



Gesellschaft für Aerosolforschung
Společnost pro výzkum aerosolů

Souborné stanovisko Společnosti pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung)

k porozumění významu aerosolů při šíření infekce SARS-CoV-2 (český překlad pod záštitou České aerosolové společnosti)

originální (německá) a anglická verze

česká verze

Kontakt a tiskové zprávy: positionspapier@gaef.de

aerosol-covid-preklad@icpf.cas.cz

Další informace o GAeF: www.info.gaef.de

Další informace o ČAS: cas.icpf.cas.cz/index_cz.php

25. února 2021



Úvod k českému překladu

Od počátku pandemie koronaviru uplynula již řada měsíců. Mnohé vědecké týmy po celém světě se dlouhodobě věnují výzkumu aerosolů a během koronavirové pandemie intenzivně zkoumaly veškeré aspekty šíření viru v populaci. Výsledkem jejich práce jsou stovky vědeckých článků. Značné množství poznatků spadá do oblasti vědy o aerosolech, která je v České republice doménou České aerosolové společnosti (ČAS).

Jako členové ČAS jsme považovali za svou povinnost zprostředkovat nejpodstatnější vědecká zjištění v českém jazyce ve formě přehledného textu, který poslouží jak veřejnosti, tak zejména lékařům, hygienikům, politikům a manažerům jako podklad pro stanovení smysluplných opatření pro zamezení šíření viru.

Díky dobrým vztahům s německou Společností pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung) jsme získali svolení přeložit jejich vynikající text, který právě takovým shrnutím nejnovějších poznatků je. Děkujeme německým kolegům za jejich vstřícnost a věříme, že tento dokument přispěje k postupnému utlumení epidemie.

Česká aerosolová společnost se s textem uvedeným v tomto dokumentu ztotožňuje a podporuje rozšiřování vědecky podložených informací sloužících k hlubšímu porozumění problémů při šíření infekce a s ní spojených preventivních opatření.

Výbor ČAS a členové překladatelského týmu

Na českém překladu se podíleli:
Doc. Ing. František Lízal, Ph.D., VUT v Brně
Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc., VUT v Brně
Prof. Ing. Jan Jedelský, Ph.D., VUT v Brně
Mgr. Jiří Šperka, Ph.D., ČMI
Ing. Miloslav Bělka, Ph.D., VUT v Brně
Ing. Jakub Ondráček, Ph.D., ÚCHP AV ČR (tajemník ČAS)

Představení České aerosolové společnosti (ČAS)

Česká aerosolová společnost (ČAS) vznikla z Pracovní skupiny pro výzkum aerosolů České společnosti chemického inženýrství při příležitosti pořádání Evropské aerosolové konference (EAC) v roce 1999 v Praze. Od roku 2002 je ČAS členem Evropské aerosolové asociace (EAA). Jak se praví v jejích stanovách, ČAS sdružuje převážně vědce z výzkumných ústavů a univerzit s těmito cíli:

- podporovat spolupráci ve všech oblastech výzkumu aerosolů,
- stimulovat šíření informací o aerosolech jak mezi členy, tak směrem k veřejnosti prostřednictvím setkání a publikací,
- na všech úrovních podporovat vzdělávání v oblasti aerosolů,
- podporovat mezinárodní spolupráci.

Česká aerosolová společnost pořádá výroční konferenci České aerosolové společnosti, kde se každoročně scházejí odborníci nejenom z České republiky. ČAS také pořádala dva ročníky Evropské aerosolové konference (EAC), v roce 1999 a 2013.

Více informací je k dispozici na http://cas.icpf.cas.cz/index_cz.php.



Obsah

Představení Společnosti pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung)	2
Shrnutí	3
1. Cíl tohoto dokumentu	7
2. Co je aerosol?	8
3. Základy fyziky aerosolů ve vztahu ke covidu-19	9
4. Kdy a jak jsou vydechovány viry nebo aerosol obsahující viry?	13
5. Způsoby, jak snížit koncentraci virů ve vnitřních prostorech	17
6. Účinnost osobních ochranných prostředků dýchacích cest	25
7. Úkoly pro současný výzkum	32
8. Autoři a signatáři	34
9. Literatura	38

Představení Společnosti pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung)

Německá Společnost pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung, GAeF) byla založena roku 1972 jako nezisková organizace sdružující průkopníky v oblasti výzkumu aerosolů zejména v německy mluvících zemích (Německo, Rakousko, Švýcarsko). Cílem společnosti je podporovat výzkum aerosolů na národní i mezinárodní úrovni. GAeF pravidelně organizuje Evropské aerosolové konference, jichž se účastní až 1000 odborníků. Poslední konference (EAC – European Aerosol Conference) se konala online formou v září roku 2020. Členy GAeF jsou nejvýznamnější domácí i zahraniční vědci, ale také studenti z různých oblastí výzkumu aerosolů (atmosférické aerosoly, aerosolová technologie, technologie měření aerosolů, lékařské aerosoly, základní výzkum). GAeF má zhruba 350 členů z 35 zemí a spolupracuje se všemi evropskými aerosolovými společnostmi sdruženými v European Aerosol Assembly (<https://www.info.gaef.de/ea>) a také se společnostmi sdruženými ve světové aerosolové organizaci International Aerosol Research Assembly (IARA, <http://www.iara.org>).

Více informací o GAeF naleznete na <https://www.info.gaef.de>

The logo for GAeF (Gesellschaft für Aerosolforschung) features a stylized graphic of three overlapping circles of varying sizes on the left, followed by the letters 'GAeF' in a large, bold, sans-serif font.

Shrnutí

Schopnost virů šířit se formou aerosolu byla prokázána mnoha vědeckými studii. Jako aerosol označujeme směs vzduchu a v něm rozptýlených pevných či kapalných částic. Pro pochopení role aerosolů při šíření viru SARS-CoV-2 je důležité porozumět procesům, které se v aerosolech odehrávají, k čemuž by měl přispět také tento text. Zásadní je především definice samotného termínu „aerosol“ a fyzikálně-chemických procesů s ním spojených. V tomto textu jsou vyloženy pouze nejpodstatnější základy. Pro hlubší pochopení složitějších jevů spojených s aerosoly odkazujeme čtenáře na literaturu uvedenou v závěru. Tento dokument shrnuje velké množství vědeckých prací, které se věnovaly vzniku a šíření aerosolových částic obsahujících viry. Na základě těchto prací lze konstatovat, že vydechované aerosolové částice hrají velmi významnou roli při šíření virů během pandemie koronaviru. Předložený text analyzuje možná opatření pro omezení šíření aerosolových částic. Výběr zde diskutovaných opatření vychází z aktuální veřejné debaty, která zahrnuje vliv větrání, čističek vzduchu, klimatizačních systémů i ochranných prostředků dýchacích cest. Z toho vyplývají následná doporučení pro správné a rozumné provedení vhodných protiepidemických opatření.

Aerosol je dynamický systém, neboť nepřetržitě dochází k tvorbě nových částic, jejich transportu, či jejich odstranění ze vzduchu (depozicí na všechny dostupné povrchy nebo změnou velikosti). Aerosolové částice mají velikost od přibližně 0,001 mikrometru (1 nanometr) až do několika stovek mikrometrů (nikoli tedy méně než 5 μm , jak v současnosti mylně uvádějí mnohé publikace) a díky proudění vzduchu se poměrně rychle šíří, a to dokonce na velmi velké vzdálenosti. Větší částice klesají k zemi v závislosti na své velikosti a hustotě, zatímco malé částice mohou setrvat ve vzduchu po velmi dlouhou dobu (viz kapitola 3). Každý člověk uvolňuje do okolí kapalnou částice o různých velikostech při dýchání, mluvení, kašli či kýchnutí (viz kapitola 4). A jestliže je infikován virem, např. SARS-CoV-2, pak tyto vydechované částice mohou obsahovat viry, které se uvolní do vzduchu, odkud je jiní lidé mohou vdechnout. Samotný virus SARS-CoV-2 má velikost od 0,06 do 0,14 mikrometrů (60–140 nanometrů), nicméně vydechované kapalnou částice jsou větší. V závislosti na okolních podmínkách (viz kapitola 3.3) se mohou vydechované částice zmenšit v důsledku vypařování. Velikost částic následně ovlivňuje jejich

transport a filtraci. Největší riziko infekce hrozí v uzavřených vnitřních prostorách, neboť zde může docházet k akumulaci částic. Proto je třeba zejména v takových uzavřených prostorách přijmout vhodná opatření ke snížení koncentrace aerosolových částic (viz kapitola 5).

Na základě poznatků aerosolové vědy lze dle mínění GAeF a ČAS shrnout aktuální poznatky o opatřeních ke zvládnutí pandemie covidu-19 do těchto bodů:

- Žádné z opatření principiálně nemůže fungovat samostatně! Na základě současného stavu poznání je zřejmé, že nejlepší cestou ke snížení rizika infekce je kombinovat několik různých typů opatření současně.
- Důležité je zachovávat rozestupy, neboť s rostoucí vzdáleností dochází k ředění vydechovaných virů, čímž se snižuje pravděpodobnost infekce. Předepsaná minimální vzdálenost může sloužit jako určité vodítko, ovšem zejména v případě delších setkání či obecně v uzavřených místnostech s omezeným prouděním vzduchu by měly být vzdálenosti větší a zároveň by měla být přijata i další vhodná opatření (viz níže).
- Ochranné prostředky dýchacích cest (roušky, respirátory, polomasky apod.) pomáhají filtrovat část vydechovaných částic (včetně virů). Tím se snižuje koncentrace částic (a virů) v místnosti, a tudíž také nebezpečí infekce. Je třeba uvést, že vydechované částice jsou díky obsahu značného množství vody poměrně velké a mohou tedy být účinně odstraněny obyčejnými rouškami (viz obrázek 6). Nicméně s rostoucím časem, po který částice zůstane ve vzduchu, dojde postupně k jejímu zmenšení (vypařením vody), a roušky jsou pak pro osobní ochranu nositele méně účinné. V tom případě je třeba použít respirátory schopné filtrovat i jemné částice, například třídy FFP2, N95 a KN95 (v závislosti na použité normě). Ty jsou vhodné jak pro ochranu nositele, tak i jeho okolí, a to samozřejmě pouze v případě, že nemají výdechový ventil. Respirátory s výdechovým ventilem slouží pouze pro ochranu nositele a odporují tak konceptu komunitní ochrany (viz kapitola 6) (*pod heslem „Moje rouška chrání tebe, tvoje rouška chrání mě“; pozn. překl.*).

- Použití obličejových štítů bez respirátoru je proti šíření aerosolů v podstatě neúčinné, neboť vzduch s částicemi (a viry) proniká bez jakékoliv filtrace kolem štítu velmi snadno. Ve zdravotnické praxi slouží štíty v kombinaci s respirátory jako doplňková ochrana před kapénkovou infekcí přes oční sliznici. Mobilní či pevné plexisklové zábrany jsou proti šíření aerosolů taktéž neúčinné. Mohou v omezeném rozsahu bránit šíření kapének na malé vzdálenosti, například u pokladen v supermarketech, ale v dlouhodobém měřítku proti aerosolům neposkytují žádnou ochranu. Štíty a plexiskla v podstatě slouží jen jako ochrana před vyprsknutými velkými kapénkami.
- Ve venkovním prostředí k šíření infekce prostřednictvím aerosolů prakticky nedochází. Přesto však v početnějších skupinách lidí, kde se nedodrží minimální rozestupy a/nebo se nepoužívají ochranné prostředky, může dojít ke kapénkové infekci. V uzavřených místnostech hraje zásadní roli větrání, tedy výměna vydechovaného vzduchu za čerstvý venkovní vzduch. Časté opakované větrání a větrání s přívodem a odvodem vzduchu na opačných stranách místnosti jsou stejně účinné jako trvale otevřená okna. Zejména v zimě je z hlediska úspory energií vhodnější opakované větrání. Případné využití čidla koncentrace CO₂ umožní sledovat kvalitu vnitřního prostředí. Čidlo ukazuje, kdy je třeba vyvětrat a zda již došlo k výměně dostatečného množství vzduchu. Stále se však jedná pouze o indikaci a ani v případě dostatečně nízkých koncentrací CO₂ nelze touto metodikou samostatně zabránit infekci lidí nacházejících se v blízkém kontaktu.
- Užitečným prostředkem ke snížení koncentrace částic a virů v místnosti mohou být čističky vzduchu. Před pořízením čističky je třeba zvážit zejména dimenzování čističky z hlediska objemu místnosti tak, aby skutečně došlo ke snížení virové nálože a koncentrace částic (*Čistička samozřejmě musí být vybavena příslušným filtračním systémem, který bude schopn efektivně odstranit i částice viru; pozn. překl.*). Objemový výkon čističky (*množství vyčištěného vzduchu za jednotku času; pozn. překl.*) je důležitější než samotná filtrační účinnost filtru. Z důvodu úspor energie i financí může být vysoce účinný filtr dokonce kontraproduktivní (viz kapitola 5.2). Pomoci může také trvalá nucená ventilace – a to v případě, že obsahuje odpovídající filtr, a postupně tak snižuje koncentraci částic a virů v místnosti. Pro ochranu před infekcí je přirozeně nejlepší, pokud ventilace může pracovat se 100 % čerstvého větracího vzduchu a nedochází k recirkulaci vzduchu v místnosti (viz kapitola 5.3).

Z pohledu GAeF (a ČAS) je velmi potřebné pokračovat v dalším výzkumu, a to zejména interdisciplinárního charakteru, konkrétně v oblasti epidemiologie, infektologie, virologie, techniky prostředí a mechaniky tekutin. Okamžitou implementaci cíleného výzkumu by mělo podpořit speciální financování a výzkumné programy (viz kapitola 7).

Tento dokument byl původně napsán německy členy GAeF a podpořen mnoha zahraničními experty na aerosoly (viz kapitola 8). Česká verze byla přeložena týmem překladatelů, členů České aerosolové společnosti – viz předmluva, a je k dispozici zde: <http://cas.icpf.cas.cz/download.php>. Jak anglická, tak německá verze, stejně jako všechny obrázky v tomto článku, jsou k dispozici zdarma ke stažení na následujícím odkazu: <https://www.info.gaef.de/positionspapier>. V případě jakéhokoli užití obrázků je třeba uvést jako zdroj „Gesellschaft für Aerosolforschung e. V.“.

1. Cíl tohoto dokumentu

Tento dokument je adresován zástupcům médií, úřadům, státní správě, politickým reprezentantům a zainteresované veřejnosti. Gesellschaft für Aerosolforschung (GAeF, <https://www.info.gaef.de>) a ČAS (http://cas.icpf.cas.cz/index_cz.php) jím chce přispět ke zvládnutí pandemie způsobené virem SARS-CoV-2 tím, že pomůže ozřejmit způsoby přenosu viru. Přenos viru pomocí aerosolu je již nějakou dobu považován za jeden z nejdůležitějších způsobů jeho šíření, společně s dotykem a kapénkovou infekcí [1, 2]. Virus je schopen po rozptýlení ve vzduchu přežít až několik

hodin [3]. Z pohledu GAeF a ČAS jsou některé otázky ve veřejné diskusi uváděny nepřesně či mylně. Protože možné způsoby přenosu úzce souvisí s opatřeními, která je třeba přijmout, chtěla by GAeF a ČAS nabídnout své odborné znalosti a podat je srozumitelnou formou. Téma je zpracováno pouze z pohledu aerosolové vědy a nejsou vyvozovány žádné lékařské, epidemiologické, virologické či infekcologické závěry. Pro objasnění způsobu šíření virů je třeba dle názoru GAeF a ČAS zvýšené mezioborové spolupráce, a to dokonce nad rámec současné pandemie.

2. Co je aerosol?

„Aerosol“ je uměle vytvořené slovo, složenina starořeckého ἀήρ (aēr), neboli „vzduch“ a latinského solutio, které znamená „rozvolnění“ nebo též „roztok“. Z fyzikálního pohledu je aerosol heterogenní směs částic a plynu (případně směsi plynů, jako např. v tomto případě vzduch, viz obrázek 1), který částice obklopuje. Částice mohou být kapalné i pevné, např. saze či minerální prach. Ve stabilním aerosolu jsou pevné či kapalné složky homogenně rozptýleny ve formě suspendovaných částic. V souladu s touto definicí považujeme tedy např. venkovní vzduch, v němž jsou rozptýleny částečky jemného prachu¹, právě za aerosol. V tomto textu se termín „aerosolové částice“, nebo jednoduše „částice“, používá pro všechny typy částic suspendovaných ve vzduchu. Při současné veřejné debatě je termín aerosol často mylně vztahován pouze na samotné částice (např. [4]). Aerosol se však vyznačuje tím, že obsahuje jak vzduch, tedy zejména molekuly dusíku a kyslíku, tak i pevné a kapalné částice. Aerosolové částice jsou tak malé, že se mohou po určitou dobu, v závislosti na své velikosti, vznášet ve vzduchu. Ve venkovním prostředí to může být po dobu mnoha hodin i dní a díky tomu mohou být transportovány do značných vzdáleností (např. *přenos saharského prachu do našich zeměpisných šířek; pozn. překl.*).

Jeden litr vzduchu běžně obsahuje miliony aerosolových částic, které, mimo jiné, ovlivňují klima a tvorbu dešťových oblaků [5] nebo chemické reakce v atmosféře [6]. Ve vyšších koncentracích pak mohou v podobě jemného prachu ovlivnit lidské zdraví [7]. Dospělý

¹ Jako „jemný prach“ také označujeme částice, jejichž tzv. „aerodynamický průměr“ je menší než 10 μm (PM10), případně 2,5 μm (PM2,5).

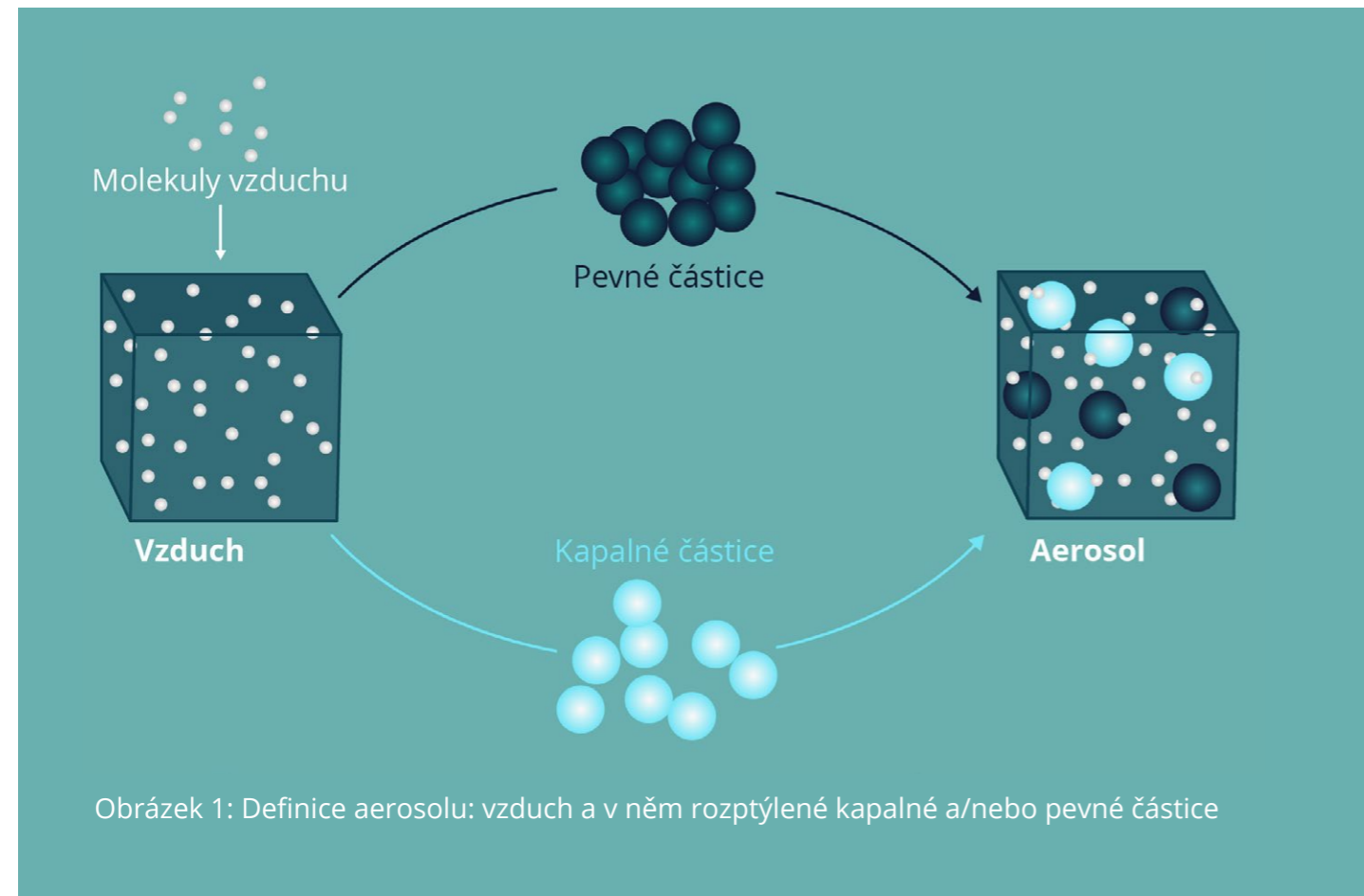
člověk vdechne během jednoho dne okolo sto miliard částic. Účinek částic na lidské zdraví pak závisí na jejich počtu, velikosti, hmotnosti a chemickém složení. Tyto vlastnosti jsou naopak různým způsobem ovlivňovány širokým spektrem přírodních a antropogenních zdrojů [8]. Rozsah velikostí aerosolu není přesně stanoven, ale zpravidla zahrnuje částice od 1 až 2 nanometrů (nm, miliontina milimetru) až do více než 100 mikrometrů (μm, tisícina milimetru) [9, 10]. Většina částic atmosférického aerosolu (jako saze nebo částice síranu amonného) jsou menší než 1 μm. Částice minerálního prachu, mořské soli, ale například i bakterie, jsou větší než 1 μm. Pylové částice mají rozměry mezi 10 a 60 μm. Velikost virů SARS-CoV-2 se pohybuje v rozsahu 0,06 až 0,14 μm [11], ale mohou být i menší [12]. Pro srovnání, průměr lidského vlasu je 20 až 80 μm.

Viry, které se nacházejí na povrchích sliznic a kůže, se nemohou samy o sobě oddělit od těchto povrchů. Z toho důvodu se viry zpravidla nevyskytují v aerosolu jako samostatné částice (tzv. viriony), ale přenáší se vzduchem ve větších, kapalných či pevných, částicích. Zejména v lékařské literatuře, ale také ve veřejné debatě o SARS-CoV-2, se objevuje mylné a nepodložené rozdělení na aerosolové částice < 5 μm a kapénky > 5 μm. Toto dělení předpokládá rozdílné chování takto definovaných částic a kapének². Zmíněná definice

² Pozn. překl.: V tomto textu používáme v následujících kapitolách český termín „kapénky“ pro částice větší než zhruba 100 μm, které se již nechovají jako aerosolové částice. Jsou definovány v kapitole 4.2. Znamená to, že mezi aerosolovými částicemi a kapénkami rozlišujeme, nicméně dělicí hranice neleží v oblasti 5 μm, protože k tomu není fyzikální důvod. Teprve až částice o velikosti řádově stovek mikrometrů nedokáže zůstat dostatečně dlouho suspendována ve vzduchu a nesplňuje již tedy definici aerosolové částice. Takovou kapalnou částici pak nazveme kapénkou.

není užitečná ani z pohledu transportního chování [13, 14] (viz kapitola 3.1), ani z hlediska infekčnosti částic (viz kapitola 4), a to zejména proto, že kapalná složka aerosolových částic se velmi rychle odpařuje. Rozhodující je v každém případě rozdělení velikostí částic.

V literatuře najdeme různá rozčlenění do velikostních tříd, která jsou však často zavedena jen kvůli použité měřicí technice, a nikoli výhradně kvůli chování částic rozhodujícímu o procesu infekce.



3. Základy fyziky aerosolů ve vztahu ke covidu-19

3.1 Základy pohybu částic

Význam fyziky aerosolů pro pochopení procesu šíření infekce nedávno zdůraznili Drossinos a Stilianakis [13] v úvodníku časopisu *Aerosol Science and Technology*. Podstatnou součástí

fyziky aerosolů je pohyb aerosolových částic, který silně závisí na velikosti částic [4, 9]. Protože aerosolové částice nemají zpravidla jasně definovaný geometrický tvar, používá

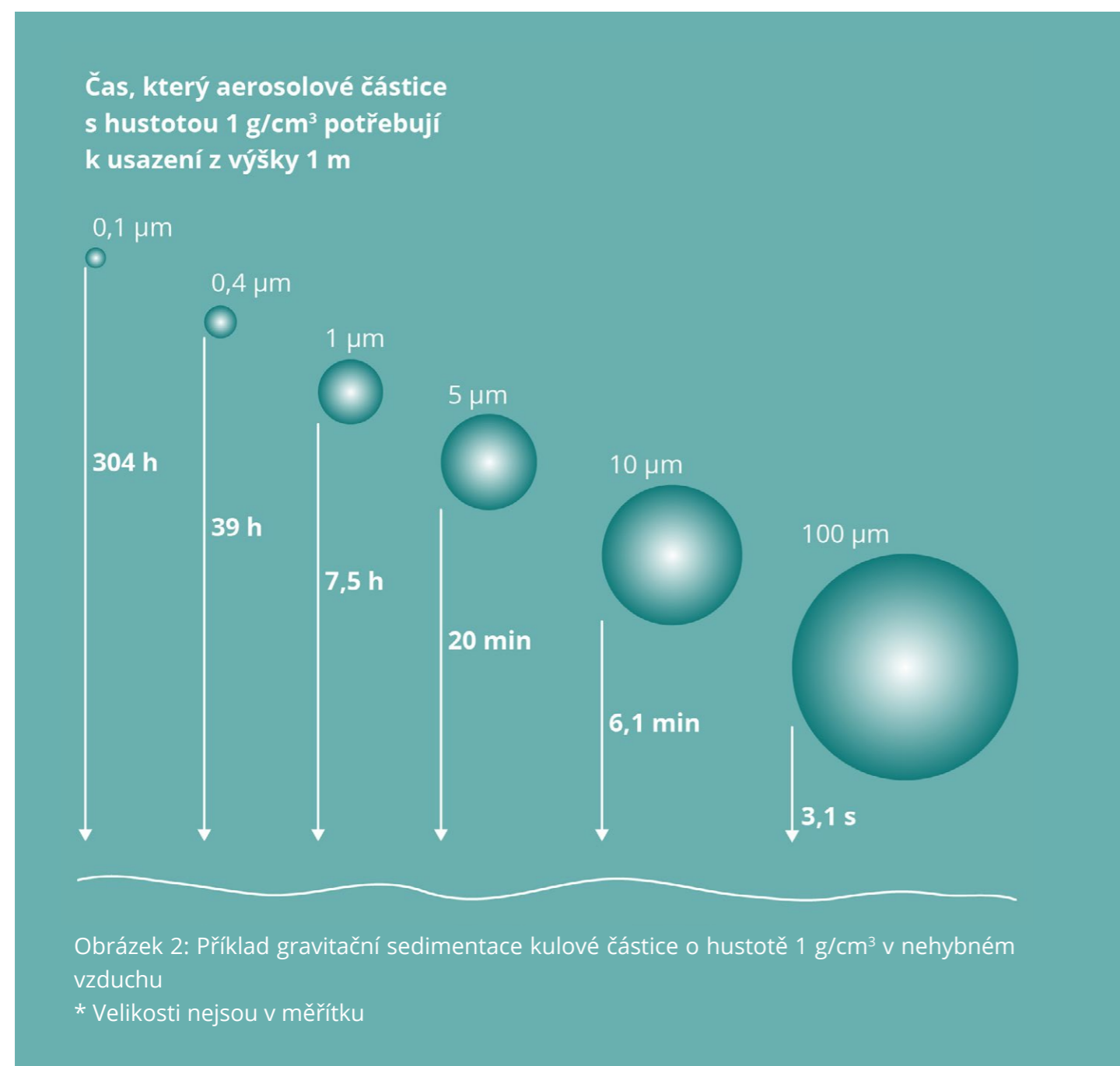
se k jejich popisu geometrický průměr koule, coby nejjednodušší a idealizovaný případ. Aby se zohlednil vliv geometrie částic (aerodynamický odpor) a chemické složení (hustota částice), je velikost částic obvykle specifikována takzvaným ekvivalentním aerodynamickým průměrem. Aerodynamický průměr je definován jako průměr kulové částice o hustotě 1 gram na centimetr krychlový (můžeme si ji představit jako kapičku vody), jejíž chování odpovídá skutečné částici pohybující se v proudu vzduchu.

Aerosolové částice jsou často unášeny turbulentním prouděním vzduchu, a tudíž se ve vnitřním i vnějším prostředí velmi rychle rozptýlí. Abychom porozuměli transportu částic, je nutné popsat relativní pohyb částic daný působením sil na částice aerosolu vzhledem k proudu vzduchu. Molekuly vzduchu jsou v neustálém tepelném pohybu náhodným směrem a rychlostí a srážejí se i s aerosolovými částicemi rozptýlenými ve vzduchu. To vede k přenosu energie a hybnosti a současně k častým změnám rychlosti i směru pohybu částice. Tento tzv. Brownův molekulární pohyb má za následek přenos částic difuzí [15, 16], který se zvyšuje se zmenšujícím se průměrem částic. Tato brownovská difuze je zvláště významná pro částice o průměru menším než 0,1 μm . Pro takto malé částice je difuze nejdůležitějším transportním mechanismem na krátké vzdálenosti, což hraje roli při filtraci částic [17] a také při depozici a odstranění částic například v plicích [18]. Pro částice větší než přibližně 0,1 μm hraje difuze stále menší roli. Se zvětšující se velikostí částic pak začíná na významu nabývat gravitace. Kdykoli se částice pohybují vzhledem k okolnímu vzduchu, působí proti pohybu částice brzdná třecí síla, jež se projevuje aerodynamickým odporem. Pokud tedy aerosolová částice klesá v klidném vzduchu v důsledku gravitace, rychle se ustaví stabilní sedimentační rychlost závislá

na tvaru částice a její hustotě, tj. na aerodynamickém průměru částice. V klidném vzduchu klesne 1 μm kulová aerosolová částice o hustotě vody z výšky 1 m na povrch asi za 7,5 hodiny. Částice o velikosti 10 μm pak potřebuje jen asi šest minut. Některé příklady doby sedimentace částic z výšky 1 m pouze vlivem gravitace jsou zobrazeny na obrázku 2. Uvedená rychlost depozice předpokládá, že velikost částic se během transportu nemění. Vydechované kapalná aerosolové částice však obvykle uvolňují vodu a zmenšují se. Pro lepší pochopení tohoto jevu viz kapitola 3.3.

Čísla na obrázku 2 se vztahují k nehybnému vzduchu. Nicméně v běžném vnitřním i vnějším prostředí se částice přenášejí pohybem vzduchu (advekce a turbulentní transport), a proto mohou zůstat ve vzduchu mnohem déle, než je uvedeno na obrázku, a to díky silám působícím vzhůru proti gravitaci. Prostřednictvím tzv. advekce (horizontální transport) s proudem vzduchu mohou být aerosolové částice ve venkovním prostředí přepravovány na velmi dlouhé vzdálenosti. S turbulentním pohybem vzduchu jsou aerosolové částice transportovány také vertikálně. V interiéru, kde bývají typické rychlosti proudění vzduchu cca 0,1 m/s, se mohou částice do aerodynamického průměru 20 μm udržet ve vznosu po dlouhou dobu [19] a rozptýlit se rychle v celé místnosti. V tomto procesu se vydechovaný vzduch, který může obsahovat částice s viry, smíchá se vzduchem v místnosti a rychle se zředí. Pokud se však vzduch v místnosti nevymění větráním nebo není filtrován (ventilačním systémem nebo čističkami vzduchu), v průběhu času se částice hromadí. Naopak ve venkovním vzduchu se koncentrace vydechovaných částic rychle ředí, takže nedochází k žádné akumulaci. Pouze pro částice o průměru větším než 100 μm můžeme předpokládat, že se pohybují po balistické trajektorii a rychle sedimentují. Takto se dá popsat

šíření částic, které jsou vymrštěny vysokou rychlostí při kašli nebo kýchní, podobně jako je tomu u hozeného míčku (viz kapitola 4.2 a obrázek 3) (avšak pouze za předpokladu, že nedojde k jejich zmenšení vypařováním; pozn. překl.).



3.2 Depozice částic

K odstranění aerosolových částic ze vzduchu vedou různé procesy. Velmi důležitou roli hraje depozice částic, tedy usazování aerosolových částic na zemi nebo površích. U větších částic (typicky > 1 μm) je pro depozici významná gravitace, tedy klesání částic k zemi. Při vysokých relativních vlhkostech mohou i původně malé částice díky svému chemickému složení absorbovat a akumulovat vlhkost, a tím rychleji sedimentovat [20, 21]. Naopak kapalně částice se při nízké vlhkosti zmenšují. Menší částice (cca < 0,1 μm) se mohou zase na povrchy deponovat v důsledku Brownova molekulárního pohybu. Pokud proud vzduchu směřuje na překážku, pak se větší částice kvůli své setrvačnosti deponují srážkou s touto překážkou [9]. V případě, že aerosolová částice je schopna sledovat proudění vzduchu kolem překážky, ale deponuje se na ni z důvodů své velikosti a blízkosti povrchu, nazýváme tuto depozici intercepce (zachycením) [9]. Tyto separační mechanismy jsou konkrétně využívány ve filtrech, které odstraňují částice ze vzduchu [17]. Filtrům částic se věnuje kapitola 5.1.

V závislosti na místních podmínkách se nejhůře usazují částice o velikosti 0,1 až 0,3 μm (proporce jsou graficky znázorněny v části týkající se filtrace částic na obrázku 5). To znamená, že tyto částice zůstávají ve vzduchu po velmi dlouhou dobu a mohou se v uzavřených nevětraných místnostech vznášet ve vzduchu více než 24 hodin.

3.3 Odpařování kapalných částic

Mezi aerosolovými částicemi a vzduchem dochází k neustálé výměně vodní páry. To platí zejména pro kapalně aerosolové částice,

které se často skládají převážně z vody. Částice usilují o dosažení rovnováhy s vodní párou ve vzduchu. Množství vody obsažené v aerosolové částici závisí na jejím složení a relativní vlhkosti. To platí zejména pro vydechované kapalně částice, které jsou zvláště důležité v souvislosti s covidem-19. V dýchacích cestách je teplo a vlhko (relativní vlhkost asi 100 %), takže aerosolové částice tam mají vysoký obsah vody. Po vydechnutí se voda z částic odpařuje. Tento proces popsal Wells v roce 1934 [22]. Částice se vysušuje a zmenšuje rychlostí, která závisí na povrchu částice, teplotě a relativní vlhkosti vzduchu [23]. U částic se stejným složením se menší částice odpařují rychleji díky většímu poměru povrchu k objemu [24]. Drewnick a kol. [25] vypočítali, že kapička čisté vody s počátečním průměrem 100 μm při relativní vlhkosti okolního prostředí 50 % potřebuje zhruba 15 s, aby se odpařováním zmenšila na velikost viru SARS-CoV-2 (0,14 μm), 10 μm kapička vody potřebuje 0,1 s a 1 μm kapička pouze 0,003 s. Při relativní vlhkosti okolního prostředí 90 % potřebují kapičky vody asi čtyřikrát až pětkrát delší dobu k vypaření na velikost viru. Tato změna velikosti ovlivňuje jak transportní, tak filtrační vlastnosti. Proto je vždy třeba vzít v úvahu změnu velikosti částic po výdechu. Zatímco velikost vydechovaných částic – to je velikost částice bezprostředně po výdechu – je důležitá pro depozici v roušce či respirátoru během výdechu, velikost zmenšená vysušením je podstatná po dobu pobytu aerosolových částic v okolním vzduchu a pro jejich usazování v respirátorech (z vnější strany při nádechu; pozn. překl.), v čističkách vzduchu a ve ventilačních systémech.

4. Kdy a jak jsou vydechovány viry nebo aerosol obsahující viry?

Aerosolové částice se uvolňují v lidském dýchacím systému. Že se to děje při kýchní a kašlání je zjevné. Částice se ovšem generují i během normálního dýchání, při mluvení, zpěvu, šeptání i křiku. Velikosti částic uvedené níže odpovídají čerstvě vydechovaným částicím, které se ale mohou postupně zmenšit v důsledku odpařování (viz předchozí kapitola 3.3).

Hodně diskutovaným mechanismem respiračních virových infekcí je samotné dýchání. Vzhledem k tomu, že dýcháme 24 hodin denně a dospělý člověk vdechne a vydechne mezi 10 a 25 m³ vzduchu za den [9], tak i nízké koncentrace aerosolu při výdechu mohou v důsledku uvolnit značné množství potenciálně virových aerosolových částic do okolí. Současně ale platí, že ve srovnání s běžnými koncentracemi částic ve vnitřním i venkovním prostředí je množství vydechovaných částic tak nízké, že k celkové koncentraci jemných aerosolových částic přispívá jen zanedbatelně. Zdravý člověk vydechuje během normálního klidového dýchání sto až několik set aerosolových částic na litr³ vzduchu. Tyto částice vznikají v perifériích plic během nádechu „znovuotevřením zhroutených dýchacích cest“. Tento jev byl poprvé popsán v roce 1988 Gebhartem a kol. [26] a Johnson a Morawská [27] tento mechanismus potvrdili v roce 2009. Olin a kol. [28, 29, 30, 31] podrobně zkoumali, z čeho jsou tyto vydechované částice tvořeny. Zjistili, že je to zejména plicní tekutina (surfaktant),

ale našli v těchto částicích též viry. Hohlfeld a kol. [32, 33, 34] byli také schopni určit velikost částic, která byla mezi 0,2 a 0,4 μm. Nicméně mnoho studií o vydechovaných aerosolových částicích měří kvůli přístrojovému omezení pouze velikosti částic nad 0,3 μm nebo 0,5 μm, a z toho důvodu uvádí zjevně nízké koncentrace vydechovaných částic. Současné studie ukázaly, že počet vydechovaných částic může v případě infekce dýchacích cest dramaticky vzrůst na hodnoty několika desítek až stovek tisíc částic na litr vzduchu. Nemusí to však nutně platit u každé infikované osoby. Poté, co infekce opadne, vydechují tyto osoby pouze několik částic na litr vzduchu [35, 36] (*Zde je drobný rozpor s výše uvedenou koncentrací, je patrně myšleno několik stovek částic na litr; pozn. překl.*).

Dalším mechanismem šíření virů vzduchem je mluvení a zpěv [37, 38]. Při těchto činnostech vzniká od několika tisíc až do sto tisíc aerosolových částic na litr v důsledku vibrací hlasivek a pohybů jazyka, zubů a rtů [39]. Tyto částice jsou obvykle větší než částice generované dýcháním. Asadi a kol. [40] zjistili, že mají velikost asi 1 μm a že více částic je produkováno při vyšší hlasitosti. Dříve nepublikované studie Jensena a kol.⁴ ukázaly velikosti částic kolem 2 μm.

³ 1 litr = 1000 cm³

⁴ Osobní komunikace s prof. Dr. Keldem A. Jensenem, NRCWA, Copenhagen, Dánsko

4.1 Šíření virů při dýchání

V roce 2008 byla skupina vedená Patricií Fabianovou a Donaldem Miltonem z Massachusettské univerzity schopna detekovat chřipkové viry ve vydechovaných aerosolových částicích [41]. Tito autoři prokázali, že 87 % vydechovaných aerosolových částic bylo menších než 1 μm. Rovněž Milton a kol. [42] zaznamenali viry ve vzduchu vydechovaném pacienty infikovanými chřipkou. Významné množství virů chřipky v úzkém rozmezí velikostí částic generovaných při normálním dýchání zjistili u 35 z 37 nakažených pacientů. Naproti tomu při kašli byli schopni virovou RNA detekovat pouze u 16 z 37 nakažených pacientů. Také množství odebraného virového materiálu při kašli bylo mnohokrát menší než to, které našli v malých aerosolových částicích během normálního dýchání.

Lindsley a kol. [43] byli také schopni detekovat významné množství virů chřipky typu A ve vydechovaných částicích. Přestože autoři zjistili o něco více virů při kašli než při normálním dýchání, poznamenali, že kašel je mnohem méně častý než normální dýchání, a proto k šíření virů dochází pravděpodobně mnohem častěji a efektivněji normálním dýcháním.

Fabianová a kol. [44] našli při výdechu u infikovaných pacientů také rhinoviry. Ty byly nalezeny hlavně v nejmenších částicích, které bylo možné měřit. Skutečnost, že k šíření různých virů dochází běžným dýcháním infikovaných osob, nyní dokázaly i další výzkumné skupiny. U virů SARS-CoV-1 lze výsledky nalézt ve studiích Wanga a kol. [45] a Graltona a kol. [46]. Mitchell a kol. [47] našli rhinovirus, respirační syncytiální virus, chřipku typu A a B, viry parainfluenza 1, 2 a 3 a lidský metapneumovirus; Yip a kol. [48] našli viry chřipky typu A. Shiu a kol. [49] objevili RNA chřipky typu A v aerosolu ve vzduchu v pokoji pacienta na dětském

oddělení. Lze předpokládat, že výsledky těchto výzkumů mohou být přeneseny také na viry SARS-CoV-2.

Morawská a Cao [50] poukazují na mnohá pozorování, díky nimž je nanejvýš pravděpodobné, že i epidemie SARS-CoV-2 závisí do značné míry na přenosu vydechovaných virů a že je nutné to zohlednit v opatřeních směřujících k omezení pandemie.

Van Doremalen a kol. [3] zkoumali, jak dlouho zůstávají viry SARS-CoV-2 aktivní v aerosolu. Zjistili poločasy života mezi 1 a 1,1 hodinami. Smither a kol. [51] našli v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu poločasy života mezi půlhodinou a třemi hodinami za denního světla. Ve tmě však byly viry stabilní po dlouhou dobu. Brlek a kol. [52] byli schopni prokázat, že sportovci ve squashové hale ve Slovinsku byli nakaženi SARS-CoV-2 poté, co tam před nimi hrála squash nakažená osoba. Fears a kol. [53] dokázali, že viry SARS-CoV-2 rozptýlené ve vzduchu mohou za určitých okolností zůstat infekční déle než 16 hodin.

Ma a kol. [36] ve své studii zjistili, že existují jedinci, kteří vydechují až 400 000 virů za minutu. Četné studie také identifikovaly viry a virovou RNA ve vzduchu v nemocničních pokojích, a dokonce i na chodbách nemocnic, ačkoli u 75 % pacientů při výdechu nenalezly žádný virus. Lednicky a kol. [54] byli schopni v nemocnici detekovat infekční viry SARS-CoV-2 v aerosolových částicích ve vzdálenosti 4,8 m od pacienta s covidem-19. Zhou a kol. [55] našli viry SARS-CoV-2 v kondenzátu vydechovaného vzduchu u dvou z devíti vyšetřovaných pacientů, kteří měli být propuštěni z nemocnice poté, co trpěli onemocněním covid-19. Koncentrace byla asi 100 virů na litr vydechnutého vzduchu.

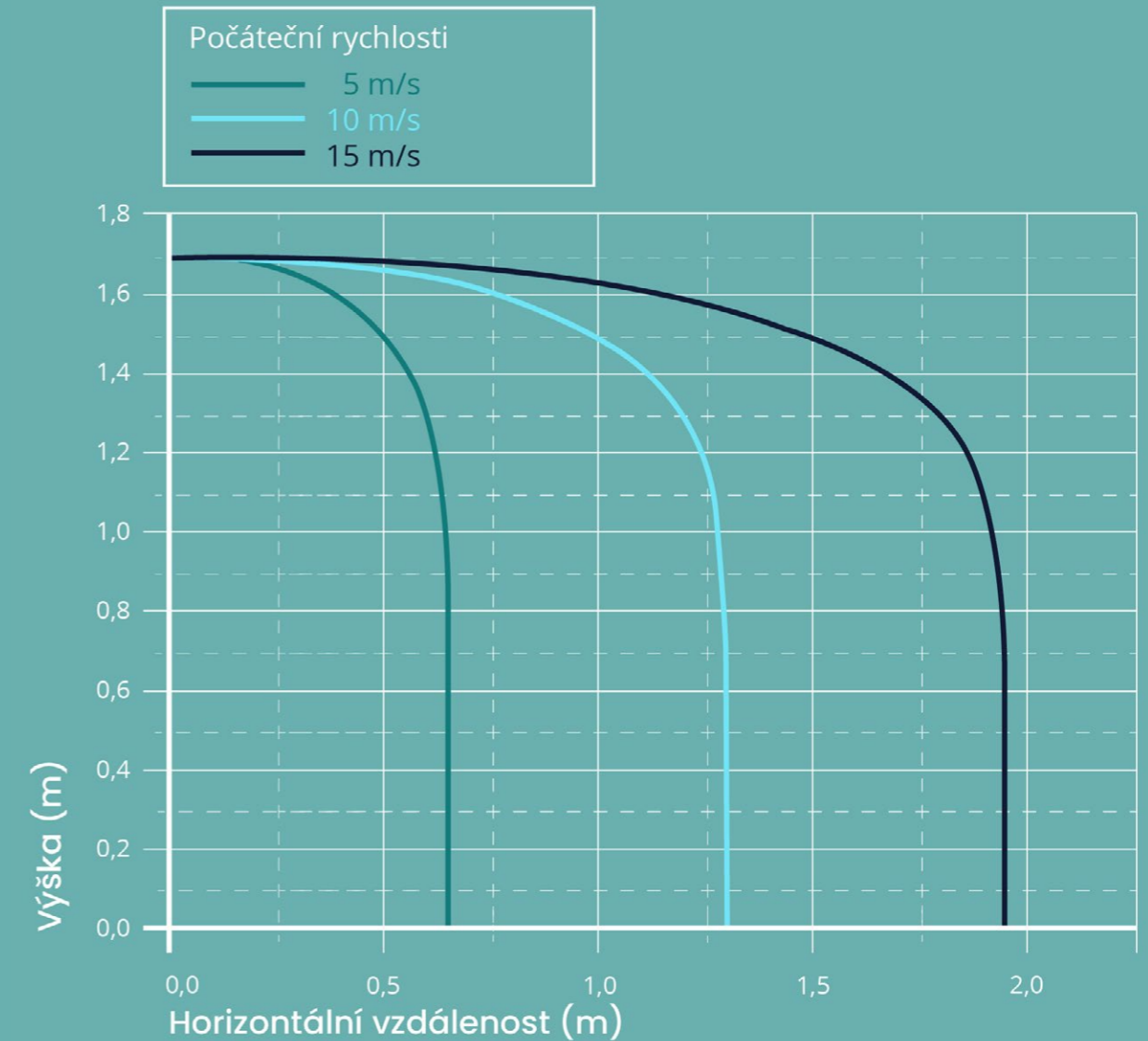
Ve studii infekčních řetězců zjistili Qian a kol. [56], že infekce covidu-19 je v podstatě fenoménem vnitřních prostor a že ve venkovním prostředí, tj. mimo uzavřené prostory, téměř k žádným infekcím nedochází. Z více než 7 000 pozorovaných a zdokumentovaných infekcí došlo pouze k jedné infekci venku. To je pravděpodobně způsobeno skutečností, že ve venkovních prostorech lze očekávat rychlé ředění aerosolových částic s obsahem virů, což snižuje riziko infekce (viz kapitola 3.1). Nicméně ve velkých davech s malými vzdálenostmi mezi lidmi nelze infekci vyloučit ani venku.

Na základě velkého počtu dostupných studií a zjištění se lze domnívat, že vydechované aerosolové částice hrají při šíření virů v pandemii covidu-19 významnou roli. Kapitoly 5 a 6 se proto zabývají diskusí, jak lze šíření virů zabránit.

4.2 Kapénková infekce

Při kašli, kýchní, mluvení nebo zpěvu se uvolňují kapénky o průměru větším než 100 μm , které se, jak je vysvětleno výše, již nechovají jako aerosolové částice. Mohou však hrát důležitou úlohu při kapénkové infekci. Protože mají mnohem větší objem než aerosolové částice, mohou obsahovat více virů, což znamená, že kapénková infekce má často dominantní roli. Trajektorie těchto částic silně závisí na rychlosti a směru, kterým byly vypuštěny. Obrázek 3 ukazuje příklady trajektorií kapének o průměru 200 μm pro počáteční rychlosti typické zejména při kašli. Při kýchní jsou počáteční rychlosti často ještě vyšší, takže částice mohou být transportovány ještě dále. Při výpočtu se předpokládalo, že kapénky vychází z úst ve výšce 1,70 m a že jejich velikost se během pohybu nemění (což obvykle reálně neplatí, jak bylo uvedeno v kapitole 3.3;

pozn. překl.). Je zřejmé, že pravidlo vzdálenosti 1,5 m je s ohledem na takové částice rozumné, nebo dokonce spíše podhodnocené. Před takto velkými kapkami mohou nositele účinně ochránit obličejové štíty i špatně přiléhající roušky, které jsou jinak pro malé aerosolové částice jen málo účinné. Je třeba poznamenat, že u kapiček větších než 100 μm není ředění relevantní, proto z hlediska přímé kapénkové infekce není důležité, zda jsou osoby ve venkovním nebo vnitřním prostředí.



Obrázek 3: Trajektorie kapének o průměru 200 μm a hustotě vody uvolňované různými rychlostmi ve výšce 1,70 m (podle [57])

5. Způsoby, jak snížit koncentraci virů ve vnitřních prostorách

Existuje několik způsobů, jak snížit koncentraci virů ve vzduchu v místnosti. Zatímco opatření, jako jsou ventilace a filtrace, mají za cíl snížit koncentraci virů, k jejich inaktivaci se používá ozařování vzduchu či filtrů UV světlem.

Účinným způsobem snižování koncentrace částic v místnosti – a podobně též i koncentrace aerosolu obsahujícího viry – je ředění čistším, tj. virů-prostým vzduchem. Ve venkovních prostorách probíhá ředění neustále přirozenými pohyby vzduchu. V interiéru lze ředění dosáhnout účinnou ventilací. Z toho důvodu by měla být otevřena okna a zajištěn pohyb vzduchu. Nejúčinnější je větrání místnosti z jedné strany na druhou, tj. kromě oken by měla být v dané místnosti otevřena i střešní okna (světlíky), případně dveře, a také okna a dveře v sousedních místnostech. Doba potřebná k vyvětrání závisí na velikosti místnosti, počtu a velikosti oken a rozdílu teplot uvnitř a venku. V případě potřeby lze výměnu vzduchu zajistit mechanicky, např. ventilátorem. Nicméně je třeba mít na paměti, že i přestože je vnější vzduch zpravidla bez virů, může obsahovat další znečišťující látky. I když lze ventilací koncentraci virů snížit, celková kvalita vzduchu v interiéru se může dokonce zhoršit.

Potřebu ventilace lze sledovat například kontinuálním měřením koncentrace oxidu uhličitého (CO_2) ve vnitřním prostředí. Dostatečně přesné CO_2 monitory (známé také jako semaforey s indikací CO_2) jsou komerčně dostupné za nízkou cenu. Protože CO_2 se tvoří během

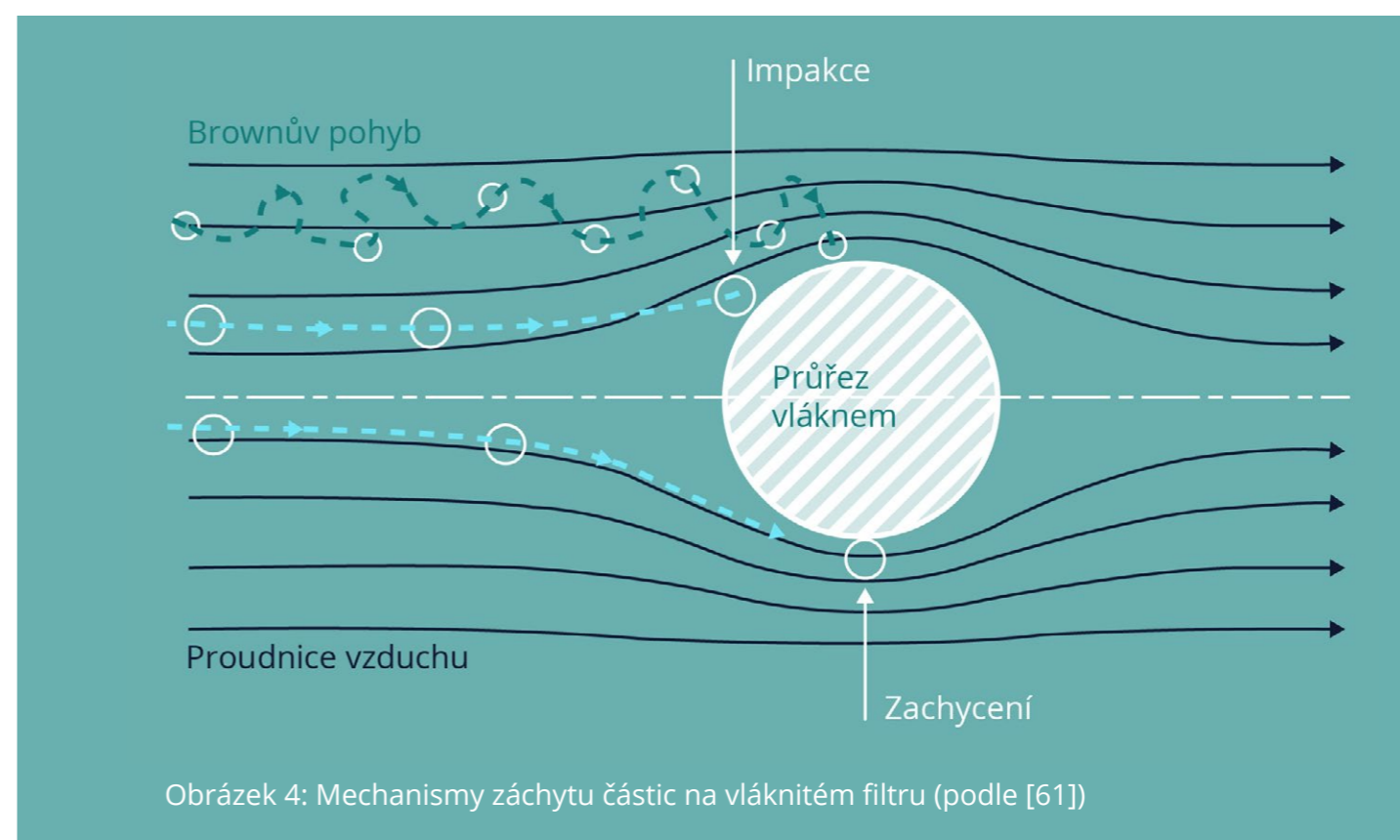
dýchání stejným způsobem jako aerosolové částice kontaminované viry, lze za určitých podmínek považovat koncentraci CO_2 také za indikátor koncentrace vydechaných aerosolových částic. To však platí, pouze pokud nedochází k aktivní filtraci vzduchu v místnosti, např. čističkami vzduchu (viz kapitola 5.2) nebo ventilačními systémy v recirkulačním režimu (viz kapitola 5.3). V těchto případech jsou ze vzduchu odstraňovány částice aerosolu, ale nikoliv plyný CO_2 . To by mohlo vést k příliš častému větrání, což může být energeticky nevýhodné. Nicméně riziko infekce by v takovém případě mělo klesat. Koncentrace CO_2 při níž by se mělo začít větrat, je v současnosti předmětem diskusí. Komise pro hygienu vnitřního prostředí Německé spolkové agentury pro životní prostředí považuje v běžných podmínkách za hygienicky přiměřenou výměnu vzduchu takovou, která zajistí koncentraci CO_2 nižší než 1 000 ppm (0,1 obj. %) [58]. Německá sociální úrazová pojišťovna (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) doporučuje, aby koncentrace CO_2 byla v zařízeních denní péče udržována na co nejnižší hodnotě [59]. Přirozená koncentrace CO_2 ve venkovním vzduchu je přibližně 410 ppm, a pod tuto hodnotu tak nemůže klesnout ani uvnitř.

Ačkoliv ventilace může snížit koncentraci částic a virovou zátěž v místnostech, nezabrání přímé kapénkové infekci mezi dvěma lidmi, pokud je mezi nimi příliš malá vzdálenost. Další možností snížení koncentrace částic a virů jsou níže popsané filtrační metody.

5.1 Základy filtrace vzduchu

Filtry částic jsou obvykle vyrobeny z netkaných textilií. Podle EN 29092 představují netkané textilie sítě s trojrozměrně uspořádanými vlákny. Aerosolové částice jsou ve filtrech odlučovány různými mechanismy. Zásadně nesprávný je často zaznívající názor, že částicové filtry fungují jako „síta“ nebo „rybářské sítě“, a tak zadržují pouze velké částice. Ve skutečnosti jsou díky Brownovu molekulárnímu pohybu s velkou účinností filtrovány zejména velmi malé částice [60, 61]. Při proudění aerosolu mezi vlákny filtru se k separaci částic na vlákních uplatňují tři různé mechanismy [9]: Setrvačná impakce, zachycení (neboli intercepce) a difuze [17], viz obrázek 4 a část 3.2.

Tyto tři mechanismy mají různý účinek na částice o různých velikostech. Impakce, tj. odstranění částic působením setrvačných sil, je dominantním separačním mechanismem pro částice $> 1 \mu\text{m}$. Vliv zachycení se také zvyšuje s rostoucí velikostí částic. Difuze v důsledku Brownova molekulárního pohybu naopak roste s klesající velikostí částic a je zásadním a vysoce účinným separačním mechanismem filtrů pro velikosti částic $< 0,1 \mu\text{m}$. Jakmile částice narazí na vlákno, přilne k němu. Je prakticky nemožné, aby se částice zachycené na filtru nebo na jiných površích znovu oddělily, protože by k tomu byly zapotřebí nereálně vysoké odtrhové síly [62].



Obrázek 4: Mechanismy záchytu částic na vláknitém filtru (podle [61])

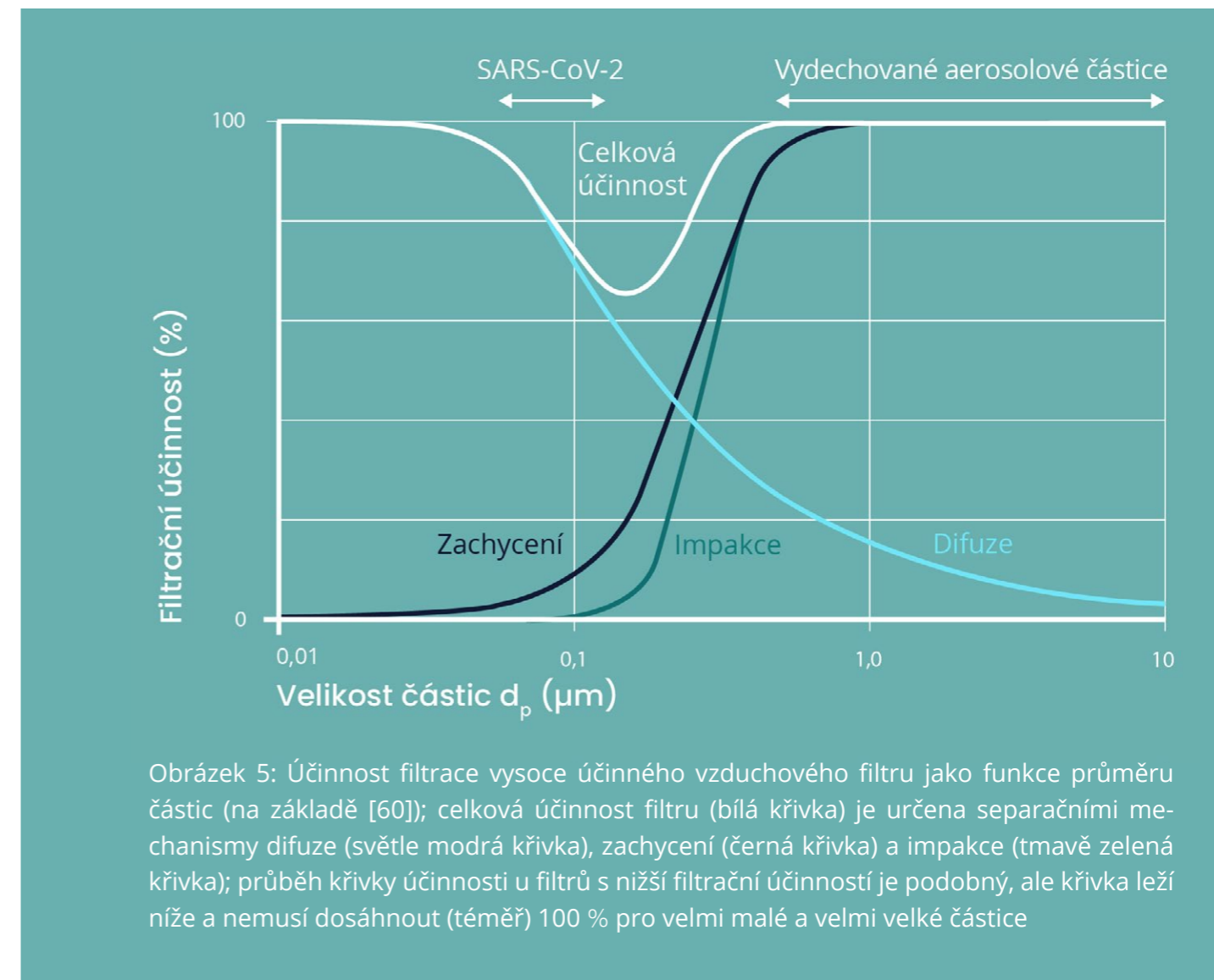
Výsledkem současného působení těchto tří separačních mechanismů je typická separační křivka ve tvaru písmene U (viz obrázek 5). V závislosti na filtru a vstupní, tzv. čelní, rychlosti je výsledná minimální filtrační účinnost (známá také jako *Most Penetrating Particle Size*, MPPS, neboli velikost částic, které nejnáze procházejí daným filtrem) obvykle mezi 0,1 μm a 0,3 μm . To znamená, že částice všech ostatních velikostí, i těch velmi malých, se odloučí ještě efektivněji. U konvenčních vzduchových filtrů určených pro místnosti je minimální účinnost 30–90 %, v závislosti na třídě filtru. U vysoce účinných HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) filtrů podle EN 1822-1 nebo ISO 29463 je minimální účinnost filtru nejméně 99,95 %, v závislosti na třídě filtru. Tyto specifikace se v souladu s normami vždy vztahují na jmenovitý průtok⁵ jednotlivými filtry. Při provozu filtru s nižším objemovým průtokem jsou velké částice odděleny s nižší účinností v důsledku sníženého vlivu impakce, zatímco malé částice účinněji, protože mají delší čas na separaci pomocí difuze. Minimum filtrační účinnosti se proto posouvá směrem k větším částicím. Při provozu filtru s vyšším průtokem než je jmenovitý, je tomu naopak.

Obecně je pro dosažení vyššího stupně filtrační účinnosti (*některé normy používají též termín „odlučivost“; pozn. překl.*) zapotřebí hustší filtr, silnější vrstva materiálu nebo vícevrstvý filtrační materiál. Tím ale také roste odpor proudění (tlaková ztráta) filtru [63], tedy např. u dýchacích masek roste dýchací odpor a při provozu filtrů pro čističky vzduchu nebo ventilačních systémů pak rostou energetické nároky.

V této souvislosti se s výhodou používají takzvané elektretové filtry. Jejich vlákna jsou během výroby elektricky nabita [64, 65]. Některé aerosolové částice nesou přirozený

elektrický náboj [66], a lze je tak ze vzduchu odstranit s vyšší účinností než čistě mechanickou filtrací. Nenabití částice jsou však také v elektrickém poli filtru polarizovány, a jsou proto také odlučovány účinněji [64, 67]. Tyto dva elektrické jevy mají různé účinky na částice různých velikostí, takže separační křivka elektretového filtru má obvykle několik lokálních minim [68, 69]. Použití elektricky nabitých vláken má zanedbatelný vliv na tlakovou ztrátu, elektretové filtry jsou tak zvláště zajímavé pro aplikace, kde je třeba se vyhnout vysoké tlakové ztrátě a současně dosáhnout vysoké účinnosti filtrace [70]. Používají se například v respirátorech [71, 72] nebo v domácích čističkách vzduchu [73].

Při provozu vzduchových filtrů se částice usazují na filtračním materiálu a v něm, což způsobuje zúžení volného prostoru pórů (*snížení tzv. porozity; pozn. překl.*). Díky takto zmenšenému volnému průřezu filtračního média roste s prodlužující se dobou provozu účinnost filtru, ale zároveň i tlaková ztráta [74], a tedy následně i spotřeba energie a dýchací odpor. V případě elektretových filtrů je zanášení filtru také doprovázeno jeho elektrickým vybíjením [75, 76]. Vliv snížení náboje na filtrační účinnost je obecně větší než zvýšení účinnosti v důsledku usazených částic, takže celková filtrační účinnost elektretových filtrů během provozu klesá [76]. Vybíjení filtrů je také urychlováno zvýšenou relativní vlhkostí vzduchu [77, 78], a zejména výpary rozpouštědel [79, 80, 81]. Skladovatelnost a životnost elektretového filtru je proto omezenější než u nenabitých filtrů. Možné vybíjení během skladování je však ve vědecké literatuře popsáno jako nízké [82] až zanedbatelné [83]. V současné době neexistuje žádné technické řešení pro opětovné nabití elektretových filtrů po jejich použití.



Obrázek 5: Účinnost filtrace vysoce účinného vzduchového filtru jako funkce průměru částic (na základě [60]); celková účinnost filtru (bílá křivka) je určena separačními mechanismy difuze (světle modrá křivka), zachycení (černá křivka) a impakce (tmavě zelená křivka); průběh křivky účinnosti u filtrů s nižší filtrační účinností je podobný, ale křivka leží níže a nemusí dosáhnout (téměř) 100 % pro velmi malé a velmi velké částice

5.2 Účinnost čističek vzduchu

Čističky vzduchu jsou přenosná zařízení, která mohou být umístěna kdekoli v místnosti. Jsou vybaveny ventilátorem, který nasává vzduch z místnosti, ten pak pokračuje skrze filtry a vrací se pročištěný zpět do místnosti. Čističky vzduchu mají tím pádem na koncentraci částic, jejím snížením či udržováním na nízké hodnotě po danou dobu, prakticky stejný vliv jako větrání čistým venkovním vzduchem [84]. Popularita čističek vzduchu jako domácích spotřebičů v posledních letech narostla. V souvislosti s pandemií covidu-19 přišly na

trh také větší čističky vzduchu, často označované jako profesionální čističky vzduchu, určené např. pro školní třídy nebo průmyslová pracoviště. Mezi výhody čističek v porovnání s větráním patří, že nedochází k úniku tepla, zejména v zimní sezóně, a že jejich účinnost je nezávislá na venkovní koncentraci částic. Z tohoto důvodu jsou čističky vzduchu považovány za další komponentu pro minimalizaci rizika infekce, hlavně v místnostech, kde není možné pravidelně větrat [1]. Mezi nevýhody čističek vzduchu patří možné dodatečné pořizovací náklady, spotřeba elektrické energie a zvýšení hluku ventilátorem. Zejména hluk může výrazně vadit při použití v každodenním

⁵ Průtok, pro který je tento filtr navržen. Obvykle je uveden v datovém listu daného filtru.

životě [85]. Další nevýhodou je, že vzduch pouze cirkuluje a nevyměňuje se. Nicméně stejně tak je tomu vždy při zavřených oknech. Avšak na rozdíl od větrání, kde se zároveň snižuje koncentrace CO₂, v tomto případě koncentrace vydechaného CO₂ v místnosti roste. Kromě toho, stejně jako při větrání, nelze zabránit přímé kapénkové infekci, pokud jsou lidé v přílišné blízkosti.

Většina čističek vzduchu používá pro zachycení částic filtr z netkané textilie [86]. V případě domácích čističek se často používají elektretové filtry pro dosažení nízkého odporu proudění (tlakové ztráty). Výhodou elektretových filtrů je to, že čističkou může být prohááno více vzduchu se stejnou spotřebou energie, ovšem s nižším hlukem. Díky vybíjení těchto filtrů může výrazně klesnout jejich počáteční účinnost, a proto je potřebná pravidelná výměna filtrů [81]. Na druhou stranu nové „profesionální“ čističky vzduchu často mívají vysoce účinné, ale nenabitě filtry HEPA třídy H13 nebo H14⁶ s odpovídající větší tlakovou ztrátou. Mnohé čističky vzduchu obsahují také aktivovaný uhlík pro odloučení plynných znečišťujících látek a pachů [87]. Aktivovaný uhlík však nemá výrazný vliv na zachycení částic. V některých případech jsou nabízeny dodatečné funkce pro inaktivaci mikroorganismů UV zářením, plazmatem či ozonem. Je známo po celá desetiletí, že ozáření virů UV zářením může vést k jejich inaktivaci [88], je ostatně užívané v mnoha čističkách vzduchu [89, 90]. Schopnost UV záření inaktivovat jiné koronaviry již byla demonstrována dříve [91]. Nicméně studie uvedené v přehledu od Heßlinga a kol. [91] nebyly provedeny na virech ve vzduchu, nýbrž na virech deponovaných na površích. O účinnosti inaktivace rozhoduje

6 Označení filtrů je převzato z Evropské normy EN 1822-1. Dle mezinárodní normy ISO 29463 jsou filtry E11 označeny jako ISO 15 E, H13 jako ISO 35 H a H14 jako ISO 45 H.

radiační dávka. Heßling a kol. předpokládají, že pro inaktivaci 90 % virů je zapotřebí dávka o velikosti 0,0037 J/cm². Hamzavi a kol. [92] udává, že dávka o velikosti 1 J/cm² je nutná pro inaktivaci 99,9 % virů na respirátorech. Zatímco tedy viry deponované na filtrech mohou být s pomocí UV záření účinně inaktivovány, je v současné době nejasné, zda je možné takto inaktivovat také viry přítomné ve vzduchu. Tato metoda také přináší možná rizika: UV záření poškozuje při přímém ozáření lidskou pokožku. Navíc může vést ke tvorbě ozonu ve vzduchu v místnosti (*a následně i ke tvorbě nových aerosolových částic, které mohou být, v závislosti na svém chemickém složení, zdraví škodlivé; pozn. překl.*). Proto by se takové metody neměly používat, pokud jsou v místnosti osoby, které by mohly být vystaveny UV záření či ozonu.

Podklady poskytované jednotlivými výrobci o účinnosti jejich čističek vzduchu by se měly posuzovat kriticky. Současné normy pro zkoušení čističek vzduchu, jako čínská norma GB/T 18801:2015 nebo americká norma US ANSI/AHAM AC-1:2015, neobsahují normované zkušební metody pro zkoušení účinnosti UV záření nebo využití ozonu či plazmatu. V současné době neexistuje evropská norma pro zkoušení čističek vzduchu. Mezinárodní norma IEC, která má nahradit národní normy, je v současnosti teprve v přípravě.

Účinnost čističek vzduchu se většinou vyhodnocuje prostřednictvím tzv. Clean Air Delivery Rate (CADR; v překladu faktor dodávky čistého vzduchu; pozn. překl.), který je určen normovanou cestou pomocí rychlostí poklesu koncentrace testovacích částic ve zkušební komoře [93]. CADR indikuje, kolik kubických metrů vyčištěného vzduchu čistička vzduchu poskytuje za hodinu, a odpovídá tedy součinu účinnosti filtru a objemového průtoku přístrojem.

Bohužel zejména pro domácí čističky je CADR většinou udáván pouze pro nejvyšší rychlost ventilátoru, která se ovšem v praxi nevyužívá buď vůbec, nebo jen po krátkou dobu kvůli zvýšenému hluku. Odpovídající informace o nižších rychlostech ventilátoru není obvykle pro tyto spotřebiče známa. Jako doplněk k manuálnímu nastavení rychlosti ventilátoru má mnoho domácích čističek vzduchu automatické módy, které řídí průtok vzduchu samostatně, na základě jednotkou naměřených koncentrací částic. Jelikož v případě typického znečištění vnitřního ovzduší částicemi tvoří virové částice jen malý zlomek celkového počtu částic a vestavěné senzory nedokáží rozlišit mezi částicemi, která obsahuje, či neobsahuje virus, tak by automatický mód čističek vůbec neměl být používán při prevenci šíření infekcí.

Rozhodujícím faktorem není pouze nejvyšší možná účinnost filtru, ale vždy také kombinace s dostatečným průtokem vzduchu. Kupříkladu stejný čistící výkon (CADR) může být dosažen s filtrem H13 s účinností filtrace 99,95 % jako s filtrem E11 s účinností filtrace 95 %, provozovaným s průtokem o 5 % vyšším. Protože je tlaková ztráta filtru H13 přibližně dvakrát větší než tlaková ztráta filtru E11 [94], je zapotřebí přibližně dvakrát více energie. Navíc čistička vzduchu s filtrem H13 je složitější a dražší. Pokud se použije filtr H14 s minimální účinností 99,995 %, vychází tato bilance ještě hůře. Použití filtrů H13 a H14 proto technicky nepřináší žádné výhody a není ani ekonomicky, ani energeticky smysluplné. Stejně tak může být kontraproduktivní dovybavit stávající čističky vzduchu vysoce účinnými filtry, jestliže snížení objemové rychlosti průtoku kvůli vyšší tlakové ztrátě převyšuje užitek z lepší účinnosti filtru a CADR v důsledku toho dokonce poklesne [95]. Použití vysoce účinných (HEPA) filtrů v čističkách vzduchu je proto často na úkor energetické účinnosti a zvýšení hluku nebo na

úkor efektivity, a nelze je proto obecně doporučit. Výjimky mohou tvořit čističky vzduchu, které berou vzduch z přímého blízkého okolí (potenciálně) nakažené osoby a vrací pročištěný vzduch zpět do místnosti. Nedávno došlo také k vývoji vysoce účinných H13 filtrů tvořených PTFE membránami, které mají výrazně nižší tlakovou ztrátu v porovnání s konvenčními filtry z netkané textilie, takže vysoké průtoky vzduchu mohou být dosaženy také s filtry H13 při nízké energetické náročnosti.

Pokud osoby v místnosti (např. během školní výuky či porad), mezi kterými je přítomna nakažená osoba, vydechují viry nebo částice obsahující viry, tak se v průběhu času v místnosti vytvoří rovnovážná koncentrace virů, pokud uvažujeme homogenní rozložení⁷ [96]. Čím vyšší je parametr CADR čističky vzduchu, tím nižší je výsledná rovnovážná koncentrace, nicméně nulové hodnoty koncentrace dosáhnout nelze. Pokud jsou viry v místnosti rovnoměrně rozloženy, tak výsledná rovnovážná koncentrace závisí pouze na množství vydechaných virů (zdroj) a na množství odfiltrovaných virů (odstranění) za jednotku času. Množství odstraněných virů závisí pouze na parametru CADR, nikoliv na objemu místnosti.

Kriegel a kol. [97] spočítali, že při CADR o hodnotě 750 m³/h lze riziko infekce za hodinu času stráveného v místnosti s nakaženou osobou snížit na 10 %. Riziko infekce se tím minimalizuje, ale nesmí se přitom opomíjet ani další ochranná opatření, jako je větrání nebo nošení roušek [98]. Čističky vzduchu se mohou využívat ke snížení existující počáteční koncentrace aerosolových částic například během školních přestávek nebo v prázdné místnosti před jednáním. Čím vyšší je rychlost výměny

7 Tento předpoklad v reálné situaci vždy neplatí, jelikož při nepříznivém proudění nemusí být v krátkém čase dosaženo homogenního promíchání.

vzduchu⁸, tím rychleji se dosáhne kýženého snížení koncentrace. Je to dáno poměrem parametru CADR a objemu místnosti. Výše zmíněné zkušební normy doporučují přibližně tři až šest výměn vzduchu za hodinu. V souvislosti s pandemií covidu-19 se v současné době doporučuje držet se horní hranice zmíněného rozsahu [99]. Pro místnost s výškou 2,5 m a ploše 20 m² (objem místnosti 50 m³) by tak byla zapotřebí čistička vzduchu s parametrem CADR o hodnotě 300 m³/h. Ještě vyšší rychlosti výměny vzduchu v zásadě vedou k rychlejšímu poklesu koncentrace částic, ale jsou bohužel spojeny s vyšší spotřebou energie a produkcí hluku. Je proto vždy nutné najít vhodný kompromis pro danou situaci.

Při umísťování čističek vzduchu v místnosti je třeba zajistit, aby mohly volně nasávat vzduch z místnosti a vyfukovat vyčištěný vzduch zpět do místnosti. V opačném případě nebude vyčištěný vzduch rovnoměrně distribuován po celé místnosti [100]. Z toho vyplývá, že by se čističky vzduchu neměly umísťovat za předměty, nábytek nebo pod stoly. Pokles koncentrace aerosolu v průběhu času silně závisí na podmínkách aerodynamického proudění v uvažované místnosti, na umístění instalovaného zařízení v místnosti a na jeho objemovém průtoku. Ve velmi velkých místnostech mohou mít překážky na stropě také negativní vliv na rovnoměrné rozložení vzduchu [99]. Jako alternativu k jediné jednotce s vysokou hodnotou parametru CADR lze použít více jednotek s nižší hodnotou tohoto parametru [96], přičemž (*jejich rovnoměrným rozmístěním; pozn. překl.*) by se mělo dbát na to, aby jedna jednotka přímo nenasávala vyčištěný vzduch vypuštěný jinou jednotkou. Využití více čističek vzduchu může také vést k lepšímu nasávání vzduchu vydechovaného jednotlivými

⁸ Přísně vzato není pojem rychlost výměny vzduchu v tomto kontextu správný, protože vzduch pouze cirkuluje, nevyměňuje se. Nicméně pro popis této situace se běžně používá.

osobami, a tedy ke snížení distribuce virů v místnosti.

5.3 Účinnost ventilačních systémů

Ventilační systémy jsou na rozdíl od mobilních čističek vzduchu pevně instalované v budovách za účelem zlepšení kvality vzduchu. Často jsou součástí systémů vytápění, větrání a klimatizace (HVAC, heating, ventilation, air-conditioning). V závislosti na návrhu mohou být systémy HVAC navrženy jako systémy čerstvého vzduchu nebo jako systémy cirkulujícího vzduchu, či jako kombinace obojího. V případě čistě recirkulačního systému je pro účinnost čištění vzduchu podstatná kombinace objemového průtoku a použitého filtru (stejně jako u čističek vzduchu). Pro systémy čerstvého vzduchu hraje nejdůležitější roli účinnost filtru, protože vzduch jím prochází pouze jednou a vyčištěný vzduch poté nahrazuje vzduch vnitřní. Toto ovšem platí pouze pro běžné znečišťující látky ve vzduchu. Bude-li koncentraci viru ve vnějším vzduchu pokládat za zanedbatelnou, potom je výběr filtru pro zmenšení virové nálože v místnosti při použití tohoto ventilačního systému nepodstatný. Systémy čerstvého vzduchu mají tu výhodu, že plynné složky uvolňované v interiéru, jako vydechovaný oxid uhličitý, jsou odstraněny z místnosti. Systémy čerstvého vzduchu jsou však méně výhodné z energetického hlediska, protože vzduch nasávaný z vnějších prostor dovnitř musí být temperován na požadovanou teplotu, např. tepelným výměníkem [101].

Filtry užívané v HVAC systémech jsou zkoušeny a klasifikovány dle mezinárodní normy ISO 16890. Tato klasifikace filtrů do skupin

ISO ePM1, ISO ePM2.5, ISO ePM10 a ISO Coarse (*ISO hrubý; pozn. překl.*) se převážně zaměřuje na účinnost separace pro různé jemné frakce prachu typického městského nebo venkovského vnějšího vzduchu. Filtry klasifikované jako ePMx musí mít minimální účinnost separace 50 % pro příslušnou velikostní frakci jemného prachu. Účinnost separace stanovená v normovaných zkouškách se přidává k příslušné třídě filtru. Filtr HVAC třídy „ISO ePM2,5 65 %“ separuje nejméně 65 % frakce PM2,5. Protože systémy HVAC často používají elektretové filtry, minimální účinnost se vždy vztahuje k průměrné hodnotě nabitého a nenabitého filtru.

Často se používá kombinace filtru ISO Coarse a filtru s vyšší účinností, kdy hrubý prachový filtr chrání jemný filtr. Pro potřeby místností se zvláště vysokými požadavky na kvalitu vzduchu, např. čisté prostory nebo operační sály, je možné místo filtrů ISO ePM použít filtry EPA (E10–E12), HEPA (H13 nebo H14), nebo ULPA (U15–U17) v souladu s normami EN 1822-1 a ISO 29463, ale jejich použití je vždy spojeno s vyšší spotřebou energie v důsledku vyššího odporu pro stejnou rychlost proudění vzduchu.

V kontextu současné pandemie covidu-19 jsou ventilační systémy obzvláště důležité. Již nějakou dobu je známo, že recirkulace vzduchu ve ventilačním systému může vést k akumulaci patogenů v místnosti, pokud není dostatečně filtrován [102]. Na jaře roku 2020 bylo prudké šíření covidu-19 v masném průmyslu v německém Vestfálsku způsobeno právě tímto scénářem, protože chladicí vzduch byl recirkulován bez filtrace [103]. Vypuknutí nákazy v restauraci v čínském Guangzhou (*město Kanton; pozn. překl.*) je také přičítáno vzduchu cirkulujícímu klimatizačním systémem bez filtrace [104]. Podobně se usuzuje, že na výletní lodi Diamond Princess se koronavirus rozšířil

prostřednictvím ventilačního systému s nedostatečnou filtrací, což vedlo k vysoké míře nákazy, ačkoli cestující byli umístěni do karantény ve svých kajutách [105].

Na základě těchto zjištění se využití recirkulace vzduchu nyní obecně nedoporučuje a místo toho je vhodné využít přívod 100% čerstvého vzduchu s nejvyšším možným objemovým průtokem a tepelnou výměnou [1]. V souladu s tím zahájila německá spolková vláda dne 20. října 2020 program financování, ve kterém bude poskytnuto celkově 500 milionů eur na přestavbu a modernizaci ventilačních a klimatizačních systémů ve veřejných budovách a shromažďovacích místech [106]. Tento program explicitně požaduje přeměnu systémů recirkulace vzduchu na systémy přívodu vzduchu. Z pohledu GAeF a ČAS mají tato opatření smysl, ale měla by být zachována energetická přiměřenost při provozu systémů i při výběru filtrů. Zavlečení virů nebo jiných patogenů venkovním vzduchem je nepravděpodobné, takže použití vysoce účinných filtrů, např. H13 nebo H14, není nezbytné a mělo by se mu zaměřit z důvodu úspor energie a ochrany klimatu. V režimu recirkulace se musí rozlišovat, zda systém zásobuje jednu místnost nebo několik místností. V případě jediné místnosti není použití vysoce účinného filtru nutné (viz diskuse o čističkách vzduchu v kapitole 5.2). Pokud však systém zásobuje několik místností, potom může být použití vysoce účinných filtrů vhodné k zamezení možného rozšíření virů z jedné místnosti do druhé. Například nemocnice mají často dvoustupňový filtrační systém. První stupeň obvykle separuje především hrubé částice. Pro všechny citlivé zóny, jako jsou operační sály nebo místnosti pro izolaci, je potom instalován druhý stupeň s přísnějšími požadavky, ve kterém se používají filtry s vyšší účinností pro menší částice.

Institut Maxe Plancka pro chemii v Mohuči nedávno vyvinul systém odsávání vzduchu pro učebny, který si mohou žáci docela jednoduchými prostředky sami vyrobit. Systém zajišťuje odsávání vzduchu nad hlavami žáků, protože teplý vydechaný vzduch stoupá vzhůru [107]. Čerstvý vzduch je dodáván přímo využitím venkovního vzduchu. Porovnatelný odsávací systém by mohl být smysluplný také pro tradiční ventilační systémy. S tímto konceptem bylo při přibližně dvou výměnách vzduchu za hodinu dosaženo velmi dobrých hodnot pro odčerpání testovacích částic se simulovanou konvekci tepla v místě generování [78].

Pro ventilační systémy obecně platí, že vyžadují pravidelnou údržbu a výměnu filtrů. Kontrola filtrů zpravidla zahrnuje sledování pouze tlakové ztráty filtrů. V případě elektretových filtrů však nemusí být tlaková ztráta správným ukazatelem pro výměnu filtru, měla by se sledovat samotná filtrační účinnost. Stálé kontroly účinnosti filtru lze dosáhnout případně pomocí již několik let dostupných levných prachových senzorů [108], ale to není v současné době běžné. Obzvláště pro velké ventilační systémy, které zásobují prostory využívané mnoha lidmi, jako jsou hotely, výstaviště nebo přednáškové sály, je takový vývoj žádoucí.

6. Účinnost osobních ochranných prostředků dýchacích cest

Německý federální úřad pro léčiva a zdravotnické produkty (*Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte; pozn. překl.*) rozděluje ochranné prostředky dýchacích cest do tří kategorií [109]:



Filtrační polomasky

tato kategorie zahrnuje respirátory (také dle normy ČSN EN 149+A1 se nazývají filtrační polomasky; pozn. překl.) tříd FFP1, FFP2 a FFP3, a respirátory ekvivalentních tříd KN95 z Číny a N95 z USA.



Pokrývky nosu a úst

kategorie zahrnuje látkové roušky a šátky.



Zdravotnické obličejové masky typu I, II a IIR

kategorie zahrnuje chirurgické roušky (ústenky).

Normy aplikovatelné na filtrační polomasky a zdravotnické masky včetně hlavních podmínek jednotlivých zkoušek jsou vypsány v tabulce 1. V současné době nejsou platné žádné zkušební normy pro pokrývky nosu a úst

(tj. látkové roušky a šátky; pozn. překl.), existují pouze návrhy různých orgánů pro normalizaci (vybrané návrhy jsou také vypsány v tabulce 1).

Kategorie	Norma/směrnice	Třída	Min. filtrační účinnost	Max. dýchací odpor (tlaková ztráta) pro nádech/výdech	Zkušební aerosol (medián průměru částice)	Platnost na území	Komentář
Filtrační polomasky	EN149:2001+A1:2009 společně s EN13274-7:2019	FFP1	80 %	210 Pa při 95 L/min 300 Pa při 160 L/min	NaCl (0,08±0,02 μm) a parafinový olej (0,37±0,08 μm) při 95 L/min	Evropa	Zkouška celé polomasky
		FFP2	94 %	240 Pa při 95 L/min 300 Pa při 160 L/min			
		FFP3	99 %	300 Pa při 95 L/min 300 Pa při 160 L/min			
	GB 2626-2006	KN95	95 %	350 Pa při 85 L/min 250 Pa při 85 L/min	Čína		
42 CFR part 84	N95	95 %	343,2 Pa při 85 L/min	NaCl (0,075±0,02 μm) při 85 L/min	USA		
Zdravotnické obličejové masky	EN 14683	Typ I	95 %	196 Pa při 27,2 cm/s	Kapalné částice > 1 μm obsahující bakterie při 28,3 L/min	Evropa	Zkouška filtračního materiálu (49 cm ² pro filtrační účinnost, 4,9 cm ² pro dýchací odpor (tlakovou ztrátu))
		Typ II	98 %	196 Pa při 27,2 cm/s			
		Typ IIR	98 %	294 Pa při 27,2 cm/s			
Látkové roušky	CWA 17553	Třída 90 %	90 %	240 Pa při 95 L/min 300 Pa při 160 L/min	3±0,5 μm	Evropa	Zkoušení podle existujících norem, např. EN149 nebo
		Třída 70 %	70 %	294 Pa při 27,2 cm/s			
	SNR 3000	Třída 70 %	70 % pro 1 μm	294 Pa při 27,2 cm/s	1±0,1 μm při 8 cm/s	Švýcarsko	Bude zveřejněno v Q1/2021
	UNI/PdR 90.1:2020	CFC-NR CFC-R CFC-BIO	80 % pro MPPS	210 Pa při 95 L/min	DEHS rozpětí velikostí 0,3–10 μm (velikostně rozlišené měření)	Itálie	Jednorázové Znovu použitelné Biodegradabilní

Tabulka 1: Přehled běžně používaných zkušebních norem pro zkoušení filtračních polomasek a zdravotnických obličejových masek, stejně jako dokumentů od různých komisí pro normalizaci pro zkoušení pokrývek nosu a úst

Nošení ochranných prostředků dýchacích cest (zakrývajících ústa a nos) je nyní doporučeno v mnoha oblastech a je povinné ve většině zemí Evropské unie při užívání městské hromadné dopravy. Od jara 2020 (s přestávkami) je v mnoha zemích, např. v ČR, Německu a Rakousku, také povinné při vstupu do obchodů. Používání vhodných ochranných prostředků širokou veřejností správným způsobem může

znatelně zpomalit šíření viru vzduchem [110, 111, 112, 113]. Přesto je mezi obyvateli velká poptávka po dalších informacích o tom, které ochranné prostředky poskytují jaký druh ochrany proti šíření viru. V současnosti jsou k dispozici tři druhy ochranných prostředků dýchacích cest (viz výše), které jsou veřejnosti dostupné jako ochrana před částicemi obsahujícími virus. Účinnost záchytu částic těmito

prostředky závisí pouze na velikosti samotných částic (obrázek 4) a je naprosto nezávislá na tom, jestli je částice biologicky aktivní nebo neaktivní [114]. Je potřeba zdůraznit, že vydechované částice mohou mít jiné velikostní rozdělení než částice v okolním vzduchu díky vyšší relativní vlhkosti vydechovaného vzduchu. Je tedy podstatné vzít v úvahu, jestli má ochranný prostředek chránit samotného nositele nebo lidi v jeho okolí (viz „*Moje rouška chrání tebe, tvoje mě*“; pozn. překl.).

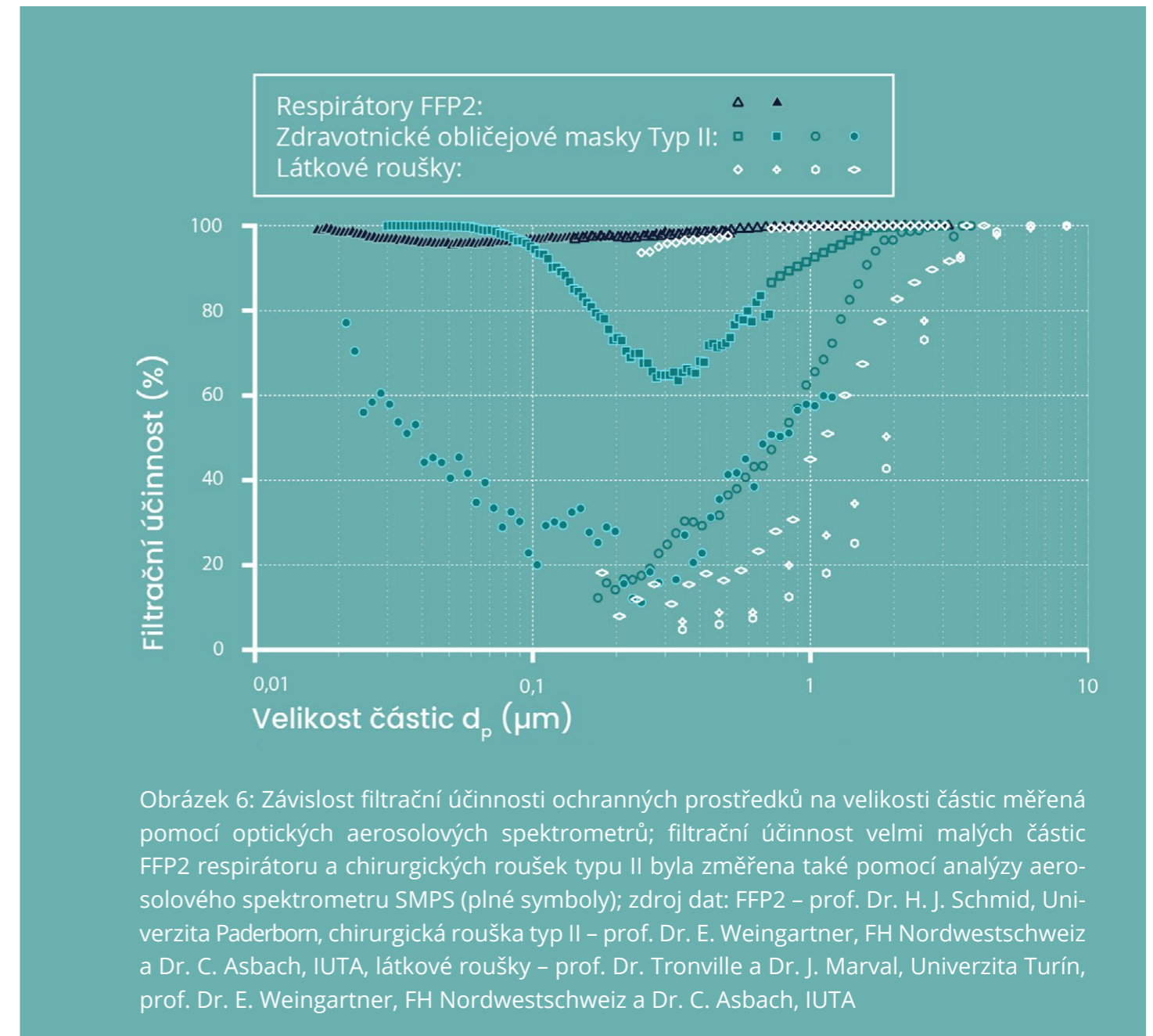
Obecně se dá říct, že jakákoliv pokrývka nosu a úst je lepší než žádná, a to zejména s ohledem na ochranu ostatních lidí [115]. Je potřeba si uvědomit, že roušky jsou v podstatě navrženy k zachycení vydechovaných částic potenciálně nesoucích virus. Nicméně i tak poskytují určitou úroveň ochrany během nádechu, byť relativně nízkou, neboť kapalné částice se po výdechu zmenšují (*a snáze tak pronikají materiálem roušky; pozn. překl.*). Pro dosažení vysokého stupně ochrany při setkání většího množství lidí je důležité, aby každý používal ochranný prostředek s nejvyšší filtrační účinností a měl ho správně nasazený, tj. co nejtěsněji kolem nosu a úst. Obrázek 6 ukazuje velikostně rozlišenou filtrační účinnost respirátorů, dvou chirurgických roušek a látkové roušky. Z obrázku lze vidět, že nejvyšší filtrační účinnost má respirátor třídy FFP2 a nejnižší látková rouška. U dvou chirurgických roušek se filtrační účinnost liší pro částice menší než 0,3 μm . Pro záchyt částic s velikostí $> 1 \mu\text{m}$ jsou však tyto roušky již velice účinné. Naopak látkové roušky vykazují vysoké filtrační účinnosti až pro částice o velikosti několika mikrometrů.

Pro účinnou ochranu před viry je potřeba mít respirátor, který dokáže zachytit jemné aerosolové částice a dobře těsní na obličej

nositele. Na druhou stranu ani respirátory nejsou všelékem a je potřeba je vždy používat společně s dalšími opatřeními, jako je dodržování rozestupů a základních hygienických pravidel. Navíc při sundávání respirátoru je potřeba dávat pozor, aby se zachycené viry nedostaly na ruce a nedošlo k infekci dotykem.

Dále se nabízejí obličejové štíty, ale ty nemají žádný filtrační efekt a zachytí jen částice o velikosti několika mikrometrů, které jsou vyprsknuty vysokou rychlostí např. při kašlání nebo kýchnutí a dopadnou na štít setrvačností. Menší částice jsou takovými štíty zachyceny nedostatečně nebo vůbec [116]. Obličejové clony se používají pouze jako ochrana před pliváním a prskáním velkých kapek. Použití obličejových clon se tedy doporučuje pouze jako doplňková úroveň ochrany, např. jako ochrana očí zdravotnického personálu před velkými, potenciálně infekčními kapkami [117, 118]. Podobného výsledku lze dosáhnout také použitím ochranných či dioptrických brýlí.

(*Nicméně je opět potřeba zdůraznit, že u všech ochranných prostředků je následně velmi podstatným parametrem těsnost roušek/respirátorů na obličej uživatele. Jakákoli netěsnost sníží účinnost daného ochranného prostředku; pozn. překl.*)



6.1 Filtrační polomasky

Filtrační polomasky se obvykle používají především v oblasti pracovní hygieny a bezpečnosti práce a jsou k dispozici např. zdravotnickému personálu. Slouží k ochraně nositele před vdechnutím nebezpečných částic z vnějšího prostředí v rozmezí od hrubých po ultrajemné částice ($< 100 \text{ nm}$; pozn. překl.) v závislosti na stupni ochrany [119]. Certifikované filtrační polomasky musí splnit zkoušky dle

norem pro různé zkušební aerosoly (tabulka 1). Viry jako třeba SARS-COV-2 se nešíří vzduchem samostatně, ale jako vydechované kapalné částice obalené plicní tekutinou, slinami nebo hlenem [120]. Velikost takové částice se časem zmenšuje vlivem odpařování, ale nikdy se nezmenší natolik, že by zůstal samotný vir, a to ani za nízkých relativních vlhkostí. Velikost těchto částic je mnohem větší než velikost samotného viru (kapitola 4) a větší než velikost zkušebních částic používaných

při zkoušení respirátorů. Dá se tedy předpokládat, že skutečná filtrační účinnost těchto částic je vyšší než ta pro MPPS (*nejméně procházející velikost částic; pozn. překl.*) při zkouškách podle normy. (*V tomto bodě bychom rádi upozornili, že dle našeho názoru není prokázáno, že všechny částice nesoucí virus jsou větší než střední velikost (medián) zkušebních částic; pozn. překl.*)

Je důležité, aby filtrační polomasky (tj. respirátory) měly platný certifikát. Výrobci všech filtračních polomasek musí své produkty nechat odzkoušet podle normy EN149:2001+A1:2009 před tím, než je začnou prodávat na evropském trhu. Pouze zkušební zařízení, které je plně v souladu s požadavky normy, může být použito pro demonstrování shody. Toto je důležité, protože kvůli nedostatku respirátorů na jaře 2020 je na trhu velké množství podvodně inzerovaných nebo kompletně padělaných produktů, které neposkytují specifikovanou ochranu. Pokud jsou produkty odzkoušené a schválené, nalezneme na obalu a samotném ochranném prostředku značku CE společně se 4místným číslem označeno subjektu, který zkoušku prováděl. Dále je uvedeno číslo splněné normy, např. norma EN149:2001+A1:2009. Seznam respirátorů, které jsou podvodně inzerovány, byl zveřejněn CDC a lze jej najít na jejich stránkách (<https://www.cdc.gov/niosh/npptl/usernotices/counterfeitResp.html>).

I ta nejlepší filtrační polomaska s vysokou filtrační účinností poskytuje dostatečnou ochranu proti částicím s viry jen v případě, že je mezi ní a tváří nositele dokonalý kontakt. Nicméně lidské tváře se značně liší, například tvarem, velikostí a typem nosu. Ne každý respirátor tedy sedí každému a poskytuje dostatečnou ochranu [121]. Navíc je zde velké množství respirátorů s různým stříhem, tvarem a velikostí v každé třídě ochrany. Špatně

padnoucí a nedostatečně těsný respirátor poskytuje nižší ochranu a může být příčinou náklady, přestože je certifikovaný a má vysokou filtrační účinnost. Proto existuje také norma ISO 16975-3 pro zkoušení těsnosti respirátoru na tváři. V některých zemích, např. v USA nebo Velké Británii, je povinná zkouška těsnosti pro všechny, kteří nosí respirátor v práci (např. v nemocnicích nebo domovech důchodců). Pouze zkouška těsnosti může zaručit, že daný typ a velikost respirátoru sedí danému nositeli a může skutečně poskytovat danou úroveň osobní ochrany. Pro tyto případy jsou používány speciálně přizpůsobené postupy měření aerosolů. Aby byla splněna zkouška, respirátor o vhodné velikosti a tvaru musí být správně nasazen a utěsněn v okolí nosu pomocí nosního klipu. Např. britský regulační orgán HSE (*Health and Safety Executive; pozn. překl.*) vytvořil tzv. obecné zásady INDG479 jako národní směrnici pro zkoušení těsnosti ochranných prostředků dýchacích cest [122]. Pro širší využití byl ve spolupráci zájmových skupin HSE vyvinut program „Fit2Fit“ (<https://www.fit2fit.org>) jako důkaz schopnosti poskytovatelů zkoušek těsnosti garantovat zvláště vysokou úroveň bezpečnosti.

Některé filtrační polomasky mají výdechový ventil. Vydechovaný vzduch prochází skrz ventilek a není obvykle nijak filtrován, což přispívá k šíření viru. Ačkoliv výdechové ventilkovy jsou většinou navrženy tak, že vzduch je vydechován směrem dolů [123], malé aerosolové částice mohou zůstat ve vzduchu po delší dobu např. díky turbulentnímu proudění nebo Brownovu pohybu. Respirátory s výdechovým ventilkem proto nejsou vhodné pro komunitní ochranu, a neměly by tedy být používány při snaze potlačit pandemii.

Respirátory se využívají v širokém spektru různých aplikací. Při použití respirátorů jako ochrany proti infekci zpravidla nedochází

k dosažení hranice maximálního přípustného zanesení. Nicméně doba použitelnosti respirátoru je omezená bez ohledu na možnou kontaminaci respirátoru i proto, že většina respirátorů je vyrobena z elektretového filtračního materiálu [75]. Z tohoto důvodu je na obalu respirátoru často uvedena maximální doba skladovatelnosti. Při užívání respirátoru dochází k postupnému poklesu jeho filtrační účinnosti, jelikož dochází k úbytku náboje filtračního materiálu např. vlivem vlhkosti vydechovaného vzduchu. Respirátory by se neměly používat opakovaně, protože jejich vysoká filtrační účinnost spolu s nízkým dýchacím odporem je zaručena právě tímto nábojem (*samozřejmě za předpokladu, že daný respirátor používá elektretový filtrační materiál; pozn. překl.*). Grinshpun a kol. také objevili, že sterilizování respirátorů pomocí autoklávu nebo alkoholem vede k výraznému snížení filtrační účinnosti a také ke zvýšení dýchacího odporu [124]. (*V tomto případě může dojít k poškození vnitřní struktury vláken respirátoru, a tím ke zhoršení jeho filtračních vlastností; pozn. překl.*)

6.2 Zdravotnické obličejové masky

Tyto jednorázové roušky jsou využívány ve zdravotnictví a jsou předmětem zákona o léčivých přípravcích. Dle normy EN 14683 musí chirurgické roušky dosáhnout minimální účinnosti při filtrování bakterií 98 % pro typ II či IIR a 95 % pro typ I (tabulka 1). Jelikož bakterie jsou ve srovnání s viry poměrně velké (jednotky mikrometrů *oproti stovkám nanometrů, pozn. překl.*), je filtrační účinnost chirurgických roušek pro jemné částice (např. viry) často menší než filtrační účinnost respirátorů. Chirurgické roušky navíc nesedí těsně na obličeji, takže dochází k proudění vdechovaného nefiltrovaného vzduchu okolo roušky. Vliv těchto

netěsností není u křivek filtrační účinnosti na obrázku 6 brán v potaz, protože se měřil samotný materiál, který byl těsně usazen v držáku. (*Nicméně z řady měření celých ochranných prostředků na testovací hlavě a z porovnání mezi výsledky filtrační účinnosti pro utěsněný ochranný prostředek a ochranný prostředek připevněný pouze dodanými uchycovacími prostředky (gumičky, šňůrky apod.) se ukazuje, že rozdíl v účinnosti pak může dosahovat řádově i několik desítek procent. Tato skutečnost byla prokázána jak v laboratořích Akademie věd, tak v laboratořích VUT; pozn. překl.*)

Pokud zakašleme nebo kýchneme, vyprskneme mikrometrové částice obsahující viry, které jsou z velké části zachyceny chirurgickou rouškou. Tím se dostatečně snižuje riziko šíření infekce mezi lidmi v okolí. Milton a kol. [42] ve studii zahrnující 37 osob nemocných chřipkou zkoumali, zda chirurgická rouška zachytí částice produkované kašlajícím pacientem. Hrubé částice (velikost > 5 μm) byly zachyceny rouškou poměrně účinně, protože částice těchto velikostí uvolněné do okolního prostředí byly zaznamenány jen u 4 ze 37 pacientů. Jinak tomu bylo u jemných částic. Ty byly zaznamenány v okolí 29 z 37 pacientů, kteří měli roušku. Je ovšem nutno dodat, že množství vydechovaných virů se nošením roušky snížilo o 55 %. Rouška také (*rozvrstvením toku vzduchu do větší plochy; pozn. překl.*) zpomaluje částice vyprsknuté zejména během kašlání nebo kýchnutí, a ty se tudíž nedostanou tak daleko. Z toho vyplývá, že je velice důležité, aby chirurgická rouška dobře padla a zakrývala ústa a nos.

6.3 Pokrývky nosu a úst

Pokrývky nosu a úst, také známé jako látkové roušky či prostředky komunitní ochrany, se skládají z jedné nebo více vrstev látky, u které většinou nejsou specifikované filtrační vlastnosti (účinnost a tlaková ztráta). Roušky je možné užívat opakovaně a jsou částečně prátelné. Výsledky měření filtrační účinnosti u komerčně dostupných látkových roušek jsou rozporuplné: jen málokteré látkové roušky mají filtrační účinnost stejnou nebo vyšší než chirurgické roušky, některé látkové roušky zachytávají menší částice v rozmezí 0,1–0,5 μm s velice malou účinností [125, 126]. Filtrační účinnost látkových roušek je obvykle vyšší pro jemné částice ($< 0,1 \mu\text{m}$) vlivem difuze (kapitola 5.1). Drewnick a kol. [126] zkoumali vhodnost různých materiálů z domácnosti pro výrobu látkových roušek. Z použitých materiálů byla filtrační účinnost nejnižší u hedvábí a nejvyšší u dvouvrstvé pleteniny. Dvouvrstvá pletenina dosáhla při zkoušce filtrační účinnosti 75 % pro částice o velikosti 1 μm . Autoři také zkoumali filtrační vlastnosti materiálu ze sáčků do vysavačů. Tento materiál dosáhl s velkým náskokem nejvyšší filtrační účinnosti, pro nejsnáze pronikající velikost částic 0,1 μm to bylo více než 90 %.

(V některých případech se používají i látkové roušky s možností umístit mezi dvě látkové vrstvy také sofistikovanější filtrační materiál. Toto zlepšení obvykle lokálně zlepší filtrační účinnost, ale v některých případech může působit i kontraproduktivně. Může totiž zvýšit dýchací odpor (tlakovou ztrátu) roušky, a díky tomu může paradoxně dojít i ke zhoršení filtrační účinnosti celé roušky, protože pak může větší množství vzduchu procházet netěsnostmi, případně částmi roušky bez přidaného filtračního materiálu; pozn. překl.)

Filtrační účinnost látkových roušek většinou nelze při nákupu zjistit. Obecně se dá ale říct, že dvouvrstvé či vícevrstvé materiály filtrují částice lépe než jednovrstvé, hustější materiály filtrují lépe než řidší a netkané textilie filtrují lépe než tkané. Na druhou stranu, řidší a volnější látky mají nižší dýchací odpor, a je tedy možné kombinovat více vrstev na sebe a dosáhnout tak filtrační účinnosti chirurgických roušek [126, 25].

Momentálně nejsou platné žádné normy, které by popisovaly zkoušení a roztřídění látkových roušek. Ve Švýcarsku [127] a Itálii [128, 129] však již započaly snahy o zlepšení této situace. Francouzský úřad pro technickou normalizaci AFNOR doporučuje, aby byly látkové roušky zkoušeny podle normy EN 149 ve spojení s EN 13274-7:2019, tj. porovnatelně s FFP respirátory [130]. Evropský výbor pro normalizaci (CEN) pořádal workshop (CWA 17553), na kterém byla dosažena shoda ohledně toho, jak zkoušet látkové roušky [131]. Parametry těchto návrhů jsou v tabulce 1.

7. Úkoly pro současný výzkum

GAeF a ČAS vnímají akutní potřebu výzkumu jednak pro lepší porozumění šíření infekce prostřednictvím aerosolů, jednak pro stanovení účinnějších opatření pro potlačení pandemie. Mnohé výzkumné úkoly z této oblasti vyžadují spojené a soustředěné úsilí a spolupráci různých vědních disciplín.

Za nejnaléhavější otevřené vědecké otázky a potřeby GAeF a ČAS považují:

- Maximální podporu spolupráce mezi oblastí výzkumu aerosolů a lékařsko-epidemiologickým výzkumem, výzkumem techniky prostředí a mechanikou tekutin tak, aby se odbornost v těchto oblastech co nejefektivněji propojila.
- Kromě řešení důsledků pandemie je zásadní, aby současně probíhal výše zmíněný interdisciplinární výzkum způsobů šíření onemocnění covidu-19, neboť výzkum „in situ“ může probíhat pouze za podmínek pandemie.
- Velikostní rozdělení částic je podstatné pro všechny způsoby přenosu viru, proto by mělo být lépe zaznamenáváno pomocí vhodných měřicích metod, a stejně tak musejí být zaznamenávány veškeré související parametry (jako např. relativní vlhkost a teplota vzduchu). Tato data totiž představují důležitý základ pro simulaci procesu infekce pomocí počítačového modelování.
- Pro výzkum v době po pandemii je třeba najít vhodné modelové systémy a zkoumat přenositelnost výsledků s různými virovými kmeny.

- Jako symptomy a následné komplikace covidu-19 se často objevují dýchací problémy a redukce plicních objemů. Je třeba zjistit, jaký vliv má znečištění vzduchu na tyto symptomy a obecně na celkový průběh onemocnění.
- Úroveň dosažitelné ochrany prostřednictvím hygienických opatření, větrání a čištění vzduchu by měla být vyhodnocena pomocí teoretických simulačních modelů a doprovodných modelových experimentů zaměřených na přenos virů a dalších patogenů pomocí aerosolů.
- Je nutné získat více poznatků o „akutní fázi“ infekce, při níž dochází k nejvyšší produkci aerosolů a virů, aby tomu bylo možno přizpůsobit karanténní opatření.
- Zatím nebyla dostatečně prozkoumána doba infekčnosti virů nesených aerosolem a jiných patogenů. To si pravděpodobně vyžádá vývoj nových metod pro vyhodnocení infekčnosti ve srovnání s ostatními způsoby přenosu infekce. Tento bod též zahrnuje otázku minimální virové dávky nutné k tomu, aby propukla infekce.
- Malá pozornost byla také věnována účinnosti UV záření proti virům rozptýleným ve vzduchu. Konkrétně chybí informace o nutné expoziční dávce (intenzita \times expoziční čas) k inaktivaci virů ve vzduchu. Tato otázka je podstatná zejména pro čističky vzduchu a ventilační systémy bez filtrů, v nichž viry setrvávají velmi krátkou dobu. Stále také chybí možnosti jak toto testovat v reálných podmínkách.

- S ohledem na patogeny šířené aerosolem je nutné vyhodnotit vliv různých konceptů větrání vhodných pro školy, veřejné budovy a místa, kde dochází ke shlukování lidí. Je nutné minimalizovat ekonomické škody a zvážit se musí také energetická účinnost a ochrana klimatu.
- Je třeba podrobit zkoumání možné nežádoucí vedlejší produkty systémů pro čištění vzduchu, jako je např. ozón a těkavé organické látky, a jejich vliv na formování sekundárních aerosolů ve vnitřních prostorech. Toto je potřeba experimentálně zkoumat jak v laboratořích, tak i v reálných vnitřních prostorách.
- Musí být obecně posílen výzkum kvality vnitřního prostředí současně s monitorováním vnějšího prostředí, neboť lidé tráví většinu času (v Evropě typicky přes 90 %) ve vnitřních prostorech budov.
- Výrazně chybí systematický výzkum těsnosti respirátorů a roušek všech typů, a to zejména při vydechování za reálných podmínek.

Aby bylo možno vypořádat se se všemi zmíněnými úkoly včas a v dostatečné míře, je třeba současný výzkum rozšířit a alokovat další zdroje v co nejkratším čase. Vyčlenění výzkumných fondů by mělo cílit na konkrétní interdisciplinární témata s cílem vyvinout seznam vhodných opatření pro budoucí pandemické situace. V porovnání s ekonomickými škodami způsobenými současnou pandemií by mělo být jasné, jaké výhody pro budoucnost nám může poskytnout včasný a dostatečně široce koncipovaný vědecký výzkum.

8. Autoři a signatáři

Toto souborné stanovisko německé Společnosti pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung, GAeF) bylo sepsáno následujícími autory:

Dr. Christof Asbach, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Duisburg, Deutschland; Präsident der GAeF · Prof. Dr. Andreas Held, Technische Universität Berlin, Deutschland; stellv. Präsident der GAeF · Prof. Dr. Astrid Kiendler-Scharr, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Deutschland; ehemalige GAeF-Präsidentin · Dr. Gerhard Scheuch, GS-Bio-Inhalation GmbH, Gemünden, Deutschland · Prof. Dr. Hans-Joachim Schmid, Universität Paderborn, Deutschland · Dr. Sebastian Schmitt, TSI GmbH, Aachen; Kassenführer der GAeF · Dr. Stefan Schumacher, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Duisburg, Deutschland · Dr. Birgit Wehner, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland; Generalsekretärin der GAeF · Prof. Dr. Ernest Weingartner, Fachhochschule Nordwestschweiz, Windisch, Schweiz · Prof. Dr. Bernadett Weinzierl, Universität Wien, Österreich; ehemalige stellvertretende GAeF-Präsident

Stanovisko bylo před publikováním předloženo všem členům Gesellschaft für Aerosolforschung v německém a anglickém jazyce pro informaci a s žádostí o komentáře. Následující odborníci z oblasti výzkumu aerosolů tento dokument podpořili. Osoby označené hvězdičkou * přispěly komentáři a doplněním.

Prof. Dr. Urs Baltensperger, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Schweiz · Dr. Sébastien Bau*, Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Nancy, Frankreich · Dr. Paulus Bauer*, Universität Wien, Österreich · Daniel Becker*, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Deutschland · Klaus Beckert, ENVILYSE GmbH, Essen, Deutschland · Nicholas Beres, Universität Wien, Österreich · Dr. Bernd Benker*, CUTEC - Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland · Oliver F. Bischof*, TSI GmbH, Aachen und IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Prof. Dr. Pratim Biswas, President of IARA, University of Miami, FL, USA · Dr.-habil. Andrei Bologna, Karlsruher Institut für Technologie, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland · Dr. Harald Bresch*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland · Dr. Ulrich Bundke, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Dr. Julia Burkart, Universität Wien, Österreich · Prof. Dr. Heinz Burtscher*, Fachhochschule Nordwestschweiz, Windisch, Schweiz · Dr. Ana Isabel Calvo Gordaliza, Universidad de León, Spanien · Prof. Dr. Jose L. Castillo*, UNED-Facultad de Ciencias, Madrid, Spanien · Prof. Dr. Daren Chen, Virginia Commonwealth University, Richmond, VA, USA · Gang Chen, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Schweiz · Dr. Charles Clement*, University College London, UK · Dr. Martine Collaud Coen, Meteoswiss, Payerne, Schweiz · Dr. José Carlos Morán Cofre*, Normandie Université, UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS, CORIA, Rouen, Frankreich · Dr. Guy Coulson, National Institute of Water and Atmospheric Research, Auckland, Neuseeland · Prof. Dr. Joachim Curtius*, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Deutschland · Dr. Florian Dahlkötter, TSI GmbH, Aachen, Deutschland · Dr. Carmen Dameto, Universität Wien, Wien, Österreich · Prof. Dr. Knut Deppert,

Lund University, Lund, Schweden · Dr. Karoline Diehl, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Deutschland · Prof. Dr. Mohamed Diouri*, Université Mohamed Premier, Oujda-Angad, Marokko · Dr. Florian Ditas, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, Deutschland · Dr. Jeannine Ditas, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Deutschland · Prof. Dr. Achim Dittler*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland · Maximilian Dollner*, Universität Wien, Wien, Österreich · Yannis Drossinos*, Joint Research Center, Europäische Kommission, Ispra, Italien · Prof. Dr. Derek Dunn-Rankin, University of California, Irvine, CA, USA · Prof. Dr. Uli Dusek, Energy and Sustainability Research Institute, Groningen, Niederlande · Sebastian Düsing, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland · Prof. Dr. Paulo Fialho, Institute for Volcanology and Risk Assessment, University of the Azores, Portugal · Prof. Dr. Heinz Fissan, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland · Prof. Dr. Mathias Forjan*, Fachhochschule Technikum Wien, Österreich · Prof. Dr. Roberto Fraile, Universidad de León, Spanien · Dr. Andrew Freedman, Aerodyne Research, Inc., Billerica MA, USA · Dr. Franz Friebel, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz · Pedro L. Garcia-Ybarra*, Universidad Nacional de Educacion a Distancia Senda del Rey 9, Madrid, Spanien · Dr. Josef Gasteiger*, Universität Wien, Österreich · Prof. Dr. Michael J. Gatari, University of Nairobi, Kenia · Dr. Georgios Gkatzelis, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Daniel Göhler*, TOPAS GmbH, Dresden, Deutschland · Dr. Dmitry Golentsov, GAeF Mitglied, Russland · Dr. Irena Grgić, National Institute of Chemistry, Ljubljana, Slowenien · Prof. Dr. Sergey A. Grinshpun*, University of Cincinnati, OH, USA · Dr. Stephan Grosse*, TOPAS GmbH, Dresden, Deutschland · Dr. Martin Gysel-Ber, Paul-Scherrer-Institut, Villigen PSI, Schweiz · Barbara Harm-Altstädter*, Technische Universität Braunschweig, Deutschland · Dr. Michael Heim, Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg, Deutschland · Dr. Silvia Henning, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland · Prof. Dr. Hartmut Herrmann, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland · Dr. Markus Hermann, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig · Dr. Lars Hillemann*, TOPAS GmbH, Dresden, Deutschland · Dr. Dieter Hochrainer, Pensionär (ehem. Generalsekretär der GAeF), Oberkirchen, Deutschland · Prof. Dr. Werner Hofmann, Universität Salzburg, Österreich · Prof. Dr. Helmuth Horvath*, Universität Wien, Österreich · Dr. Christoph Hüglin*, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz · Tim Hülser, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Duisburg, Deutschland · Prof. Dr. Ruprecht Jaenicke*, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Deutschland · Prof. Dr. Keld Alstrup Jensen*, National Research Center for the Working Environment (NRCWE), Kopenhagen, Dänemark · Dr. Gregor Jereb*, University of Ljubljana, Ljubljana, Slowenien · Prof. Dr. Jingkun Jiang, Tsinghua University, Peking, China · Prof. Dr. Markus Kalberer, Universität Basel, Basel, Schweiz · Erwin Karg*, Helmholtz Zentrum München, München, Deutschland · Prof. Dr. Konrad Kandler*, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland · Dr. Matthias Karl, Helmholtz Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung, Geesthacht, Deutschland · Dr. Alejandro Keller, Fachhochschule Nordwestschweiz, Windisch, Schweiz · Prof. Dr. David B. Kittelson, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA · Dr. Wolfgang Koch*, Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM), Hannover, Deutschland · Prof. Dr. Athanasios G. Konstandopoulos, Aristotle University and Centre for Research & Technology-Hellas, Thessaloniki, Griechenland · Dr. Martina Krämer*, IEK-7: Stratosphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Dr. Alois Krasenbrink, Joint Research Centre, Europäische Kommission, Ispra, Italien · Dr. Wolfgang G.

Kreyling*, Institut für Epidemiologie, Helmholtz-Zentrum München, Deutschland · Dr. Ana Kroflič*, Kemijski inštitut, Ljubljana, Slowenien · Prof. Dr. Markku Kulmala*, University of Helsinki, Finland · PD Dr. Andreas Kürten*, Goethe Universität Frankfurt am Main, Deutschland · Dr. Carsten Kykal*, TSI GmbH, Aachen, Deutschland · Peter Lauer*, MAN Energy Solutions SE, Augsburg, Deutschland · Prof. Dr. Chung-Te Lee, National Central University, Zhongli, Taoyuan, Taiwan · Dr. Martin Lehmann*, Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg, Deutschland · Dr.-Ing. Christian Lübbert*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland · Dr. Janet Marie Macher, University of California, Berkeley, CA, USA · Prof. Dr. Lutz Mädler, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien und Universität Bremen, Deutschland · Prof. Dr. Willy Maenhaut, Ghent University, Belgien · Nina Mahernndl, Universität Wien, Österreich · Dr. Christoph Mahnke*, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Dr. Anne Maisser, The Cyprus Institute, Nicosia, Zypern · Dr. Alexander Mangold, Royal Meteorological Institute of Belgium, Brüssel, Belgien · Dr. Jesús Marval, Politecnico di Torino, Turin, Italien · Andreas Massling, Aarhus University, Roskilde, Dänemark · Dr. Roger O. McClellan, DVM, MMS, DSc(Honorary), Independent Advisor, Inhalation Toxicology and Human Risk Analysis, Albuquerque, NM, USA · Dr. Amewu A. Mensah, Umwelt- und Gesundheitsschutz, Fachbereich Luftqualität, Stadt Zürich, Schweiz · PD Dr. Thomas Mentel*, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Prof. Dr. Maria Messing*, Lund University, Lund, Schweden · Dr. Emilio Milla*, Madrid, Spanien · Dr. Rob L. Modini, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Schweiz · Dr. Ali Mohamadi-Nasrabadi, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Duisburg, Deutschland · Prof. Dr. Claudia Mohr, Stockholm University & Bolin Centre for Climate Research, Stockholm, Schweden · Dr. Otmar Möhler, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland · Prof. Dr. Peter Molnár, Sahlgrenska University Hospital and University of Gothenburg, Göteborg, Schweden · Vaios Moschos, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Schweiz · Erny Niederberger, Swisens AG, Horw, Schweiz · Prof. Dr. Reinhard Niessner, Technische Universität München, Deutschland · Richard Paštěka, Brno University of Technology, Brünn, Tschechische Republik · Dr. Hanns-Rudolph Paur*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland · Dr. Markus Pesch, Grimm Aerosol Technik Ainring GmbH & CO.KG, Ainring, Deutschland · Christian Peters*, TOPAS GmbH, Dresden, Deutschland · PD Dr. Andreas Petzold, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Prof. Dr. Wolfgang Peukert*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland · Christian Pilz, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland · Dr. Calle Preger*, Lund University, Lund, Schweden · Pragati Rai, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Schweiz · Dr. Jürgen Reith, TSI GmbH, Aachen, Deutschland · Prof. Dr. Francisco José Olmo Reyes, Universidad de Granada, Spanien · Dr. Andreas Rudolph*, TOPAS GmbH, Dresden, Deutschland · Prof. Dr. Imre Salma, Eötvös University, Budapest, Ungarn · Dr. Daniel Sauer, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Oberpfaffenhofen, Deutschland · Dr. Mark Scerri, L-Università ta' Malta, Msida, Malta · Dr. Helmut Schaffernicht*, Overath, Deutschland · Prof. Dr.-Ing. Annette Schafmeister, Hochschule Biberach, Deutschland · Dr. Jürg Schlatter, Liebefeld, Schweiz · Prof. Dr. Julia Schmale*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz · Dr. Otmar Schmid, Helmholtz Zentrum München, Neuherberg/München, Deutschland · Prof. Dr. Eberhard Schmidt, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland · Prof. Dr. Andreas Schmidt-Ott*, Technische Universität Delft, Niederlande · Dr. Johannes Schneider*, Max Planck Institut für Chemie, Mainz, Deutschland · Manuel Schöberl, Universität Wien, Österreich · Dr. Christiane Schulz,

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland und Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, Deutschland · Dr. Stephen E. Schwartz*, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA · Dr. Martin Seipenbusch, ParteQ GmbH, Malsch, Deutschland · Nikolina Leona Serdarević*, Technische Universität Berlin, Deutschland · Dr. Stefan Seeger*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland · Prof. Dr. Michael Shapiro*, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel · Dr. Pourya Shahpoury*, Environment and Climate Change Canada (ECCC), Toronto, Kanada · Timur Sograb, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russland · Prof. Dr. Georgios A. Sotiriou, Karolinska Institutet, Stockholm, Schweden · Jürgen Spielvogel, TSI GmbH, Aachen, Deutschland · Dr. Gerald Spindler, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Tropos), Leipzig, Deutschland · Prof. Dr. Michael Stintz, Technische Universität Dresden, Dresden · Dr. Frank Stratmann, Institut für Troposphärenforschung, Leipzig, Deutschland · Prof. Dr. Wladyslaw W. Szymanski, Universität Wien, Österreich · Dr. Gerhard Steiner, Grimm Aerosol Technik Ainring GmbH & CO.KG, Ainring, Deutschland · Prof. Dr. Eduard Tamm, University of Tartu, Estland · Prof. Dr. Alexandra Teleki, Uppsala University, Uppsala, Schweden · Marilena Teri, Universität Wien, Österreich · Dr. Ana Maria Todea*, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V., Duisburg, Deutschland · Dr. Torsten Tritscher, TSI GmbH, Aachen, Deutschland · Una Trivanovic, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, Schweiz · Prof. Dr. Paolo Tronville*, Politecnico di Torino, Turin, Italien · Dr. Janek Uin, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA · Dr. Marko Vana, University of Tartu, Estland · Prof. Dr. Reinhard Vehring, University of Alberta, Edmonton, Kanada · Dr. Silvia López Vidal, RAMEM SA, Madrid, Spanien · Prof. Dr. Yrjö Viisanen, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland · Dr. Bernhard Vogel, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland · Patrick Weber, IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland · Prof. Dr. Stephan Weinbruch, Technische Universität Darmstadt, Deutschland · Dr. Frederik Weis, Palas GmbH, Karlsruhe, Deutschland · Prof. Dr. Peter Wiesen*, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland · Prof. Dr. Paul Winkler, Universität Wien, Österreich · Dr. Richard Winterhalter, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, München, Deutschland · Peter Wlasits, Universität Wien, Österreich · Dr. Sabine Wurzler*, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), Recklinghausen, Deutschland · Prof. Dr. Valery Zagaynov, National Research Nuclear University MEPhI, Moskau, Russland · Prof. Dr. Shamil Zaripov*, Kazan Federal University, Kazan, Russland · Prof. Dr. Thomas Zeuch*, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Deutschland · Prof. Dr. Paul Zieger*, Stockholm University, Stockholm, Schweden · Volker Ziegler*, Grimm Aerosol Technik Ainring GmbH & CO.KG, Ainring, Deutschland

9. Literatur

- [1] L. Morawska, J. Tang, W. Bahnfleth, P. Bluyssen, A. Boerstra, G. Buonanno, J. Cao, S. Dancer, A. Floto, F. Franchimon, C. Haworth, J. Hogeling, C. Isaxon, J. Jimenez, J. Kurnitski, Y. Li, M. Loomans, G. Marks und L. e. a. Marr, „How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?“, *Environment International*, Bd. 142, p. 105832, 2020.
- [2] Y. Li, H. Qian, J. Hang, X. Chen, L. Hong, P. Liang, J. Li, S. Xiao, J. Wei, L. Liu und M. Kang, „Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant,“ *medRxiv* (pre-print), p. <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>, 2020.
- [3] N. van Doremalen, D. Morris, M. Holbrook, A. Gamble, B. Williamson, A. Tamin, J. Harcourt, N. Thornburg, S. Gerber, J. Lloyd-Smith, E. de Wit und V. Munster, „Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1,“ *New England Journal of Medicine*, Bd. 382, pp. 1564-1567, 2020.
- [4] J. Seinfeld und S. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Bd. 3rd edition, Wiley, 2016, p. 1152.
- [5] V. McNeill, „Atmospheric Aerosols: Clouds, Chemistry, and Climate,“ *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, Bd. 8, pp. 427-444, 2017.
- [6] T. Hoffmann, C. Zetzsch und M. Rossi, „Chemie von Aerosolen,“ *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 41, pp. 232-246, 2007.
- [7] P. Bruckmann und T. Eikmann, „Feinstäube und menschliche Gesundheit,“ *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 41, pp. 248-253, 2007.
- [8] J. Schnelle-Kreis, M. Sklorz, H. Hermann und R. Zimmermann, „Atmosphärische Aerosole: Quellen, Vorkommen, Zusammensetzung,“ *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 41, pp. 220-230, 2007.
- [9] W. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, New York: Wiley, 1999.
- [10] M. Kulmala, „How particles nucleate and grow,“ *Science*, Bd. 302, pp. 1000-1001, 2003.
- [11] Y.-H. Jin, L. Cai, Z.-S. Cheng, H. Cheng, T. Deng, Y.-P. Fan, C. Fang, D. Huang, L.-Q. Huang, Q. Huang, Y. Han, B. Hu, F. Hu, B.-H. Li, Y.-R. Li, K. Liang, L.-K. Lin, L.-S. Luo, J. Ma, L.-L. Ma, Y.-Z. Peng, Y.-B. Pan und e. al., „A rapid advice guideline for the diagnosis and treatment of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) infected pneumonia (standard version),“ *Military Medical Research*, Nr. 7, p. 4, 2020.
- [12] J. Jiang, Y. Fu, L. Liu und M. Kulmala, „Transmission via aerosols: Plausible differences among emerging coronaviruses,“ *Aerosol Science and Technology*, Bd. 54, pp. 865-868, 2020.
- [13] Y. Drossinos und N. Stilianakis, „What aerosol physics tells us about airborne pathogen transmission,“ *Aerosol Science and Technology*, Bd. 54, pp. 639-643, 2020.
- [14] L. Bourouiba, „Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions - Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19,“ *JAMA*, Bd. 323, pp. 1837-1838, 2020.
- [15] A. Einstein, „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen,“ *Annalen der Physik*, Bd. 322, pp. 549-560, 1905.
- [16] M. Smoluchowski, „Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen,“ *Annalen der Physik*, Bd. 326, pp. 756-780, 1906.

- [17] R. Brown, *Air Filtration - An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*, Exeter: Pergamon Press, 1993.
- [18] J. Heyder, J. Gebhart, G. Rudolf, C. Schiller und W. Stahlhofen, „Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-15 μm ,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 17, pp. 811-825, 1986.
- [19] V. Vuorinen, M. Aarnio, M. Alava, V. Alopaeus, N. Atanasova, M. Auvinen, B. H. Balasubramanian, E. P., R. Grande, N. Hayward, A. Hellsten, S. Hostikka, J. Hokkanen, O. Kaario, A. Karvinen, I. Kivistö, M. Korhonen und e. al., „Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors,“ *Safety Science*, Bd. 130, p. 104866, 2020.
- [20] A. Ahlawat, A. Wiedensohler und S. Mishra, „An overview on the role of relative humidity in airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments,“ *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 20, pp. 1856-1861, 2020.
- [21] K. Lin und L. Marr, „Humidity-dependent decay of viruses, but not bacteria, in aerosols and droplets follows disinfection kinetics,“ *Environmental Science and Technology*, Bd. 54, pp. 1024-1032, 2020.
- [22] W. Wells, „On Air-borne Infection. Study II. Droplets and Droplet Nuclei,“ *American Journal of Hygiene*, Bd. 20, pp. 611-618, 1934.
- [23] D. Parienta, L. Morawska, G. Johnson, Z. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, S. Corbett, C. Chao, Y. Li und D. Katoshevski, „Theoretical analysis of the motion and evaporation of exhaled respiratory droplets of mixed composition,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 42, pp. 1-10, 2011.
- [24] D. Kincaid und T. Longley, „A water droplet evaporation and temperature model,“ *Transactions of the ASAE*, Bd. 32, pp. 457-463, 1989.
- [25] F. e. a. Drewnick, „Abscheideeffizienz von Mund-Nasen-Schutz Masken, selbstgenähten Gesichtsmasken, potentiellen Maskenmaterialien sowie „Community Masken“,“ 20 05 2020. [Online]. Available: https://www.mpic.de/4670174/filtermasken_zusammenfassung.pdf. [Zugriff am 25 11 2020].
- [26] J. Gebhart, J. Anselm, J. Heyder und W. Stahlhofen, „The Human Lung as Aerosol Generator,“ *Journal of Aerosols in Medicine*, Bd. 1, pp. 196-197, 1988.
- [27] G. Johnson und L. Morawska, „The mechanism of breath aerosol formation,“ *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, Bd. 22, pp. 229-237, 2009.
- [28] B. Bake, E. Ljungström, A. Claesson, H. Carlsen, H. M. und A. Olin, „Exhaled Particles after a Standardized Breathing Maneuver,“ *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, Bd. 30, pp. 267-273, 2017.
- [29] B. Bake, P. Larsson, G. Ljungkvist, E. Ljungström und A. Olin, „Exhaled particles and small airways,“ *Respiratory Research*, Bd. 20, pp. 1-14, 2019.
- [30] P. Larsson, E. Mirgorodskaya, L. Samuelsson, B. Bake, A. Almstrand, A. Bredberg und A. Olin, „Surfactant protein A and albumin in particles in exhaled air,“ *Respiratory Medicine*, Bd. 106, pp. 197-204, 2012.
- [31] S. Kokelj, J. Kim, M. Andersson, E. G. B. Bake und A. Olin, „Intra-individual variation of particles in exhaled air and of the contents of Surfactant protein A and albumin,“ *PLoS One*, Bd. 15, p. e0227980, 2020.
- [32] K. Haslbeck, K. Schwarz, J. Hohlfeld, J. Seume und W. Koch, „Submicron droplet formation in the human lung,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 41, pp. 429-438, 2010.
- [33] K. Schwarz, H. Biller, H. Windt, W. Koch und J. Hohlfeld, „Characterization of exhaled particles from the healthy human lung - A systematic analysis in relation to pulmonary function variables,“ *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, Bd. 23, pp. 371-379, 2010.
- [34] K. Schwarz, H. Biller, H. Windt, W. Koch und J. Hohlfeld, „Characterization of exhaled particles from the human lungs in airway obstruction,“ *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, Bd. 28, pp. 52-58, 2015.
- [35] G. Scheuch, „Breathing is enough: For the spread of influenza virus and SARS-CoV-2 by breathing only,“ *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, Bd. 33, pp. 230-234, 2020.
- [36] J. Ma, X. Qi, H. Chen, X. Li, Z. Zhang, H. Wang, L. Sun, L. Zhang, J. Guo, L. Morawska, G. S., P. Biswas, R. Flagan und M. Yao, „COVID-19 patients in earlier stages exhaled millions of SARS-CoV-2 per hour,“ *Clinical Infectious Diseases*, p. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1283>, 2020.
- [37] F. Gregson, N. Watson, C. Orton, A. Haddrell, L. McCarthy, T. Finnie, N. Gent, G. Donaldson, P. Shah, J. Calder und e. al., „Comparing the Respirable Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing,“ *ChemRxiv (preprint)*, p. https://chemrxiv.org/articles/preprint/Comparing_the_Respirable_Aerosol_Concentrations_and_Particle_Size_Distributions_Generated_by_Singing_Speaking_and_Breathing/12789221/1, 2020.
- [38] D. Mürbe, M. Fleischer, J. Lange, H. Rotheudt und M. Kriegel, „Aerosol emission is increased in professional singing,“ (Preprint), pp. <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/11490>, 2020.
- [39] C. Stadnytskyi, C. Bax, A. Bax und P. Anfinrud, „The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission,“ *PNAS*, Bd. 117, pp. 11875-11877, 2020.
- [40] S. Asadi, A. Wexler, C. C. S. Barreda, N. Bouvier und W. Ristenpart, „Aerosol emission and super-emission during human speech increase with voice loudness,“ *Scientific Reports*, Bd. 9, pp. 1-10, 2019.
- [41] P. Fabian, J. McDevitt, W. DeHaan, R. Fung, B. Cowling, K. Chan, G. Leung und D. Milton, „Influenza virus in human exhaled breath: An observational study,“ *PLoS One*, Bd. 3, p. e2691, 2008.
- [42] D. Milton, M. Fabian, B. Cowling, G. M. und J. McDevitt, „Influenza Virus Aerosols in Human Exhaled Breath: Particle Size, Culturability, and Effect of Surgical Masks,“ *PLoS Pathology*, Bd. 9, p. e1003205, 2013.
- [43] W. Lindsley, B. F. und D. e. a. Beezhold, „Viable influenza A virus in airborne particles expelled during coughs versus exhalations,“ *Influenza and Other Respiratory Viruses*, Bd. 10, pp. 404-413, 2016.
- [44] P. Fabian, J. McDevitt, W. Lee, E. Houseman und D. Milton, „An optimized method to detect influenza virus and human rhinovirus from exhaled breath and the airborne environment,“ *Journal of Environmental Monitoring*, Bd. 11, pp. 314-317, 2009.
- [45] B. Wang, A. Zhang, J. Sun, H. Liu, J. Hu und L. Xu, „Study of SARS transmission via liquid droplets in air,“ *Journal of Biomedical Engineering*, Bd. 127, pp. 32-38, 2005.
- [46] J. Gralton, E. Tovey, M. Mclaws und W. Rawlinson, „Respiratory virus RNA is detectable in airborne and droplet particles,“ *Journal of Medical Virology*, Bd. 85, pp. 2151-2159, 2013.
- [47] A. Mitchell, B. Mourad, E. Tovey, L. Buddle, M. Peters, L. Morgan und B. Oliver, „Spirometry filters can be used to detect exhaled respiratory viruses,“ *Journal of Breath Research*, Bd. 10, p. 046002, 2016.
- [48] L. Yip, M. Finn, A. Granados, K. Prost, A. McGeer, J. Gubbay, J. Scott und S. Mubareka, „Influenza virus RNA recovered from droplets and droplet nuclei emitted by adults in an acute care setting,“ *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Bd. 16, pp. 341-348, 2019.

- [49] E. Shiu, W. Huang und D. Ye, „Frequent recovery of influenza A but not influenza B virus RNA in aerosols in pediatric patient rooms,” *Indoor Air*, Bd. 30, pp. 805-815, 2020.
- [50] L. Morawska und J. Cao, „Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality,” *Environment International*, Bd. 139, p. 105730, 2020.
- [51] S. Smither, L. Eastough, J. Findlay und M. Lever, „Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity,” *EMerging Microbes & Infections*, Bd. 9, pp. 1415-1417, 2020.
- [52] A. Brlek, Š. V. S. Vidovič, K. Turk und Z. Simonović, „Possible indirect transmission of COVID-19 at squash court, Slovenia, March 2020: case report,” *Epidemiology and Infection*, Bd. 148, pp. 1-3, 2020.
- [53] A. Fears, W. Klimstra, P. Duprex, A. Hartman, S. Weaver, K. Plante, D. Mirchandani, J. Plante, P. Aguilar, D. Fernández, A. Nalca und e. al., „Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions,” *Emerging Infectious Diseases*, Bd. 26, pp. 2168-2171, 2020.
- [54] J. Lednický, M. Lauzardo, Z. Fan, A. Jutla, T. Tilly, M. Gangwar, M. Usmani, S. Shankar, K. Mohamed, A. Eiguren-Fernandez, C. Stephenson, M. Alam, M. Elbadry, J. Loeb, K. Subramaniam, T. Waltzek, K. Cherabuddi und e. al., „Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients,” *medRxiv* (preprint), p. <https://doi.org/10.1101/2020.08.03.20167395>, 2020.
- [55] L. Zhou, M. Yao, X. Zhang, B. Hu, X. Li, H. Chen, L. Zhang, Y. Liu, M. Du, B. Sun, Y. Jiang, K. Zhou, J. Hong, N. Yu, Z. Ding, Y. Xu, M. Hu, L. Morawska, S. Grinshpun, P. Biswas, R. Flagan, B. Zhu, W. Liu und Y. Zhang, „Breath- air- and surface-borne SARS-CoV-2 in hospitals,” *Journal of Aerosol Science*, p. in press (<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105693>), 2020.
- [56] H. Qian, T. Miao, L. Liu, X. Zheng, D. Luo und Y. Li, „Indoor transmission of SARS-CoV-2,” *medRxiv* (preprint), p. <https://doi.org/10.1101/2020.04.04.20053058doi>, 2020.
- [57] S. Das, J.-e. Alam, S. Plumari und V. Greco, „Transmission of airborne virus through sneezed and coughed droplets,” *AIP Physics of Fluids*, Bd. 32, p. 097102, 2020.
- [58] Kommission Innenraumhygiene des UBA, „Richtiges Lüften reduziert Risiko der SARS-CoV-2-Infektion,” *Umweltbundesamt*, 13 08 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/richtiges-lueften-reduziert-risiko-der-sars-cov-2>. [Zugriff am 02 12 2020].
- [59] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, „Kitas richtig Lüften mit Hilfe der CO2-App,” *Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)*, 30 09 2020. [Online]. Available: https://www.dguv.de/de/mediencenter/pm/pressearchiv/2020/quartal_3/details_3_406030.jsp. [Zugriff am 02 12 2020].
- [60] A. Todea, F. Schmidt, T. Schuldt und C. Asbach, „Development of a method to determine the fractional deposition efficiency of full scale HVAC and HEPA filter cassettes for nanoparticles >3.5 nm,” *Atmosphere*, Bd. 11, p. 1191, 2020.
- [61] C. Wang und Y. Otani, „Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 52, pp. 5-17, 2013.
- [62] J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces* (3rd edition), Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [63] X. Wang, K. Kim, C. Lee und J. Kim, „Prediction of air filter efficiency and pressure drop in air filtration media using a stochastic simulation,” *Fibers and Polymers*, Bd. 9, pp. 34-38, 2008.
- [64] S.-C. Wang, „Electrostatic forces in fibrous filters - a review,” *Powder Technology*, Bd. 118, pp. 166-170, 2001.
- [65] R. Thakur, D. Da und A. Das, „Electret Air Filters,” *Separation & Purification Reviews*, Bd. 42, pp. 87-129, 2013.
- [66] N. A. Fuchs, „On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere,” *Pure and Applied Geophysics*, Bd. 56, pp. 185-193, 1963.
- [67] F. Romay, B. Liu und S. Chae, „Experimental study of electrostatic capture mechanisms in commercial electret filters,” *Aerosol Science & Technology*, Bd. 28, pp. 224-234, 1998.
- [68] R. Lathrache und H. Fissan, „Fractional penetrations for electrostatically charged fibrous filters in the submicron particle size range,” *Particle Characterization*, Bd. 3, pp. 74-80, 1986.
- [69] M. Kerner, K. Schmidt, S. Schumacher, V. Puderbach, C. Asbach und S. Antonyuk, „Evaluation of electrostatic properties of electret filters for aerosol deposition,” *Separation and Purification Technology*, Bd. 239, p. 116548, 2020.
- [70] J. Van Turnhout, W. Hoeneveld, J. Adamse und L. Van Rossen, „Electret filters for high-efficiency and high-flow air cleaning,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. IA 17, pp. 240-248, 1981.
- [71] L. Janssen und J. Bidwell, „Performance of four class 95 electret filters against diesel particulate matter,” *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, Bd. 23, pp. 21-29, 2006.
- [72] G. Bostock, „Electret filter for respiratory protection,” in *Electret Filters, Production and Properties, Proceedings of the International Workshop on Electret Filters, Production and Properties*, Warsaw, Poland, January 29 and 30, 1999, 1999, pp. 59-68.
- [73] S. Schumacher, D. Spiegelhoff, U. Schneiderwind, H. Finger und C. Asbach, „Performance of new and artificially aged electret filters in indoor air cleaners,” *Chemical Engineering & Technology*, Bd. 41, pp. 27-34, 2018.
- [74] D. Bémer und S. Calleé, „Evolution of the efficiency and pressure drop of a filter media with loading,” *Aerosol Science and Technology*, Bd. 33, pp. 427-439, 2000.
- [75] L. Janssen, J. Bidwell, H. Mullins und T. Nelson, „Efficiency of degraded electret filters: Part I - Laboratory testing against NaCl and DOP before and after exposure to workplace aerosols,” *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, Bd. 20, pp. 71-80, 2003.
- [76] M. Lehtimäki und K. Heinonen, „Reliability of Electret Filters,” *Building and Environment*, Bd. 29, pp. 353-355, 1994.
- [77] A. Viraneva, T. Yovcheva, E. Gencheva und G. Mekishev, „Low pressure and humidity influences on the electret surface potential decay,” *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 253, p. 012069, 2010.
- [78] E. Motyl und B. Łowkis, „Effect of air humidity on charge decay and lifetime of PP electret nonwovens,” *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Bd. 14, pp. 39-42, 2006.
- [79] H.-J. Choi, E.-S. Park, J.-U. Kim, S.-H. Kim und M.-H. Lee, „Experimental study on charge decay of electret filter due to organic solvent exposure,” *Aerosol Science & Technology*, Bd. 49, pp. 977-983, 2015.
- [80] J. Kim, J. Hinestroza, W. Jasper und R. Barker, „Effect of solvent exposure on the filtration performance of electrically charged polypropylene filter media,” *Textile Research Journal*, Bd. 79, pp. 343-350, 2009.
- [81] S. Schumacher, R. Jasti und C. Asbach, „Einfluss von Entladungsmethode und Aerosolmaterial auf die Abscheideeffizienz von Elektretfiltern,” *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, Bd. 78, pp. 316-322, 2018.
- [82] T. Lin, C. Tseng, Y. Huang, H. Lin, C. Lai und S. Lee, „Effectiveness of N95 facepiece respirators in filtering aerosol following storage and sterilization,” *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 20, pp. 833-843, 2020.

- [83] D. Viscusi, M. Bergmann, E. Sinkule und R. Shaffer, „Evaluation of the filtration performance of 21 N95 filtering face piece respirators after prolonged storage,” *American Journal of Infection Control*, Bd. 37, pp. 381-386, 2009.
- [84] D. Ciuzas, T. Prasauskas, E. Krugly, A. Jurelionis, L. Seduikyte und D. Martucevicius, „Indoor air quality management by combined ventilation and air cleaning: An experimental study,” *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 16, pp. 2550-2559, 2016.
- [85] J. Pei, C. Dong und J. Liu, „Operating behavior and corresponding performance of portable air cleaners in residential buildings, China,” *Building and Environment*, Bd. 147, pp. 473-481, 2019.
- [86] J. Siegel, „Primary and secondary consequences of indoor air cleaners,” *Indoor Air*, Bd. 26, pp. 88-96, 2016.
- [87] H. J. Kim, B. Han, Y. J. Kim, Y. H. Yoon und T. Oda, „Efficient test method for evaluating gas removal performance of room air cleaners using FTIR measurement and CADR calculation,” *Building and Environment*, Bd. 47, pp. 385-393, 2012.
- [88] E. Budowsky, S. Bresler, E. Friedman und N. Zheleznova, „Principles of selective inactivation of viral genome,” *Archives of Virology*, Bd. 68, pp. 239-247, 1981.
- [89] J. Kim und J. Jang, „Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time,” *Aerosol Science and Technology*, Bd. 52, pp. 557-566, 2018.
- [90] K. Shiraki, H. Yamada, Y. Yoshida, A. Ohno, T. Watanabe, T. Watanabe, H. Watanabe, H. Watanabe, M. Yamaguchi, F. Tokuoka, S. Hashimoto, M. Kawamura und N. Adachi, „Improved photocatalytic air cleaner with decomposition of aldehyde and aerosol-associated influenza virus infectivity in indoor air,” *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 17, pp. 2901-2912, 2017.
- [91] M. Heßling, K. Hönes, P. Vatter und C. Lingenfelder, „Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation - review and analysis of coronavirus photoinactivation studies,” *GMS Hygiene and Infection Control*, Bd. 15, pp. 1-8, 2020.
- [92] I. Hamzavi, A. Lyons, I. Kohli, S. Narla, A. Parks-Miller, J. Gelfand, H. Lim und D. Ozog, „Ultraviolet germicidal irradiation: Possible method for respirator disinfection to facilitate reuse during the COVID-19 pandemic,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, Bd. June 2020, pp. 1511-1512, 2020.
- [93] H. Finger, U. Schneiderwind und C. Asbach, „Bewertung mobiler Raumluftreinigungsgeräte,” *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, Bd. 75, pp. 497-502, 2015.
- [94] W. Jeon, B. Lee, H. Yun, J. Kim, S. Kang und Y. Seo, „Characterization of pressure drop through two-stage particulate air filters,” *Science and Technology for the Built Environment*, Bd. 26, pp. 835-843, 2020.
- [95] J. Kim und M. Lee, „Effect of filter collection efficiency on the clean air delivery rate in an air cleaner,” *Indoor Air*, Bd. (accepted for publication), 2020.
- [96] J. Curtius, M. Granzin und J. Schrod, „Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2,” *medRxiv (preprint)*, p. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.10.02.20205633v2>, 2020.
- [97] M. Kriegel, U. Buchholz, P. Gastmeier, P. Bischoff, I. Abdelgawad und A. Hartmann, „Predicted infection risk for aerosol transmission of SARS-CoV-2,” *medRxiv (preprint)*, p. <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.20209106>, 2020.
- [98] L. Marr, S. Miller, K. Prather, C. Haas, W. Bahnfleth, R. Corsi, J. Tang, H. Herrmann, K. Pollitt, J. Bal- lester und J. Jimenez, „FAQs on Protecting Yourself from COVID-19 Aerosol Transmission,” 07 11 2020. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/FAQ-aerosols>. [Zugriff am 16 11 2020].
- [99] C. Kähler, T. Fuchs und R. Hain, „Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren?,” 05 08 2020. [Online]. Available: <https://www.unibw.de/lrt7/raumluftreiniger.pdf>. [Zugriff am 11 11 2020].
- [100] M. Küpper, C. Asbach, U. Schneiderwind, H. Finger, D. Spiegelhoff und S. Schumacher, „Testing of an Indoor Air Cleaner for Particulate Pollutants under Realistic Conditions in an Office Room,” *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 19, pp. 1655-1665, 2019.
- [101] J. Joo, Q. Zheng, G. Lee, J. Kim und S. Kim, „Optimum energy use to satisfy indoor air quality needs,” *Energy and Buildings*, Bd. 46, pp. 62-67, 2012.
- [102] P. Azimi und B. Stephens, „HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs,” *Building and Environment*, Bd. 70, pp. 150-160, 2013.
- [103] T. Guenther, M. Czech-Sioli, D. Indenbirken, A. Robitailles, P. Tenhaken, M. Exner, M. Ottinger, N. G. A. Fischer und M. Brinkmann, „Investigation of the superspreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany (July 17, 2020),” 2020. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3654517. [Zugriff am 06 11 2020].
- [104] J. Lu, J. Gu, C. Xu, W. Su, Z. Lai, D. Zhou, C. Yu, B. Xu und Z. Yang, „COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou China, 2020,” *Emerging Infectious Diseases*, Bd. 26, pp. 1628-1631, 2020.
- [105] O. Almilaji und P. Thomas, „Air recirculation role in the infection with COVID-19, lessons learned from Diamond Princess cruise ship,” 09 Juli 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1101/2020.07.08.20148775>. [Zugriff am 06 11 2020].
- [106] B. f. W. u. E. und B. f. W. u. A. , „Gemeinsame Pressemitteilung: 500 Millionen Euro für Raumluft- technische Anlagen in öffentlichen Gebäuden und Versammlungsstätten zur Eindämmung des Corona-Virus,” 19 10 2020. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/10/20201019-500-millionen-euro-fuer-raumlufttechnische-anlagen-in-oeffentlichen-gebaeuden-und-versammlungsstaetten-zur-eindaemmung-des-corona-virus.html>. [Zugriff am 06 11 2020].
- [107] T. Klimach und F. Helleis, „Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume,” 10 11 2020. [Online]. Available: https://www.mpic.de/4782901/doku_lueftung_mpic_10112020.pdf. [Zugriff am 12 11 2020].
- [108] C. Asbach, B. Hellack, S. Schumacher, M. Bässler, M. Spreitzer, T. Pohl, C. Monz, S. Bieder, T. Schultze und A. Todea, „Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen kostengünstiger Feinstaubsensoren,” *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, Bd. 78, pp. 242-250, 2018.
- [109] Bundesinstitut für Arzneimittel u. Medizinprodukte, „Hinweise des BfArM zur Verwendung von Mund-Nasen-Bedeckungen, medizinischen Gesichtsmasken sowie partikelfiltrierenden Halbmasken (FFP1, FFP2 und FFP3) im Zusammenhang mit dem Coronavirus (SARS-CoV-2 / Covid-19),” 12 11 2020. [Online]. Available: <https://www.bfarm.de/SharedDocs/Risikoinformationen/Medizinprodukte/DE/schutzmasken.html>. [Zugriff am 28 11 2020].
- [110] L. Lee, E. Lam, C. Chan, S. Chan, M. Chiu, W. Chong, K. Chu, M. Hon, L. Kwan, K. Tsang, S. Tsoi und C. Wu, „Practice and technique of using face mask amongst adults in the community: a cross-sectional descriptive study,” *BMC Public Health*, Bd. 20, p. 948, 2020.

- [111] D. Chu, E. Akl, S. Duda, K. Solo, S. Yaacoub und H. Schünemann, „Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis,” *The Lancet*, Bd. 395, pp. 1973-1987, 2020.
- [112] W. Lyu und G. Wehby, „Community Use Of Face Masks And COVID-19: Evidence From A Natural Experiment Of State Mandates In The US,” *Health Affairs*, Bd. 39, pp. 1419-1425, 2020.
- [113] C. Leffler, E. Ing, J. Lykins, M. Hogan, C. McKeown und A. Grzybowski, „Association of Country-wide Coronavirus Mortality with Demographics, Testing, Lockdowns, and Public Wearing of Masks,” *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, pp. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.20-1015>, 2020.
- [114] R. Eninger, A. Adhikari, T. Reponen und S. Grinshpun, „Differentiating between physical and viable penetrations when challenging respirator filters with bioaerosols,” *Clean - Soil, Air, Water*, Bd. 36, pp. 615-621.
- [115] V. Cheng, S. Wong, V. Chuang, S. So, J. Chen, S. Sridhar, K. To, J. Chan, I. Hung, P. Ho und K. Yuen, „The role of community-wide wearing of face mask for control of coronavirus disease 2019 (COVID-19) epidemic due to SARS-CoV-2,” *Journal of Infection*, Bd. 81, pp. 107-114, 2020.
- [116] W. Lindsley, J. Noti, F. Blachere, J. Szalajda und D. Beezhold, „Efficacy of face shields against cough aerosol droplets from a cough simulator,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Bd. 11, pp. 509-518, 2014.
- [117] M. Ferioli, C. Cisternino, V. Leo, L. Pisani, P. Palange und S. Nava, „Protecting healthcare workers from SARS-CoV-2 infection: practical indications,” *Frontiers in Clinical Practice - Respiratory Infections*, Bd. 29, p. 200068, 2020.
- [118] P. Peng, P. Ho und S. Hota, „Outbreak of a new coronavirus: what anaesthetists should know,” *British Journal of Anaesthesia*, Bd. 124, pp. 497-501, 2020.
- [119] R. Eninger, T. Honda, T. Reponen, R. McKay und S. Grinshpun, „What does respirator certification tell us about filtration of ultrafine particles?,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Bd. 5, pp. 286-295, 2008.
- [120] L. Marr, J. Tang, J. Van Mullekom und S. Lakdawala, „Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence,” *Journal of the Royal Society, Interface*, p. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0298>, 2019.
- [121] S. Grinshpun, H. Haruta, R. Eninger, T. Reponen, R. McKay und S. Lee, „Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Bd. 6, pp. 593-603, 2009.
- [122] Health and Safety Executive, „Guidance on respiratory protective equipment (RPE) fit testing,” 2020 03 2019. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/pubns/indg479.pdf>. [Zugriff am 28 11].
- [123] S. Verma, M. Dhanak und J. Frankenfield, „Visualizing droplet dispersal for face shields and masks with exhalation valves,” *Physics of Fluids*, Bd. 32, p. 091701, 2020.
- [124] S. Grinshpun, M. Yermakov und M. Khoudoun, „Autoclave sterilization and ethanol treatment of re-used surgical masks and N95 respirators during COVID-19: impact on their performance and integrity,” *Journal of Hospital Infection*, Bd. 105, pp. 608-614, 2020.
- [125] E. Weingartner, „Masken auf dem Prüfstand: Wie gut schützen sie vor feinen Aerosolen?,” [Online]. Available: <https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/ht/institute/forschungsprojekte/beurteilung-der-filterwirkung-von-materialien-fuer-ein-und-mehrwegmasken>. [Zugriff am 11 11 2020].
- [126] F. Drewnick, J. Pikmann, F. Fachinger, L. Moormann, F. Sprang und S. Borrmann, „Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks,” *Aerosol Science and Technology*, p. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1817846>, 2020.
- [127] SNV, „Überblick über Normung von Community-Masken,” 01 11 2020. [Online]. Available: <https://www.snv.ch/de/news/news-details/ueberblick-ueber-normung-von-community-masken.html>. [Zugriff am 11 11 2020].
- [128] UNI, „UNI/PdR 90.1:2020: Maschere di comunità - Parte 1: Requisiti, tipologia e marcatura,” 01 07 2020. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-pdr-90-1-2020>. [Zugriff am 29 11 2020].
- [129] UNI, „UNI/PdR 90.1:2020: Maschere di comunità - Parte 1: Requisiti, tipologia e marcatura,” 01 07 2020. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-pdr-90-2-2020>. [Zugriff am 29 11 2020].
- [130] AFNOR, „AFNOR SPEC S76-001: Barrier masks - Guide to minimum requirements, methods of testing, making and use,” 27 03 2020. [Online]. Available: <https://masques-barrieres.afnor.org/home/PdfMasque?token=e5d57dce-d956-445f-8fa6-8943d105f7e7&culture=en-GB>. [Zugriff am 01 12 2020].
- [131] European Committee for Standardization, „CEN Workshop Agreement (CWA 17553): Community face coverings - Guide to minimum requirements, methods of testing and use,” Juni 2020. [Online]. Available: ftp://ftp.cencenelec.eu/EN/ResearchInnovation/CWA/CWA17553_2020.pdf. [Zugriff am 28 11 2020].

25. února 2021

GAeF^o

Gesellschaft für Aerosolforschung
Společnost pro výzkum aerosolů

originální (německá) a anglická verze

česká verze

Kontakt a tiskové zprávy:

positionspapier@gaef.de

aerosol-covid-preklad@icpf.cas.cz

Další informace o GAeF:

www.info.gaef.de

Další informace o ČAS:

cas.icpf.cas.cz/index_cz.php

