlich eher selten auftreten, so dass die kontaminierte Luft vom Mund schräg nach unten strömt. Dies wurde auch in anderen Arbeiten beobachtet, siehe [13]. Dies bedeutet aber auch, dass selbst

wenn der Kopf eines erwachsenen Menschen bereits nach einem Meter nicht mehr im Bereich der kontaminierten Luft ist, dass ein kleines Kind, das 3 m von der Quelle entfernt steht oder in einem Kinderwagen sitzt, noch kontaminierte Luft abbekommen kann. Daher sollte der Sicherheitsabstand zu Personen, die langanhaltend husten, nicht kleiner als 3 m sein.



Strömungsfeld beim Husten ohne Maske (Reizhusten über mehrere Atemzüge)

Aufgrund der turbulenten Vermischung nimmt der Durchmesser des kontaminierten Bereiches mit dem Abstand rasch zu und damit die Konzentration der Tröpfchen ab, so dass eine Infektion mit zunehmendem Abstand immer unwahrscheinlicher wird. Hinzu kommt, dass die kleinen Tröpfchen sehr schnell verdunsten und die großen meist schnell absinken, wenn sie nicht ballistisch fliegen wie beim Spucken oder Niesen (siehe [14]). Für die Reichweite ist das Verhältnis aus Strömungsgeschwindigkeit der Luft zur Fallgeschwindigkeit des Tröpfchens wesentlich. Daher wird eine Infektion ab einer Distanz von 3 m relativ unwahrscheinlich sein. Weil zum Erreichen dieser Ausbreitungslängen mehrere Atemzüge direkt hintereinander ausgehustet werden müssen, besteht in der Regel genug Zeit, um sich mit ein paar Schritten von der hustenden Person zu entfernen. Diese dynamische Schutzstrategie ist sehr empfehlenswert, wenn die empfohlenen Sicherheitsabstände nicht eingehalten werden können oder nicht ausreichen um sich zu schützen.

Sollte eine Person in unmittelbarer Umgebung niesen, dann ist es zum eigenen Schutz auch in diesem Fall empfehlenswert, den Abstand zur niesenden Person sofort zu vergrößern, sobald der Niesvorgang visuell oder akustisch registriert wird! Solange die Tröpfchen nicht ballistisch fliegen, wie beim Spucken, besteht genug Zeit, um sich ein paar Schritte in Sicherheit zu bringen.

Zusammenfassung lässt sich feststellen, dass aus strömungsmechanischer Sicht folgende Sicherheitsabstände für die statischen Abstandsregeln zu empfehlen sind:

- 1 m Atmen durch die Nase
- 1 – 1,5 m Sprechen
- > 1,5 m Stoßhusten (ein Lungenvolumen)
- > 3 m Reizhusten (mehrere Lungenvolumina)

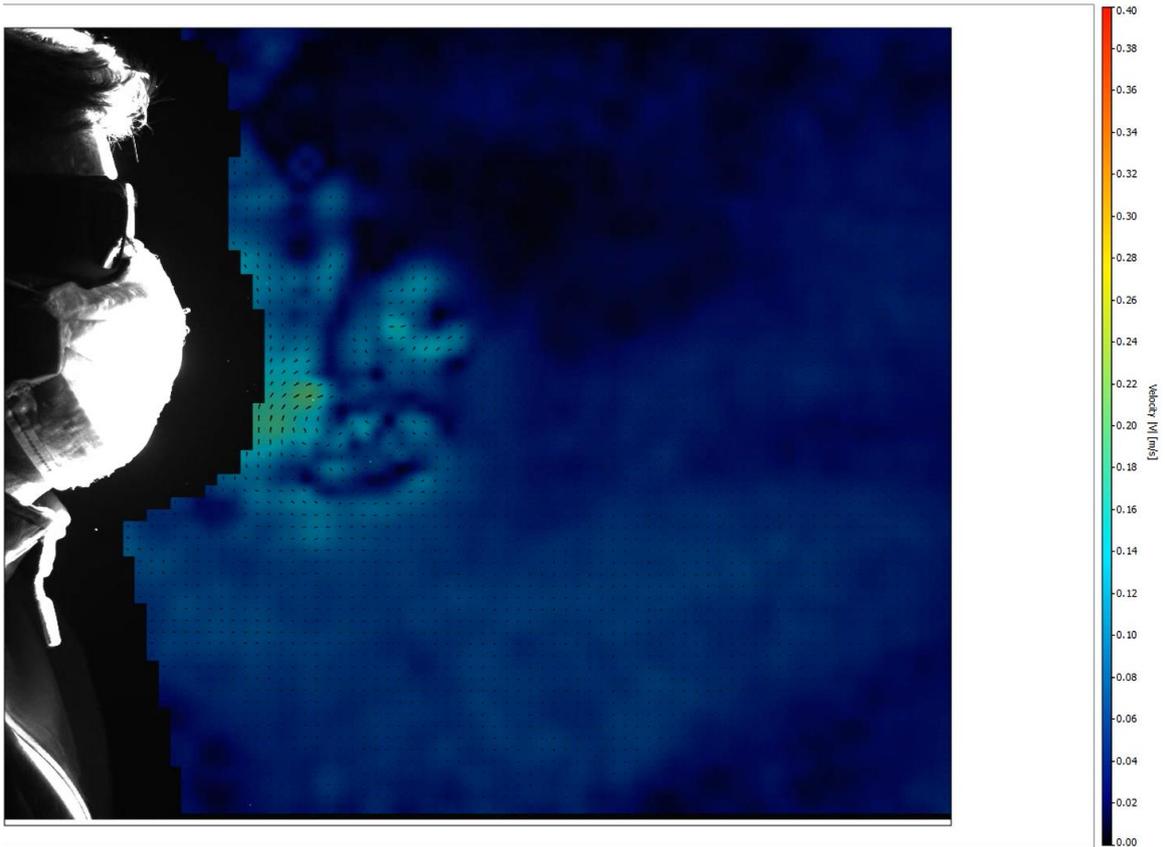
Die Angaben berücksichtigen bereits einen Sicherheitsfaktor, aber trotzdem ist zu empfehlen, situationsabhängig die Abstände dynamisch zu vergrößern, sobald sich eine mögliche Kontamination anbahnt oder der Ausstoß bereits eingesetzt hat. Es lässt sich schließlich schlecht abschätzen, wie lange der Ausstoß erfolgt und da die Länge des kontaminierten Bereiches mit der Ausstoßzeit zusammenhängt, lohnt es sich den Abstand aktiv zu vergrößern. In der freien Natur hingegen können die Abstandsregeln bei Wind und Turbulenzen verringert werden. Dabei muss aber die Windrichtung unbedingt berücksichtigt werden. Es ist empfehlenswert, sich im Freien bei Gesprächen mit einer Person so zu positionieren, dass beide seitlich vom Wind angeströmt werden.

B: Atmen, Sprechen und Husten mit Masken

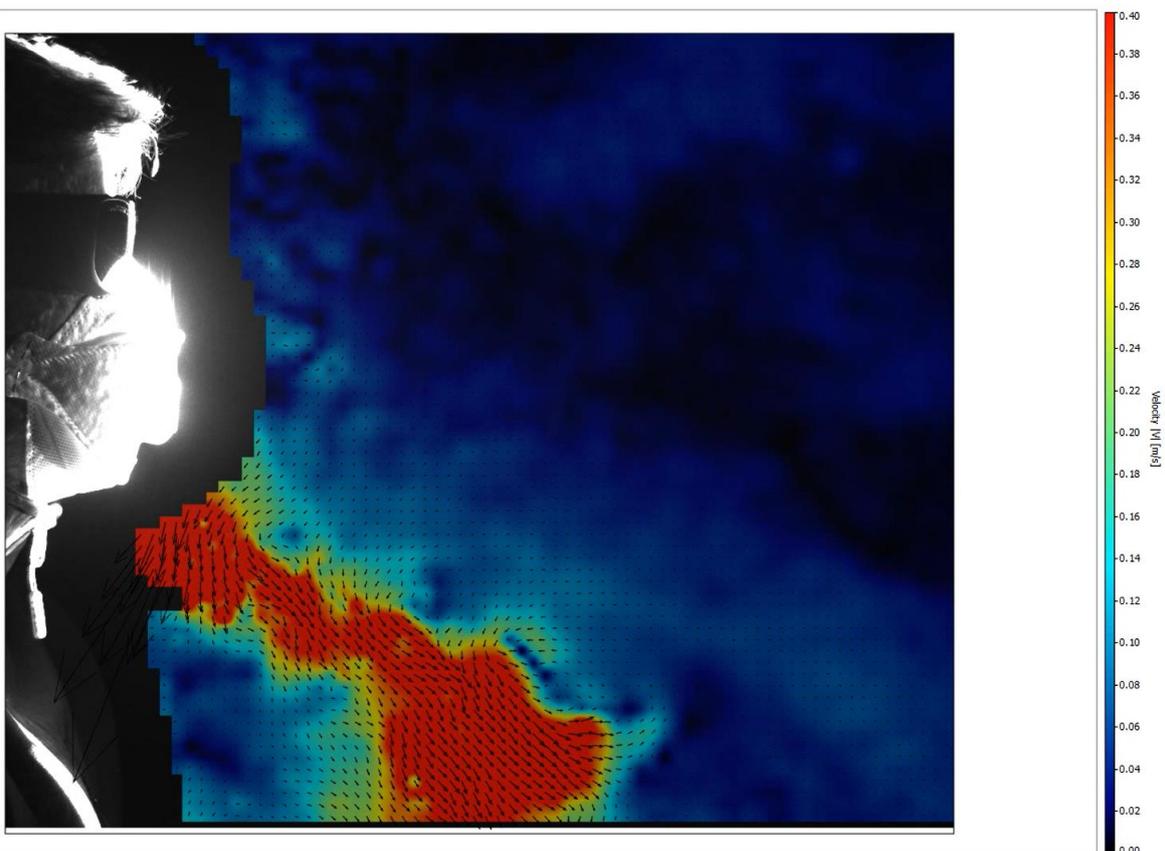
Es ist klar, dass die ermittelten Abstände im täglichen Leben oft nicht eingehalten werden können. Daher wird das Prinzip der sozialen Distanzierung gemäß der Abstandsregeln in der Praxis nicht mehr verlässlich funktionieren, sobald die staatlichen Beschränkungen gelockert werden. Insbesondere in Geschäften und öffentlichen Verkehrsmitteln werden die Personenabstände dann wieder deutlich kleiner werden, aber auch im Arbeitsleben und in der Freizeit bei kulturellen oder sportlichen Veranstaltungen.

Dass Schutzmasken einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbreitung der Atemluft beim Atmen, Sprechen und Husten haben, zeigen die folgenden Abbildungen. Es ist klar zu erkennen, dass selbst ein einfacher Mund-Nase-Schutz die Ausbreitung der Atemluft wirkungsvoll begrenzt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist hinter dem Schutz vernachlässigbar klein, so dass auch eine großräumige Verbreitung effektiv verhindert wird. Da beim Ausatmen, Sprechen oder Husten aber hinter der Maske der Druck vergrößert wird, kann die Luft um den Maskenrand strömen, wenn sie nicht fest genug am Gesicht sitzt. Trägerinnen und Träger dieser Masken sollte daher am besten frontal begegnet werden. Es ist aber zu berücksichtigen, dass zwar bei einer locker sitzenden Maske grundsätzlich viel Luft vorbeiströmen kann, aber je größer der Spalt am Maskenrand umso geringer wird die Austrittsgeschwindigkeit sein. Daher ist auch bei einer schlecht sitzenden Maske der kontaminierte Bereich erheblich reduziert verglichen mit der Situation ohne Maske. Bei der partikelfiltrierenden FFP2 Schutzmaske kann keine Luft am Maskenrand austreten. Daher ist eine Positionierung zu einer Person egal, die eine solche Maske trägt. FFP2 Masken mit Ventil lassen aber die ausgeatmete Luft ungehindert durch, siehe Abbildung. Daher dürfen Masken mit Ventil nie von Personen mit einer Infektion getragen werden. Unter Berücksichtigung dieser experimentellen Ergebnisse können die oben aufgeführten Abstandsregeln wie folgt modifiziert werden:

- 0,5 m Atmen durch die Nase
- 0,5 m Sprechen
- 1 m Stoßhusten
- 1,5 m Reizhusten



Strömungsfeld beim Husten mit Mund-Nase-Schutz



Strömungsfeld beim Husten mit FFP2 Maske mit Ventil

Damit ist deutlich, dass bereits recht einfache Masken die räumliche Ausbreitung der kontaminierten Luft räumlich stark begrenzen, wenn die Dichtigkeit des Materials mindestens der einer OP Maske entspricht. Eine Halbierung der Sicherheitsabstände hat bereits einen großen Effekt auf das Fassungsvermögen von öffentlichen Einrichtungen. Ein Stadion könnte bei einer Halbierung des Sicherheitsabstandes 4 Mal mehr Menschen aufnehmen ohne die Sicherheit der Menschen zu gefährden.

Ist jemand infiziert und trägt eine solche Maske, wird die Übertragung effektiv eingedämmt. Es ist daher richtig, dass infizierte Personen, die diese Masken tragen, ihre nicht infizierten Mitmenschen wirksam schützen, solange die verringerten Abstandsregeln einhalten werden. Wenn die Infizierten Personen hingegen keine Maske tragen, dann müssen sich die nicht infizierten Menschen deutlich besser schützen, da einfache Masken keinen Schutz vor einer Infektion bietet! Das ist ganz wichtig zu berücksichtigen bei der Auswahl einer geeigneten Schutzmaske.

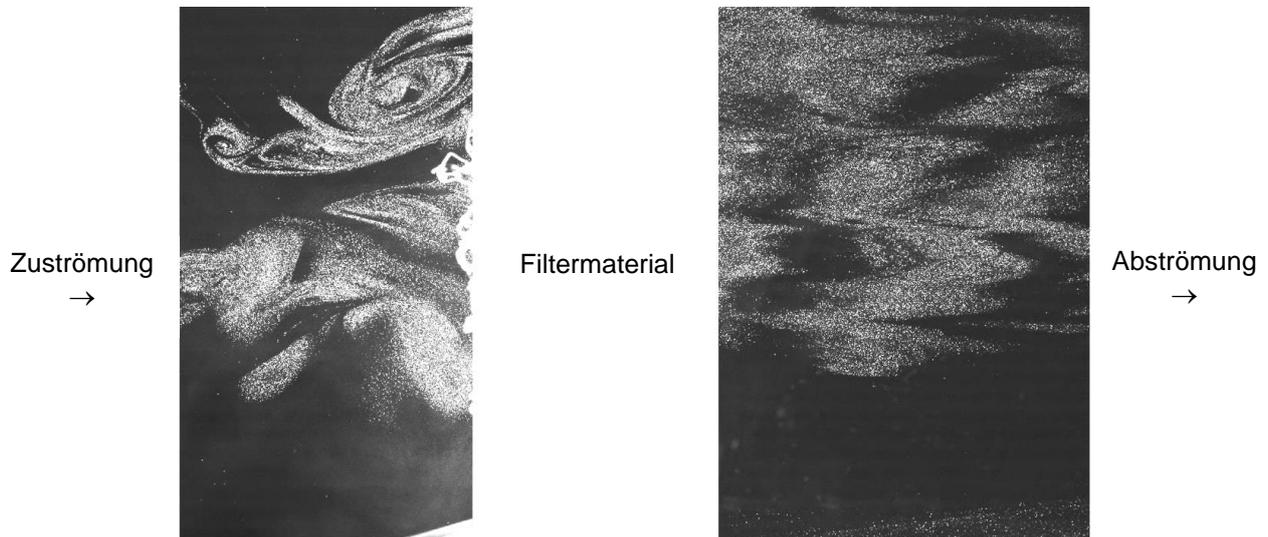
C: Filterwirkung von Masken und Haushaltsmaterialien

Die Frage ist nun, wie sich nicht infizierte Personen sicher schützen können, wenn die Abstandsregeln nicht eingehalten werden können und die infizierten Personen keine Maske tragen und folglich die Umgebung um sie herum mit Viren kontaminieren ist. In diesem Fall bieten nur FFP2 oder noch bessere Atemschutzmasken einen wirksamen Schutz, da diese auch für sehr kleine Tröpfchen nicht durchlässig sind. Da diese Schutzmasken aber derzeit nicht verfügbar sind wird nun analysiert, ob es handelsübliche Materialien gibt, die die Ausbreitung der Tröpfchen wirksam verhindern können.

Dazu wurde ein Versuchsaufbau genutzt, mit dem die offiziellen behördlich festgesetzten Prüfbedingung DIN EN 149 weitgehend eingehalten werden konnten. Die Zuführung der Tröpfchen mit einem Durchmesser von $0,1 - 2 \mu\text{m}$ erfolgte vor den Filtermaterialien. Die Materialien wurden fest vor dem Einlauf eines Strömungskanals montiert. Die Ansauggeschwindigkeit der Tröpfchen erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm. Neben dem Volumenstrom und dem Druckverlust über dem Filtermaterial wurde die Bewegung der Tröpfchen durch das Filtermaterial mit der Particle Image Velocimetry gemessen. Mit dieser Messmethode lässt sich sehr präzise die Bewegung der Tröpfchen vor und hinter dem Filtermaterial in einer Messebene beobachten, die auch in diesen Experimenten wieder mit einem Laserlichtschnitt erzeugt wurde. Der Bereich der Filter und der Kanalränder wird nicht dargestellt, da in diesen Bereichen keine relevante Strömungsinformation sichtbar ist. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts. Wenn die Intensität des von den Tröpfchen ausgehenden Streulichts vor dem Filtermaterial (linkes Bild) groß und dahinter (rechtes Bild) nahe Null ist, zeigt dies, dass die verwendeten Tröpfchen nahezu vollständig von dem Material herausgefiltert werden. Wenn hingegen hinter dem Filtermaterial keine Intensitätsverminderung feststellbar ist, gibt es überhaupt keine Filterwirkung.

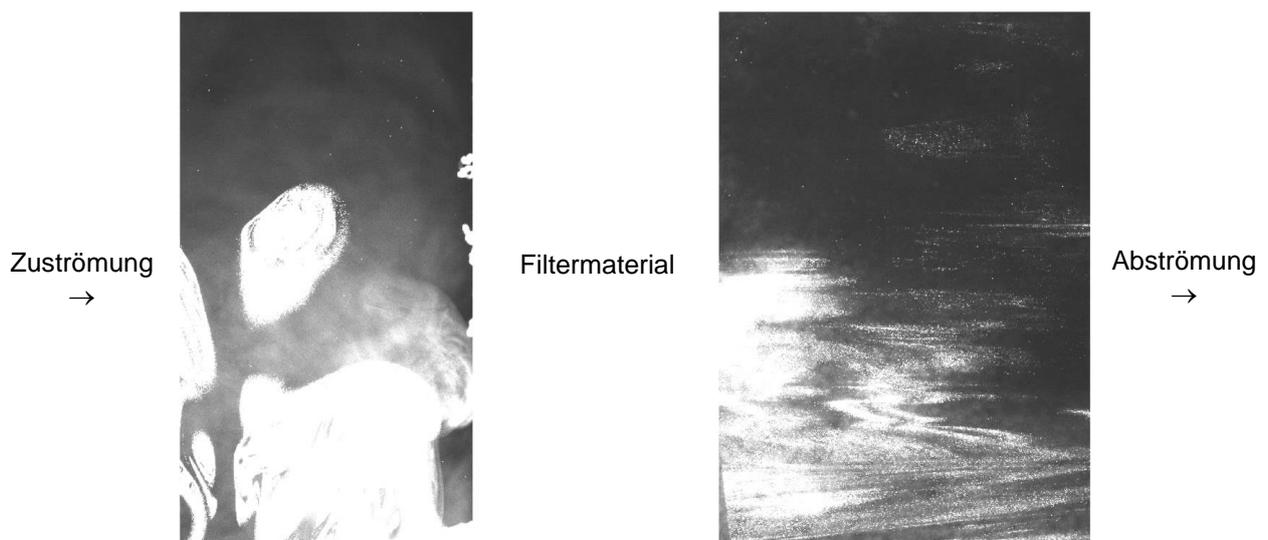
Zunächst wurde ein kommerzieller Mund-Nase-Schutz untersucht, der in Kliniken zum Schutz des Personals Verwendung findet. Der Vergleich der beiden Bilder zeigt, dass nahezu alle Tröpfchen das Filtermaterial ungehindert passieren. Das bedeutet, dass dieser Mund-Nase-Schutz keine signifikante Schutzwirkung bietet gegenüber den verwendeten Tröpfchen. Darüber hinaus schließen diese Masken nicht dicht mit dem Gesicht ab, sodass die Tröpfchen in der Umgebung beim Einatmen auch ungehindert am Maskenrand vorbei strömen und in die Lunge gelangen können. Wenn die Maske nicht richtig sitzt, wird das sogar die Regel sein, da die Luft zum großen Teil den Weg des geringsten Widerstands geht. Der Druckverlust des

getesteten Mund-Nase-Schutzes beträgt zwar nur rund 70 Pa, trotzdem wird er ausreichen, um die Luft hinreichend zu verzögern, so dass diese hauptsächlich um den Maskenrand in die Lunge strömt. Daher bieten diese Masken keinen wirksamen Schutz von der Übertragung des Virus über Tröpfchen, wenn die Umgebungsluft kontaminiert ist. Es ist daher dringend davon abzuraten, diesen Mund-Nase-Schutz in kontaminierten Bereichen zu tragen. Wenn dieser Schutz in solchen Bereichen getragen wird, müssen die Abstandsregeln zum eigenen Schutz unbedingt befolgt werden.



Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) beim Filtermaterial des Mund-Nase-Schutzes

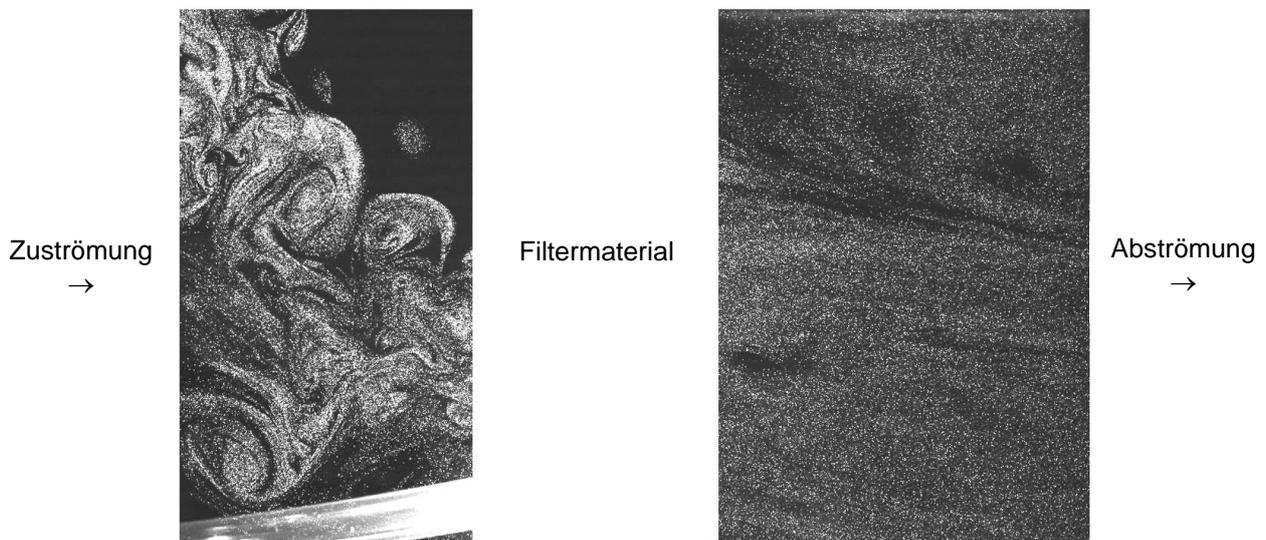
Im nächsten Experiment wurde der Mund-Nase-Schutz stoßweise mit Wasser besprüht, um die Frage zu beantworten, ob sich die Filterwirkung durch Feuchtigkeit ändert. Dieser Fall simuliert eine Maske, die lange getragen wurde. Es zeigt sich, dass die ohnehin schlechte Filterfunktion nicht nennenswert durch Feuchtigkeit beeinflusst wird, siehe Abbildung. Lediglich das Tragen der Maske wird unangenehmer und der Strömungswiderstand vergrößert sich, so dass immer mehr Luft an der Maske vorbei strömen wird.



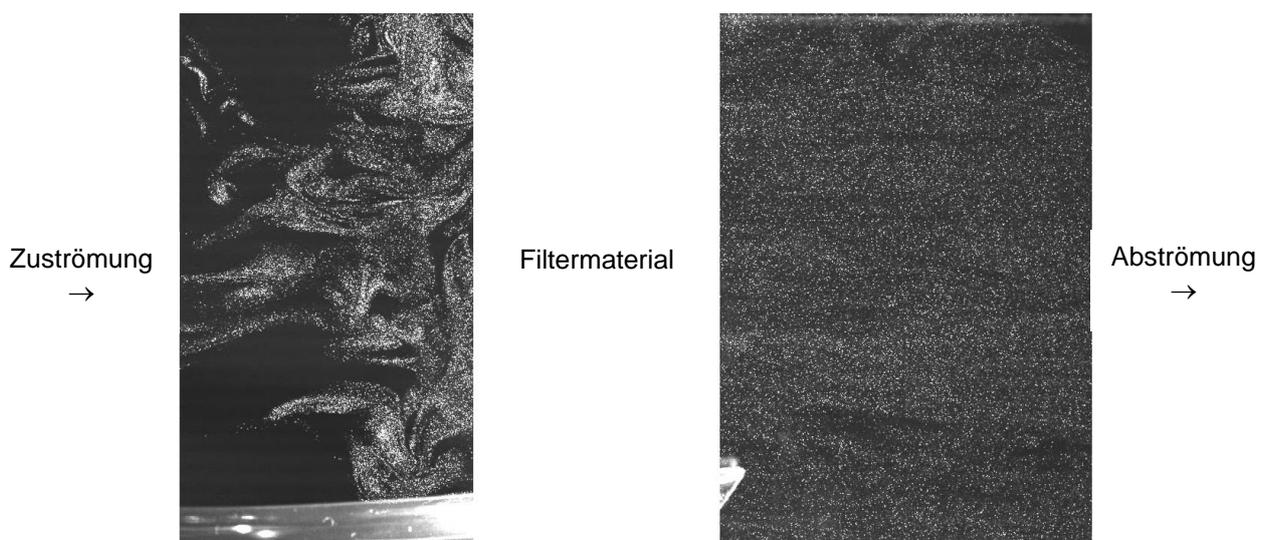
Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) beim Filtermaterial des feuchten Mund-Nase-Schutzes

Noch schlechter als der Mund-Nase-Schutz ist die Hygienemaske, siehe Abbildung. Diese ist sicherlich geeignet größere Objekte wie Haare, Schuppen oder ähnliches aufzufangen, aber Tröpfchen, wie sie beim Sprechen, Husten und Niesen entstehen, können von der Hygienemaske nicht aus dem Luftstrom herausgefiltert werden.

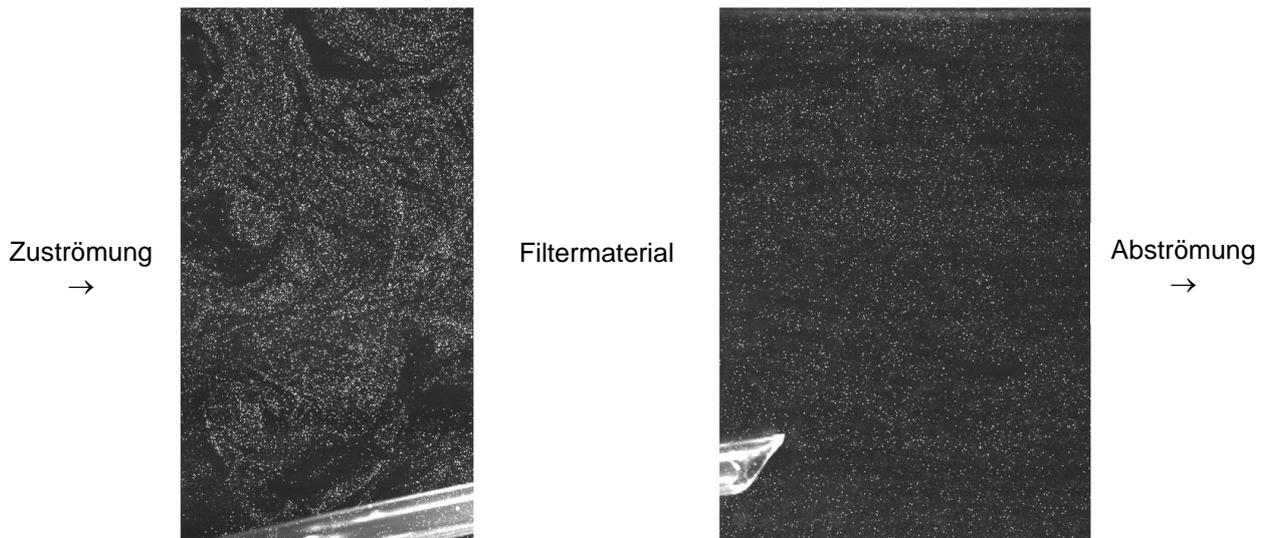
Materialien wie Haushaltspapier, Toilettenpapier mit 4 Lagen, Papiertaschentücher, Kaffeefilter bieten ebenfalls allesamt überhaupt keinen Schutz vor Tröpfchen in diesem Größenbereich. Die Materialien eignen sich sehr gut, um die inhomogenen Tröpfchenwolken zu homogenisieren aber sie zeigen keine Filterwirkung für die hier verwendeten Tröpfchen. Nur sehr große Tröpfchen werden durch diese Materialien zurückgehalten und daher eignen sich diese Materialien für ihren vorgesehenen Einsatzzweck, der auf der Verpackung steht, jedoch nicht als Filtermaterial für kleine Tröpfchen. Es muss daher dringend davon abgeraten werden, aus diesen Materialien Masken zu fertigen. Sie bieten überhaupt keinen wirksamen Schutz vor einer Tropfeninfektion!



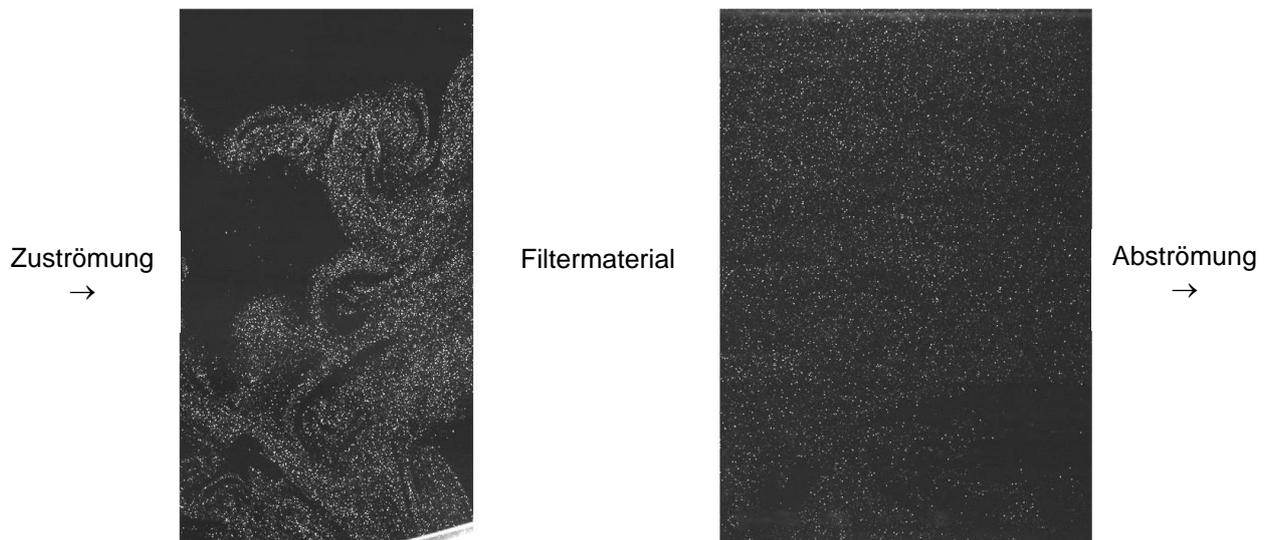
Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) von Toilettenpapier



Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) eines Papier-Küchentuchs

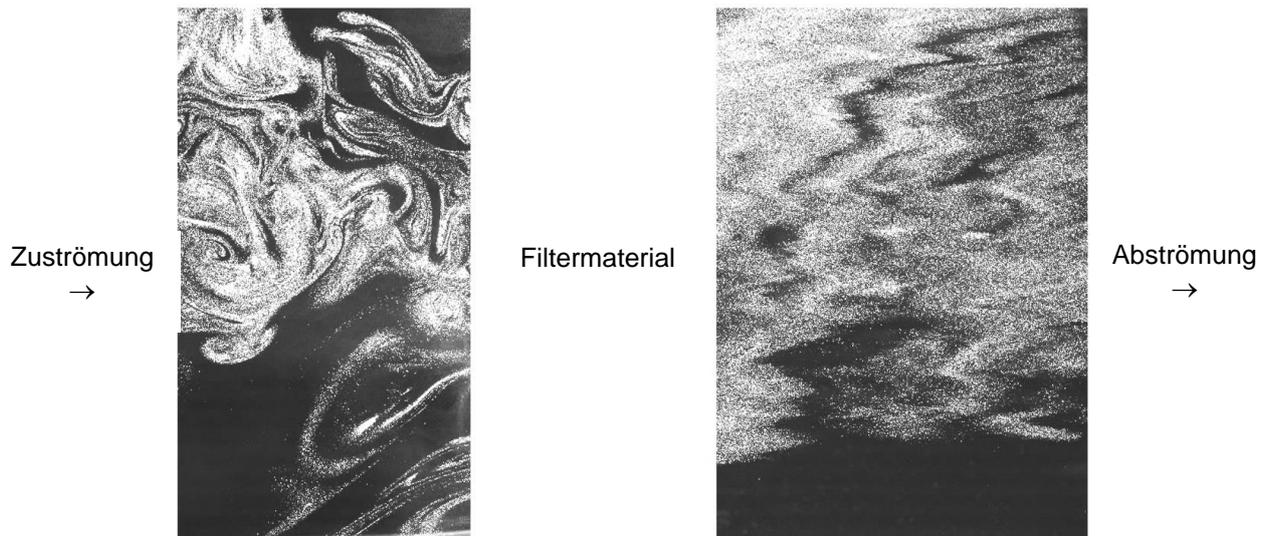


Wirksamkeit der Partikelfiltration (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) eines Kaffeefilters



Wirksamkeit der Partikelfiltration (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) eines Mikrofasertuchs

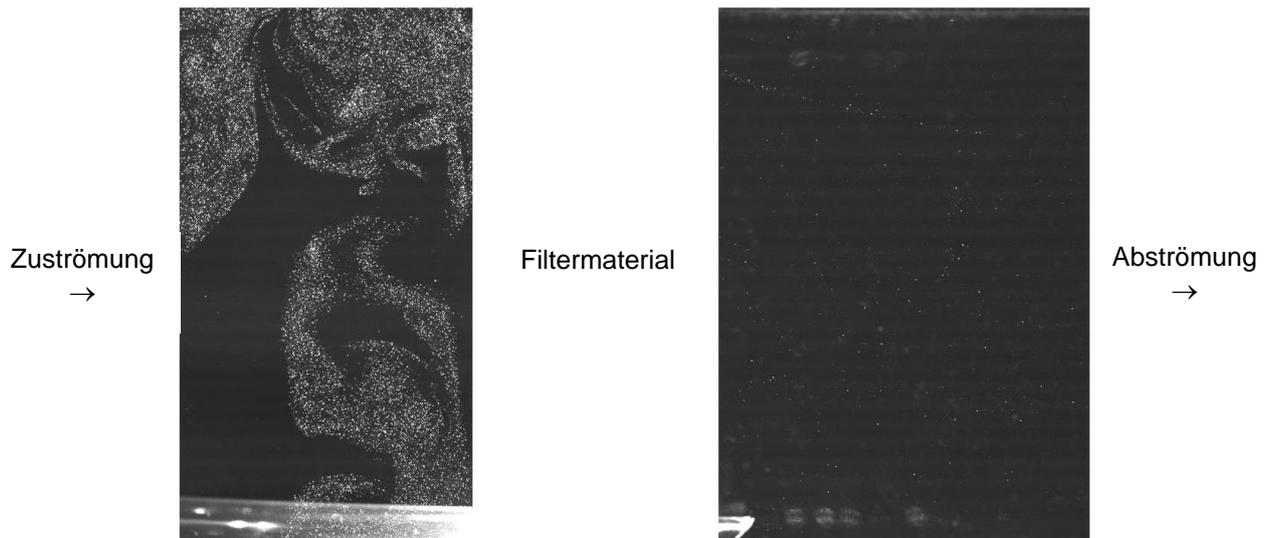
Weiterhin wurde ein sehr festes Vlies getestet, das als Schutzbelag auf Bügelbrettern dient. Das Material ist 4 mm dick, völlig undurchsichtig und hat einen Druckverlust von ca. 35 Pa. Die Filterwirkung ist aber auch bei diesem Material nahe Null. Es ist in dem Bild klar zu erkennen, dass die Tröpfchenwolken ungefiltert durch das Vlies hindurchströmen. Lediglich eine gewisse Umverteilung der Tröpfchen ist zu erkennen. Als Fazit lässt sich somit sagen, dass auch recht dicke und dichte Materialien keinerlei Schutz davor bieten, sich zu infizieren. Daher sollte man auch diese Materialien, Vliese und Stoffe nicht als Maskenmaterial verwenden, wenn man sich vor einer Tropfeninfektion schützen möchte. Auch mehrere Lagen eines dichten Stoffes haben keine Filterwirkung gegenüber den Tröpfchengrößen, die primär beim Atmen, Sprechen und Husten austreten.



Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) eines Vlieses

Gute Ergebnisse konnten nur mit dem Material eines hochwertigen Staubsaugerbeutels erzielt werden. Trotz der kleinen Tröpfchen, die in diesen Experimenten verwendet wurden, werden nahezu alle Tröpfchen zuverlässig herausgefiltert und folglich können auch keine größeren Tröpfchen das Material durchdringen. Laut Herstellerangaben filtert das Material 99,9% des Feinstaubes bis 0,3 μm . Einfache Staubsaugerbeutel hatten zwar eine bessere Filterwirkung als der Mund-Nase-Schutz und alle anderen getesteten Materialien, aber mit den hochwertigen Staubsaugerbeuteln konnten sie nicht annähernd mithalten was die Filterwirkung betrifft. Das Material hochwertiger Staubsaugerbeutel mit Feinstaubschutz ist daher grundsätzlich geeignet als Ausgangsmaterial für die Fertigung einer partikelfiltrierenden Maske¹. Tests mit Wasser haben gezeigt, dass die Schutzwirkung weitgehend bestehen bleibt, selbst wenn das Maskenmaterial tropfnass ist.

¹ Die Hersteller Swirl und DM raten ausdrücklich von einer Verwendung ihrer Staubsaugerbeutel zur Herstellung von Atemschutzmasken ab, siehe <https://www.melitta-group.com/de/Statement-der-Melitta-Group-zu-alternativen-Schutzmasken-3605,263.html>, 11.04.2020
<https://futurezone.at/science/drogeriemarkt-warnt-vor-masken-aus-staubsaugerbeutel/400809749>, 11.04.2020



Wirksamkeit der Partikelfilterung (Durchmesser ca. 0,1 – 2 μm) eines hochwertigen Staubsaugerbeutels

Ob eine Maske aus diesem Material angenehm tragbar ist, lässt sich aus diesen Experimenten nicht ableiten. Daher wird im Folgenden analysiert, ob aus dem Material grundsätzlich eine Maske gefertigt werden kann, die angenehm sitzt und die Atmung möglichst wenig erschwert.

3. Fertigung einer Maske

Bei der Fertigung einer Maske sind zwei wichtige Aspekte zu berücksichtigen.

Erstens muss die Passform sehr gut auf die Größe und Form des Gesichts abgestimmt sein. Wenn die Maske nicht gut und dicht am Gesicht anliegt, dann trägt sie sich nicht nur unangenehm, sondern es kann auch kontaminierte Luft durch Spalte am Maskenrand ungehindert ein- und ausströmen. Man muss sich wieder klarmachen, dass die meiste Luft den Weg des geringsten Widerstandes gehen wird. Daher wird die meiste Luft durch die Öffnungen strömen, wenn welche vorhanden sind. In diesem Fall hat die Maske keine Schutzfunktion. Es ist daher sehr wichtig darauf zu achten, dass z.B. durch einen Bart, lange Haare oder Schmuck keine Öffnungen am Maskenrand entstehen. Ferner ist darauf zu achten, dass die Maske auch beim Husten und Niesen fest anliegt. Beim Husten und Niesen tritt die Luft sehr schnell aus dem Mund aus und das erhöht den Druck innerhalb der Maske. Wird der Druck zu groß, dann kann die Maske sich vom Gesicht lösen und die Luft ungefiltert austreten. Ist man nicht infiziert ist das irrelevant. Ist man jedoch infiziert wäre dies fatal für die ungeschützten Mitmenschen in der Umgebung. Das muss durch eine gute Passform und eine solide Befestigung an Kopf unbedingt verhindert werden!

Zweitens muss die Größe der Maske richtig dimensioniert sein. Berücksichtigt man nur den Materialeinsatz, dann würde man eine Minimallösung anstreben, um aus dem verfügbaren Material möglichst viele Masken fertigen zu können. Die kommerziellen Masken sind aber recht voluminös gestaltet und das hat einen guten Grund. Die Lunge benötigt ohne körperliche Belastung pro Atemzug ca. 0,5 - 0,75 Liter Luft. Beim Sport oder Niesvorgang erhöht sich das Volumen pro Atemzug natürlich deutlich und auch das Tragen einer Maske führt dazu, dass tendenziell etwas mehr Luft eingeatmet wird. Dieses Volumen muss das Filtermaterial durchströmen. Je kleiner die Fläche des Filters ist, desto schneller muss die Luft während eines Atemzugs durch den Filter strömen. Nun ist es aber so, dass der Strömungswiderstand, der beim Ein- und Ausatmen direkt gespürt wird, mit dem Quadrat der Geschwindigkeit

zunimmt. D.h., wenn die Fläche der Maske halbiert wird, dann verdoppelt sich die Strömungsgeschwindigkeit und folglich vervierfacht sich der Strömungswiderstand. Da es umso einfacher ist durch die Maske zu atmen je kleiner der Strömungswiderstand des Filtermaterials ist, sollte die Fläche der Maske hinreichend groß ausgeführt werden. Wer bereits ohne Maske schlecht Luft bekommt sollte nicht am Material sparen.

Kommen wir nun zur Fertigung. Es gibt viele Möglichkeiten eine wirksame Atemschutzmaske herzustellen. Wir stellen hier aber nur eine ganz einfache Variante vor. Bei der Fertigung wird auf eine optimale Funktion, einen minimalen Materialbedarf und eine einfache Fertigung ohne Spezialwerkzeug (nur Schere und Locher) geachtet. Bzgl. Design und der kreativen Farbgestaltung kann jeder der Phantasie freien Lauf lassen.

Zuerst wird aus dem Staubsaugerbeutel² ein Viertelkreis geschnitten und umgekrempelt, so dass die inneren Flächen nach außen kommen³. Jetzt kann entschieden werden, ob die Naht auf der Nase (Haifischform) oder auf der Wang (Entenschnabelform) sitzen soll. Die offenen Seiten, die auf der Nase und am Kinn sitzen sollen werden jeweils etwas abgerundet, um eine gute Passform zu erzielen. Der auf der Nase sitzende Bereich wird stärker gekürzt, damit die Augen nicht verdeckt werden und der Metallstreifen gut auf dem Nasenbein sitzt.

Die offenen Maskenränder werden mit flexiblem Klebeband fixiert⁴. Kinesiologieklebebänder mit Baumwolloberfläche eignen sich recht gut, da sie angenehm auf der Haut liegen und sehr fest kleben. Ferner sind sie für die Haut hergestellt und daher gut verträglich. Um einen guten Sitz und einen dichten Abschluss über der Nase zu gewährleisten ist es sehr wichtig, einen biegsamen Metallstreifen im Nasenbereich mit einzukleben. Der Metallstreifen sollte rund 10 cm lang sein und nicht zu dünn. Fertig dimensionierte Metallstreifen sind in Schnellheftern oder Heftklammern verbaut. Geeignete Metallstreifen können aber auch aus dem Blech von Keksdosen ausgeschnitten werden. Der Metallstreifen muss auf der Außenseite der Maske sitzen und fest aufgeklebt werden. Wenn er auf der Innenseite befestigt wird, können kleine Metallspitzen und die Kanten an der Nase drücken. Ferner kann die Dichtigkeit der Maske im

² Wenn Staubsaugerbeutel als Masken verwendet werden, weil keine FFP2 Maske zu Verfügung steht und dringend ein geeigneter Schutz vor einer Tröpfcheninfektion benötigt wird, sollte nur übergangsweise und als Notbehelf ein Staubsaugerbeutel verwendet werden, der frei von chemischen Zusätzen ist, um mögliche Reizungen zu verhindern. Achten Sie unbedingt darauf, dass der Staubsaugerbeutel (oder anderes zum Herstellen einer Maske verwendetes Material) frei von schädlichen Substanzen ist, die beim Aufschneiden und späteren Tragen an die Haut, die Schleimhäute und in die Atemwege gelangen können.

Die Hersteller Swirl und DM raten ausdrücklich von einer Verwendung ihrer Staubsaugerbeutel zur Herstellung von Atemschutzmasken ab, siehe

<https://www.melitta-group.com/de/Statement-der-Melitta-Group-zu-alternativen-Schutzmasken-3605,263.html>, 11.04.2020

<https://futurezone.at/science/drogeriemarkt-warnt-vor-masken-aus-staubsaugerbeutel/400809749>, 11.04.2020

³ Wir empfehlen ausdrücklich die Außenseite des Staubsaugerbeutels als Innenseite für die Atemschutzmaske zu verwenden und zwar aus Folgendem Grund. Um eine Zulassung zu erhalten, dürfen die Staubsaugerbeutel keinen Staub oder Teile des Beutels selber (Vlies, Glasfaser, Kunststofffasern oder andere Filtermaterialien und Zusatzstoffe etc.) nach draußen in die Raumluft freisetzen. Da die Nutzer der Maske von diesen Stoffen auch nichts einatmen möchten, empfehlen wir dringend die Außenseite des Beutels als Innenseite der Maske zu verwenden.

⁴ Es ist sehr wichtig die Schnittflächen des Beutels mit einem kräftigen Klebeband zu verkleben, damit auch aus dem Innern des Beutelmaterials nichts nach außen freigesetzt werden kann.

Nasenbereich beeinträchtigt werden. Für das Aufkleben eignet sich ebenfalls das starke Klebeband, das auch für den Maskenrand verwendet wird.



Benötigte Materialien zur Fertigung einer Maske und die verschiedenen Fertigungsstufen von links oben nach rechts unten

Für die Befestigung der Maske am Kopf sind Bänder oder besser ein Gummizug erforderlich. Zur Befestigung sollten auf jeder Seite zwei Löcher mit einem Abstand von einigen Zentimetern in das Material gestanzt oder gelocht werden, um einen angenehmen und luftdichten Sitz zu gewährleisten. Die richtige Position der Löcher lässt sich durch leichtes Ziehen an den vermuteten Befestigungsstellen ermitteln. Wenn die aufgesetzte Maske beim Ziehen an den vermuteten Befestigungspositionen angenehm sitzt und keine Spalte am Maskenrand auftreten, ist die optimale Befestigungsposition für den Gummizug gefunden.

Die Länge der Gummizüge müssen an die Kopfgröße angepasst sein. Um die richtige Länge zu ermitteln, wird der erste Gummizug auf der einen Seite der Maske festgebunden oder geheftet und dann wird die Maske aufgesetzt. Danach wird der Gummizug um den Kopf geführt und an der anderen Befestigungsstelle der Maske so festgehalten, dass die Maske angenehm und spaltfrei sitzt. Jetzt kann die Maske abgesetzt werden, wobei die Finger an der richtigen Position des Gummis verbleiben müssen, um die korrekte Befestigung an der Maske zu ermöglichen. Der Vorgang wird wiederholt, um auch die Länge des zweiten Gummibandes zu ermitteln. Es ist wichtig, dass ein Gummiband oberhalb der Ohren und eins unterhalb verläuft, um einen festen Sitz auch beim Hoch- und Runterschauen zu erreichen oder wenn die Maske belastet wird, sollte man sich ins Gesicht fassen.

Sind die Gummizüge beidseitig befestigt, ist die Maske in ihrer einfachsten Ausführung fertig und kann aufgesetzt und getestet werden. Nach dem Aufsetzen der Maske muss zunächst der Nasenbügel mit beiden Händen in die passende Form gebogen werden. Um den Dichtsitz der Maske zu überprüfen, hält man die Maske leicht mit beiden Händen fest ohne den Sitz zu verändern und atmet kräftig aus. Wenn Luft durch Spalte am Maskenrand strömt, muss der Nasenbügel oder der Gummizug angepasst werden. Wenn trotz dieser Maßnahmen keine Dichtigkeit erreicht werden kann, ist die Maske zu groß. In diesem Fall kann die Maske im Kinnbereich etwas Richtung Maskenspitze aufgeschnitten werden und durch Überlappung kann die Maskengröße angepasst werden. Ist die richtige Größe gefunden können die

überlappenden Bereiche mit dem Klebeband verbunden werden. Wenn die Maske bei der Nutzung nass wird, sich der Atemwiderstand erhöht oder die Maske beschädigt wird, muss sie gewechselt werden. Zur Sicherheit sollten man auch immer mehrere Masken mitnehmen, um stets Ersatz zu haben. Ein paar Masken können unterwegs ja auch verschenkt werden.

Die partikelfiltrierende Schutzmaske ist fertig und kann im Alltag verwendet werden. Zur Verschönerung kann über die Maske auch ein Stofftuch gezogen werden.

Beim Verwenden der Masken sind die folgenden Punkte sehr wichtig zu beachten:

1. Um einen wirksamen Schutz vor einer Infektion über den Mund und die Nase zu gewährleisten, müssen geeignete partikelfiltrierende Halbmasken verwendet werden und kein einfacher Mundschutz, der nur das Gefühl von Sicherheit vermittelt, aber nicht verlässlich schützt.
2. Die Masken müssen mit sauberen Händen richtig angelegt werden, da sie sonst keinen Schutz bieten. Auf einen guten Tragekomfort sollte geachtet werden und es muss geprüft werden, ob Spalte vorhanden sind und Beschädigungen vorliegen.
3. Um die Ausbreitung des Virus wirkungsvoll einzudämmen, müssen die Masken immer aufgesetzt werden, sobald die Abstandsregeln nicht mehr eingehalten werden können, egal ob bei der Arbeit, beim Einkaufen, auf Reisen, bei kulturellen Aktivitäten aber auch in der Freizeit.
4. Die Masken sollten aber nur dann getragen werden, wenn sie wirklich erforderlich sind und nie länger als 75 Minuten am Stück. Bevor man sie wieder aufsetzt, sollte eine hinreichend lange Erholungsdauer von ca. 30 Minuten eingehalten werden und sie sollten höchstens 5 x 75 Minuten pro Tag genutzt werden.
5. Wird man von jemandem direkt angehustet, dann empfiehlt es sich sofort langsam auszuatmen. Dadurch erhöht sich der Druck unter der Maske und nichts kann mehr von außen einströmen.
6. Zusätzlich zur Maske ist ganz wichtig, dass die allgemeinen Hygienemaßnahmen und Abstandsempfehlungen eingehalten werden. Dies gilt insbesondere beim Essen und Trinken, da dafür die Maske abgenommen werden muss. Die Hygienemaßnahmen schützen aber auch vor Schmierinfektionen, die z.B. beim Auf- und Absetzen der Masken entstehen können.
7. Ergänzend ist das Tragen von Schutzbrillen und leichten Handschuhen zu empfehlen, um eine Infektion über die Augen oder die Hände zu vermeiden. Gerade beim Einkaufen können über das Wechselgeld oder Produkte, die von den Menschen per Hand auf ihre Qualität überprüft werden, wie z.B. Obst, Viren übertragen werden und zur Infektion führen.
8. Die Masken wurden von keiner staatlichen Behörde geprüft und daher ist sie natürlich auch **nicht** zertifiziert. Die selbst hergestellten Masken sind daher als sinnvolle Alternative zu sehen, bis wieder ausreichend FFP2 und FFP3 Masken für alle verfügbar sind und nicht als Ersatz.

4. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass die direkte persönliche Isolierung mit geeigneten Atemschutzmasken ohne Zweifel technisch möglich ist. Die Übertragung des Virus dort zu bekämpfen, wo sie wirklich stattfindet erscheint daher sehr sinnvoll und angebracht.

Wenn alle konsequent mitmachen, dann könnten auch die Beschränkungen wieder gelockert werden und das Leben könnte ohne große Einschränkungen weitgehend normal weitergeführt werden. Anstatt sich von allen Menschen zu distanzieren wäre es doch viel besser, wenn man sich nur von denen distanzieren müsste, die keine geeigneten Masken tragen.

Da es aber noch andere Übertragungswege gibt, müssen die empfohlenen Hygienemaßnahmen unbedingt beibehalten werden. Auch im Auto werden die Insassen im Falle eines Unfalls durch vielfältige Einrichtungen geschützt (Gurt, Airbags, Knautschzone, Kopffreiheit, Beinfreiheit, ...).

Die Experimente haben aber auch eindeutig gezeigt, dass die meisten Materialien im Haushalt überhaupt keinen Schutz bieten und daher völlig ungeeignet sind als Material für Schutzmasken. Das anzuerkennen ist extrem wichtig! Nur wenn das richtige Material verbaut wird, dann kann die Maske einen wirksamen Schutz bieten! Es ist wünschenswert, dass in einigen Wochen ausreichend FFP2 Masken für die gesamte Bevölkerung zur Verfügung stehen. Aufgrund der begrenzten Fertigungskapazitäten und des großen Bedarfs in den Krankenhäusern und Arztpraxen wird dies aber wohl nicht erreichbar sein. Es wäre daher empfehlenswert, wenn der Bevölkerung übergangsweise geeignetes Filtermaterial für die Maskenfertigung bereitgestellt wird, damit sie sich selber mit geeigneten Materialien schützen kann. Spätestens wenn die Zahl der SARS-CoV-2 Infektionen in die Millionen geht ist dies absolut notwendig und überlebenswichtig für viele Menschen. Wenn 10 % der Bevölkerung sich bereit erklären würden eine Stunde zu investieren, um einfache Masken zu fertigen, dann gäbe es bereits 100 Millionen partikelfiltrierende Schutzmasken für die Bevölkerung. Die Versorgung der Bevölkerung mit partikelfiltrierenden Schutzmasken könne auf diese Weise in Eigenverantwortung gesichert werden. Das Verteilungsproblem ließe sich durch Verschenken der Masken an Freunde, Nachbarn und Mitmenschen sehr einfach lösen.

Wenn die umfassenden Beschränkungen der Regierung aufgehoben werden und die Infektionsrate wieder rasant ansteigt, dann sollte diese enorme Fertigungskapazität der Bevölkerung zu ihrem eigenen Schutz mobilisiert werden, bis ausreichend kommerzielle partikelfiltrierende Schutzmasken verfügbar sind. Der Staat müsste aber dafür sorgen, dass die Bevölkerung ausreichend mit geeignetem Filtermaterial versorgt wird.

Die technische Lösung des Pandemieproblems mit partikelfiltrierenden Schutzmasken ist nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll, bis ein wirksamer Impfstoff gefunden ist. Die alternative Lösung, also eine unkontrollierte oder kontrollierte Infektion der Bevölkerung, wäre eine menschliche Tragödie in Anbetracht des tödlichen Risikos von rund 1:100. Ein vergleichbares Risiko gehen freiwillig nur Astronauten und Soldaten im Kriegsgebiet ein! Diese Strategie wäre nur dann menschenwürdig, wenn ein hoch wirksames Medikament verfügbar ist. Es bleibt zu hoffen, dass die Regierenden den richtigen Weg wählen und großen Schaden vom Volk abwenden.

Literatur

- [1] Ferguson NM et al. (2020) Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. Imperial College COVID-19 Response Team. <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/Imperial-College-COVID19-NPI-modelling-16-03-2020.pdf>, abgerufen am 04.04.2020
- [2] <https://www.welt.de/wirtschaft/article206603525/Beatmungsgeraete-Draeger-soll-10-000-Stueck-in-kuerzester-Zeit-bauen.html>, abgerufen am 04.04.2020
- [3] Verity R et al. (2020) Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: a model-based analysis. *Lancet Infect Dis*, [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30243-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30243-7)
- [4] WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 30 March 2020, <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---30-march-2020>, abgerufen am 04.04.2020
- [5] Drosten broadcast 25, NDR Info Corona Virus Update vom 31.03.2020, <https://mediandr-a.akamaihd.net/download/podcasts/podcast4684/AU-20200331-1323-5200.mp3>
- [6] Leung NHL et al. (2020) Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nature Medicine*, <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>
- [7] https://www.lgl.bayern.de/downloads/arbeitsschutz/arbeitsmedizin/doc/merkblatt_mns_atemschutz.pdf, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, abgerufen am 04.04.2020
- [8] Zayas G et al. (2012) Cough aerosol in healthy participants: fundamental knowledge to optimize droplet-spread infectious respiratory disease management. *BMC Pulmonary Medicine* 12:11, <http://www.biomedcentral.com/1471-2466/12/11>
- [9] Han ZY et al. (2013) Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *J R Soc Interface* 10:20130560, <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.0560>
- [10] Raffel M et al. (2018) *Particle Image Velocimetry*. Springer Verlag
- [11] Rensink D (2004) Verdunstung akustisch levitierter schwingender Tropfen aus homogenen und heterogenen Medien. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg
- [12] Nishimura H et al. (2013) A New Methodology for Studying Dynamics of Aerosol Particles in Sneeze and Cough Using a Digital High-Vision, High-Speed Video System and Vector Analyses. *PLoS ONE* 8:e80244, doi:10.1371/journal.pone.0080244
- [13] Tang JW et al. (2009) A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *J R Soc Interface* 6:S727–S736, doi:10.1098/rsif.2009.0295.focus
- [14] Lok C (2016) Where Sneezes Go. *Nature* 534:24-26