



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Samenvatting literatuuronderzoek herverwerken adembeschermingsmaskers met UV-C

De informatie in dit document is niet meer actueel.

Vanaf 1 september is herverwerking van single-use medische materialen niet meer toegestaan. Herverwerking van single-use medische materialen werd eerder tijdelijk toegestaan als een laatste redmiddel bij schaarste (zie [Kamerbrief Covid-19 Update stand van zaken 15 april 2020](#))

Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

RIVM/GZB

A. Van Leeuwenhoeklaan 9
3721 MA Bilthoven
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

T 030 274 91 11
info@rivm.nl

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Inhoudsopgave

1	Samenvatting literatuuronderzoek herverwerken adembeschermingsmaskers met UV-C — 5
1.1	Methode — 6
1.2	Samenvatting literatuur — 7
1.2.1	Inactivatie van micro-organismen en virussen door UV-C — 7
1.2.2	Penetratie van UV-C en effectiviteit van virusinactivatie in ABM's — 8
1.2.3	Functionaliteit van ABM's na behandeling met UV-C: fit en filtratie — 10
1.3	Conclusie — 11
2	Referenties — 13
3	Bijlage — 17

De informatie in dit document is niet meer actueel. Vanaf 1 september is herverwerking van single-use medische materialen niet meer toegestaan.

1 Samenvatting literatuuronderzoek herverwerken adembeschermingsmaskers met UV-C

Introductie

Door de COVID-19 pandemie is er schaarste aan adembeschermingsmaskers van het type FFP2 (ABM's) door verminderde aanvoer en verhoogd gebruik. Hergebruik van ABM's die bedoeld zijn voor eenmalig gebruik kan alleen worden toegepast in geval van uiterste nood. Daarbij moet gebruik gemaakt worden van een methode die voldoende decontamineert (ontsmet) en die de filterfunctie en pasvorm van het masker niet te sterk aantast. Er is daarom behoefte aan informatie over betrouwbare methoden om ABM's te kunnen decontamineren. Voor alle methodes die gebruikt worden geldt wel dat deze moeten worden gevalideerd voor alle combinaties van apparatuur, procesomstandigheden, en typen/merken maskers.

Stoomsterilisatie en waterstofperoxide zijn voor de Nederlandse gezondheidszorg bekende sterilisatiemethoden, waarvan de werking en effectiviteit bekend zijn. Deze methoden worden veel genoemd in het veld en in de literatuur en kunnen op grotere schaal toegepast worden. Daarnaast is er ook behoefte aan technieken die op kleinere schaal gemakkelijk kunnen worden toegepast, bijvoorbeeld voor toepassing in de extramurale zorg. In dit verband wordt decontaminatie met kortgolvig ultraviolet licht (UV-C) veel genoemd.

UV-C licht is kortgolvig ultraviolet licht met een golflengte tussen 200-280 nm. Zonlicht bevat UV-C licht, dat gedeeltelijk wordt geblokkeerd door de ozonlaag in de atmosfeer. UV-C licht tast het DNA en RNA in cellen aan en is schadelijk voor de mens, maar ook voor micro-organismen en virussen. Vanwege deze eigenschap kan UV-C licht worden gebruikt voor decontaminatie: micro-organismen absorberen het licht waardoor hun genetisch materiaal wordt aangetast en de cel zich niet meer kan delen.

UV-C wordt nu al toegepast voor decontaminatie van gladde oppervlakten, vloeistoffen en lucht en heeft hierdoor verschillende toepassingsgebieden. Doordat UV-C goed kan doordringen in transparante vloeistoffen en gassen, wordt het al een eeuw toegepast voor zuivering van drinkwater (25, 66). Verder wordt UV-C onder andere in de zorg en voedingsindustrie, toegepast voor luchtzuivering en desinfectie van gladde oppervlakten, zoals tafels en aanrechten van roestvrij staal, maar ook voor kleinere objecten, zoals mobiele telefoons (1). Voorwaarde hierbij is dat het UV-C licht uit de lampen ongehinderd het te desinfecteren oppervlak moet kunnen bereiken. Ook kent UV-C toepassingen voor decontaminatie van vloeistoffen met een hoge UV-absorptie, zoals voor zuivering van afvalwater, desinfectie van appelsap en virusinactivatie in bloedplasma (2). Als de vloeistof in beweging wordt gebracht, kan er op zoveel mogelijk plaatsen en deeltjes voldoende UV-C licht komen. Indien UV-C ook geschikt zou zijn voor het decontamineren van ABM's, die van poreus, niet-transparant materiaal

zijn gemaakt, dan biedt dat kansen voor kleinschalige herverwerking daarvan.

Er is een literatuurstudie uitgevoerd om wetenschappelijke gegevens te verzamelen over de effectiviteit van UV-C, de randvoorwaarden voor verantwoord gebruik en de effecten op de maskers. De vraagstelling van dit literatuuronderzoek is of er voldoende wetenschappelijke onderbouwing is voor de toepassing van UV-C als effectieve decontaminatiemethode voor ABM's, waarbij de virusinactivatie op én in het gehele masker (inclusief de bandjes) gewaarborgd is en waarbij de pasvorm (fit) en de filterfunctie van het masker voldoende intact blijven.

1.1 Methode

In een eerder RIVM-literatuuronderzoek naar hergebruik van ABM's kwam ook literatuur over decontaminatie met UV-C naar voren (3). De artikelen uit dit eerste (algemene) literatuuronderzoek naar decontaminatie van ABM's zijn als uitgangspunt genomen. Een korte samenvatting van deze artikelen (met alleen de relevante informatie over UV-C) is bijgevoegd in dit literatuuronderzoek. Deze artikelen zijn aangegeven met een kardinaalteken (#). Uit deze literatuur bleek dat gegevens over de penetratie van UV-C in ABM's en de effectiviteit (inactivatie van micro-organismen) zeer beperkt beschikbaar zijn. Om meer gegevens over de te verwachten penetratie en effectiviteit van blootstelling aan UV-C in poreus materiaal zoals ABM's te verkrijgen werd een bredere systematische zoekopdracht uitgevoerd in PubMed met de volgende zoektermen: *'UV irradiation' AND 'disinfection not water'*. De zoekterm water werd uitgesloten, omdat penetratie van UV-C in transparante media niet vergelijkbaar is met penetratie in ABM's en de focus in dit literatuuronderzoek lag op penetratie en decontaminatie op/in minder transparante materialen. Alleen artikelen die de afgelopen 20 jaar zijn gepubliceerd zijn meegenomen.

In totaal werden er 247 artikelen gevonden, waarvan de samenvatting door twee onderzoekers onafhankelijk is beoordeeld op relevantie. Artikelen over oppervlaktedesinfectie en desinfectie van lucht in ruimten werden geëxcludeerd, omdat daarbij de penetratie en effectiviteit van UV-C niet vergelijkbaar is met de penetratie en effectiviteit in poreuze materialen. Van de 247 artikelen werden er 19 door beide onderzoekers voldoende relevant geacht en deze werden geheel bestudeerd. Uiteindelijk vielen er nog vier artikelen af omdat ze geen relevante informatie voor de vraagstelling bevatten.

Tijdens deze COVID-pandemie worden COVID-gerelateerde wetenschappelijke gegevens versneld uitgewisseld door middel van pre-publicatie voordat de peer review is afgerond. De toepassing van UV-C voor desinfectie van ABM's is bij uitstek een actueel vraagstuk waarover verschillende pre-publicaties zijn gedaan. Door een search op Google scholar met de zoektermen "UV" AND "mask" AND "decontamination" werden voor het jaar 2020 recente artikelen gevonden, die nog niet door de peer review zijn geweest. De eerste 11 zoekresultaten voor het jaar 2020 (d.d. 11 mei 2020) van deze search bleken op basis van titel en samenvatting relevant en werden bestudeerd. Eén artikel hiervan viel af omdat het geen relevante informatie voor de vraagstelling bevatte.

Bij het lezen van deze artikelen kwam nog een relevant artikel naar voren dat tevens is meegenomen. Alle wetenschappelijke artikelen die geen peer review hebben ondergaan voor publicatie zijn in de tekst aangegeven met een asterisk (*). In de referentielijst wordt 'NO PEER REVIEW' vermeld achter de referentiegegevens van de betreffende artikelen.

Als laatste werd in een artikel het wetenschappelijk consortium N95DECON.org genoemd, dat op zijn website in het kader van de COVID-19 pandemie actuele wetenschappelijke informatie over de decontaminatie van N95 ABM's deelt en beoordeelt. N95 is de Amerikaanse specificatie voor ABM's, vergelijkbaar met de Europese eisen voor FFP2. De informatieve factsheet van N95DECON over UV-C is ook toegevoegd aan de literatuur in de bijlage.

In totaal is er van 35 artikelen een korte samenvatting in de bijlage opgenomen, waarvan 8 artikelen prepublicaties zijn die nog geen peer review hebben ondergaan. Alle artikelen zijn op volgorde van jaar van publicatie weergegeven.

1.2 Samenvatting literatuur

In dit literatuuronderzoek gelden dezelfde algemene bevindingen als in het eerdere literatuuronderzoek naar hergebruik van mondklappers (3). De gevonden artikelen betreffen voornamelijk Amerikaanse artikelen. Wanneer in een artikel specifiek onderzoek werd gedaan naar UV-C voor decontaminatie van ABM's betrof het steeds N95 maskers. In deze artikelen werden slechts enkele typen van de vele op de markt beschikbare typen ABM's getest. Omdat zowel de vorm als het materiaal van de ABM's kunnen verschillen, zijn validatiegegevens over zowel virusinactivatie als behoud van integriteit van een specifiek masker niet zonder meer geldig voor alle typen/merken maskers.

1.2.1 Inactivatie van micro-organismen en virussen door UV-C

De effectiviteit van UV-C om een pathogeen te inactiveren hangt van een aantal omstandigheden af.

- De golflengte van het UV-C licht: UV-C licht met een golflengte van 254 nm is het meest effectief omdat deze golflengte dicht bij de absorptiepiek van 265 nm van nucleïnezuren ligt (2, 4). De golflengte van het licht dat wordt toegepast is dus van belang (5).
- De bestralingsduur en intensiteit: door het verhogen van de bestralingsduur en de intensiteit neemt de inactivatie van micro-organismen toe. Dit betekent tegelijkertijd dat ook het bestraalde materiaal aan een hogere dosis UV-C straling wordt blootgesteld en mogelijk wordt aangetast (5).
- De eigenschappen van het te inactiveren pathogeen (5-8): enkelstrengs RNA virussen wordt gemakkelijker geïnactiveerd door UV-C licht dan dubbelstrengs RNA virussen (8). SARS-CoV-2 is een met een eiwitmantel omhuld enkelstrengs RNA virus. UV-C inactieveert het murine hepatitis virus (MHV)-coronavirus snel en gemakkelijk in aerosolen (7).
- De luchtvochtigheid: bij een hogere luchtvochtigheid lijkt een hogere UV-dosis nodig om virussen te inactiveren (8, 9). Mogelijk

komt dit doordat het water aan het virus vast gaat zitten, waardoor het bescherming biedt tegen UV-geïnduceerde DNA- of RNA-schade. Echter Walker et al. (7) vonden geen beschermend effect van hoge luchtvochtigheid op UV gevoeligheid bij de geteste aerosolen. Hun resultaten suggereerden zelfs hogere UV gevoeligheid bij een hogere luchtvochtigheid.

- Het materiaal en oppervlak dat bestraald wordt: obstakels geven schaduw waar geen UV-C licht komt en waar dus geen inactivatie van micro-organismen en virussen zal optreden. UV-C inactieveert micro-organismen en virussen op glad oppervlak, doordat de UV-C straling de micro-organismen goed kan bereiken (5, 8, 10)*.
- In poreus maskermateriaal kunnen micro-organismen en virussen zich binnenin een netwerk van materiaal bevinden, waar onvoldoende UV licht zou kunnen komen door schaduwvorming (8). Aggregatie van virus partikels kan de kinetiek van virusinactivatie beïnvloeden (2).

1.2.2 Penetratie van UV-C en effectiviteit van virusinactivatie in ABM's

De volgende bevindingen uit het literatuuronderzoek zijn relevant voor het inschatten van de penetratie en effectiviteit van virusinactivatie in ABM's.

- Het meten van de UV-C dosis op verschillende plekken in een ABM is lastig. Voor virusinactivatie is de stralingsenergie, die van alle kanten de virusdeeltjes bereikt (fluentie) van belang (2).
- Bij het rondom bestralen van voorwerpen met UV-C, is een hogere dosis UV-C nodig (tot 13 mW/cm²) dan voor het rondom bestralen met UV-C van een suspensie en gladde oppervlakten (0.3 mW/cm²). Dit bleek uit een studie naar desinfectie van tandgeneeskundig handgereedschap (gecontamineerd met bloed/speeksel gespiked met *S. aureus*). Zoals voor andere desinfectiemethoden is reinigen van het te decontamineren object voorafgaande aan behandeling met UV-C eigenlijk een vereiste. De maximale reductie van *S. Aureus* werd voor een pincet alleen behaald indien er vooraf werd gereinigd met een desinfectiedoekje (11).
- Afhankelijk van de vorm van het behandelde voorwerp kan de inactivatie onvolledig zijn op bepaalde plaatsen van het voorwerp. Dit werd gevonden in een studie naar de 'Nanoclave cabinet' om klinische apparatuur te desinfecteren met UV-C. Op voorwerpen die geen schaduwvorming hadden verliep de inactivatie van micro-organismen en virussen snel (enkele minuten, afhankelijk van het voorwerp) (12).
- Een sterke aanwijzing dat UV-C bestraling ABM's kan decontamineren leverde een studie waarin N95 mondmaskers op systematische wijze werden gecontamineerd met een viraal aerosol (MS2 colifaag) en vervolgens behandeld met UV-C. De maskers werden aan één kant gecontamineerd en met UV-C gedecontamineerd. Na decontaminatie werden coupons uit de maskers gesneden om te bekijken hoeveel virus geïnactiveerd was. MS2 colifaag was na langdurige bestraling ($\geq 7.20 \text{ J/cm}^2$; ≥ 5 uur bestraling ofwel 0.4 mW/cm^2) van een kant van het masker niet meer aantoonbaar in verschillende coupons van de geteste ABM's. De studie is met 1 type masker uitgevoerd en er is geen informatie over decontaminatie van de bandjes. De auteurs

geven aan dat meer onderzoek nodig is om decontaminatie van ABM's door middel van UV-C verder te onderbouwen (13).

- Na een 4-log reductie van influenzavirus (H5N1) door bestraling met UV-C in twee verschillende ABM's, was in de ABM's nog wel viraal RNA aantoonbaar (14).
- In een andere studie werd duidelijk dat zes verschillende N95 ABM's voor decontaminatie met UV-C ieder een andere dosis UV-C nodig hadden (15).
- Smith et al (16)* zagen in een voorlopig experiment bij slechts 1 van de 3 onderzochte typen maskers enige virusinactivatie van SARS-CoV-2 in N95 maskers na UV-C behandeling. De auteurs verwachten dat een viruscontaminatie zoals in normale zorgomstandigheden voorkomt, minder diep in het masker binnendringt en dus betere resultaten zal geven. De dosis UV-C was in dit experiment ook vrij laag gekozen (0.63 J/cm² aan iedere kant van het masker, wat neer komt op 33 minuten bestralen).
- Vanwege schaduwwerking door de vorm van het masker en door het materiaal moeten ABM's van verschillende kanten bestraald worden om tot effectieve decontaminatie te komen (10, 17)**.
- De meeste studies maken gebruik van coupons om te testen of het virus volledig is gedecontamineerd na behandeling met UV-C. Waarbij sommige studies al direct coupons uit het masker halen (6, 15, 18), behandelen andere studies de maskers eerst en halen er nadien coupons uit om de virusinactivatie te beoordelen (13). Hierdoor wordt niet het gehele masker getest op virusinactivatie en blijft het lastig beoordelen of op het gehele masker volledige virusinactivatie heeft plaatsgevonden. Dus ook op de stukken van het masker waar mogelijk door stiksels of schaduwwerking minder UV-C kan komen.
- Over het algemeen is UV-C snel en eenvoudig toe te passen, met name als een UV-kast gebruikt wordt.
- In een recente studie was de conclusie dat een behandeling van N95 ABM's gedurende 1 minuut in een UV-C box of gedurende 30 minuten bestraling met een UV-C apparaat voor decontaminatie van ruimtes wel enige mate van virusreductie geeft maar niet voldoende voor alle plekken van de onderzochte N95 ABM's (5).
- Wanneer ook ozon door UV-C lampen (254 nm) wordt gegenereerd levert dit gas ook een bijdrage aan de decontaminatie, met name bij sporen en sterke verontreiniging (4). De inactiverende werking van ozon is al langere tijd bekend.
- Vervuiling kan mogelijk de effectiviteit van virusinactivatie op maskers beïnvloeden. Fisher et al (18) lieten zien dat UV straling bij een toename van vervuiling minder in het masker kan penetreren. Voor toepassing in de praktijk zou er dus meer UV straling nodig zijn voor vervuilde maskers of de maskers zouden eerst schoongemaakt moeten worden. Indien maskers meerdere malen gedecontamineerd worden, dient er rekening mee gehouden te worden dat opgebouwde vervuiling de effectiviteit van de decontaminatie negatief kan beïnvloeden. Moore et al (12) zagen geen verschil in effectiviteit van de Nanoclave bij toevoegen van vervuiling. In de meeste artikelen is echter geen rekening gehouden met mogelijke vloeistoffen of vervuiling waar het virus in kan zitten op het masker en wat mogelijk het virus

tegen inactivatie kan beschermen door het remmen van de penetratie van de UV straling. Hierdoor kan er een hogere dosis UV straling nodig zijn voor decontaminatie (6, 15).

De Universiteit van Nebraska heeft een uitgebreid protocol voor decontaminatie van N95 maskers met UV-C apparatuur voor operatiekamerdesinfectie ontwikkeld op basis van experimenten, literatuuronderzoek en dagelijkse praktijk om de tekorten het hoofd te bieden. Hierbij gaat het om gepersonaliseerd hergebruik (10)*. Wanneer het Nebraska University protocol wordt gevolgd worden de gebruikte N95 ABM's blootgesteld aan 300 mJ/cm². De inleiding van het protocol stelt: "*Literature supports UVGI exposures of 1 J/cm² are capable of decontaminating influenza virus on N95 FFRs and exposures as low as of 2-5 mJ/cm² are capable inactivating coronaviruses on surfaces (1-2).*" Waarbij UVGI staat voor ultraviolet germicidal irradiation.

Opgemerkt wordt dat de door de Universiteit van Nebraska genoemde referenties geïncorporeerd werden in dit literatuuronderzoek (zie ook bijlage) (8, 19). Uit deze artikelen blijkt dat de genoemde inactivatie van influenza virus en coronavirus alleen verwacht kan worden voor het buitenoppervlak van de maskers voor zover dat glad is. Over inactivatie van virussen binnenin het masker geven deze artikelen geen informatie.

1.2.3 *Functionaliteit van ABM's na behandeling met UV-C: fit en filtratie*

Hoe hoger de dosering die nodig is om virusdeeltjes te inactiveren op het masker, hoe meer kans er is dat het materiaal van het masker en de bandjes aangetast wordt. Om binnenin het maskermateriaal te komen, moet er op de buitenzijde een hogere dosering UV-C gegeven worden. De kwaliteit van het masker na desinfectie met UV-C kan beoordeeld worden door de fit van het masker en de kwaliteit van de filterfunctie te meten.

- UV-C kan inderdaad het materiaal van het ABM aantasten, maar dit is per type ABM verschillend en ook afhankelijk van de stralingsdosis. Dit betekent dat voor ieder type masker apart moet worden uitgezocht of en hoe vaak bestraling met UV-C kan plaatsvinden zonder het masker aan te tasten (6, 10, 20)**.
- De meeste studies geven aan dat de invloed van UV-C bestraling op de filterefficiëntie beperkt is. Card et al (21)* zagen geen aantasting van de filtratie-efficiëntie van de ABM's, maar onderzochten niet de fit. Fisher et al (22)* vonden geen invloed op de filtereffectiviteit na behandeling met UV-C. Lindsley et al (6) vonden, afhankelijk van het type masker, effecten op de deeltjespenetratie en de flow resistentie, maar vooral aantasting van de scheursterkte.

Over de fit van ABM's na UVC behandeling zijn nog weinig gegevens (20)*. Price et al (23)* onderzochten voor drie typen N95 maskers de fit volgens het OSHA protocol na UVGI. Na 10 cycli UVGI (254 nm, 8W UV lamp, 30 min) voldeed de fit niet meer aan de eisen. UVGI tast vooral het elastiek van de banden aan waardoor de fit afneemt. Ook Smith et al (16)* zagen een aanzienlijke afname van de fit bij N95 maskers na behandeling met UV-C, al bleef de fitwaarde boven de acceptatiegrens van 100. Gezien de effecten van de decontaminatiemethoden op de

functionaliteit van het masker vragen deze auteurs zich af of afzien van decontaminatie en de maskers laten liggen gedurende zeven dagen mogelijk de meer verkiesbare strategie is. Viscusi et al (24) zagen over het algemeen geen problemen met de fit na decontaminatie met UV. Overigens bleek uit de literatuur ook dat meermalig gebruik (opzetten van het masker) de fit sowieso nadelig beïnvloedt, ongeacht herverwerking (25).

1.3 Conclusie

In de geraadpleegde literatuur stellen de auteurs geregeld dat UV-C decontaminatie van mondklappen werkt (6, 10, 20)**. Bestralen met UV-C kan micro-organismen inactiveren, en kan, na verder onderzoek, mogelijk voor ABM's worden toegepast.

Toch blijkt uit de geraadpleegde studies dat er een zekere mate van onzekerheid blijft bestaan over voldoende decontaminatie van ABM's door behandeling met UV-C. Er is nog geen toepassing met UV-C voor ABM's die voldoende gevalideerd is. De effectiviteit van een UV-C decontaminatiemethode hangt sterk af van alle daarmee samenhangende condities en het resultaat kan per type mondklap verschillen. Ook de plaatsing van ABM's t.o.v. de lichtbron is van groot belang.

In de literatuur, welke voornamelijk de Amerikaanse zienswijze hanteert, is dan ook steeds het uitgangspunt dat het gaat om gepersonaliseerd hergebruik van ABM's na behandeling met UV-C (10, 17)**. Ook in de factsheet van het Amerikaanse consortium N95DECON.org over decontaminatie met UV-C is de aanbeveling dat indien N95 ABM's met UV-C worden gedecontamineerd, deze door dezelfde oorspronkelijke gebruiker worden hergebruikt. In Nederland is deze werkwijze niet breed ingevoerd, echter willen we garantie dat er volledige inactivatie van het virus dat op en in het masker zit heeft plaatsgevonden, zodat er geen sprake meer is van achterblijvend virus op en in de maskers.

Het Amerikaanse Center for Disease Control and Prevention (CDC) noemt UVGI (ultraviolet germicidal irradiation) een van de veelbelovende *mogelijke* methoden voor decontaminatie van ABM's en geeft een samenvatting van de bevindingen uit de literatuur op zijn website (26). CDC geeft aan: *'UVGI is a promising method but the disinfection efficacy is dependent on dose. Not all UV lamps provide the same intensity thus treatment times would have to be adjusted accordingly. Moreover, UVGI is unlikely to kill all the viruses and bacteria on an FFR due to shadow effects produced by the multiple layers of the FFR's construction.'*

Decontaminatie van ABM's met UV-C kan een goede methode zijn, maar vergt aanvullende validatie van effectiviteit, reproduceerbaarheid en behoud van functionaliteit voor iedere specifieke combinatie om de veiligheid en functionaliteit van het ABM voor hergebruik te kunnen garanderen.

De informatie in dit document is niet meer actueel. Vanaf 1 september is herverwerking van single-use medische materialen niet meer toegestaan.

2 Referenties

1. Allen EM, McTague MF, Bay CP, Esposito JG, von Keudell A, Weaver MJ. The effectiveness of germicidal wipes and ultraviolet irradiation in reducing bacterial loads on electronic tablet devices used to obtain patient information in orthopaedic clinics Evaluation of tablet cleaning methods. *J Hosp Infect.* 2020.
2. Meunier SM, Sasges MR, Aucoin MG. Evaluating ultraviolet sensitivity of adventitious agents in biopharmaceutical manufacturing. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2017;44(6):893-909.
3. RIVM. Samenvatting literatuuronderzoek hergebruik mondmaskers. 2020.
4. Christofi N, Misakyan MA, Matafonova GG, Barkhudarov EM, Batoev VB, Kossyi IA, et al. UV treatment of microorganisms on artificially-contaminated surfaces using excimer and microwave UV lamps. *Chemosphere.* 2008;73(5):717-22.
5. Cadnum JL, Li DF, Redmond SN, John AR, Pearlmutter B, Donskey CJ. Effectiveness of Ultraviolet-C Light and a High-Level Disinfection Cabinet for Decontamination of N95 Respirators. *Pathog Immun.* 2020;5(1):52-67.
6. Lindsley WG, Martin SB, Jr., Thewlis RE, Sarkisian K, Nwoko JO, Mead KR, et al. Effects of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) on N95 Respirator Filtration Performance and Structural Integrity. *J Occup Environ Hyg.* 2015;12(8):509-17.
7. Walker CM, Ko G. Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environ Sci Technol.* 2007;41(15):5460-5.
8. Tseng CC, Li CS. Inactivation of viruses on surfaces by ultraviolet germicidal irradiation. *J Occup Environ Hyg.* 2007;4(6):400-5.
9. Cheng Y, Chen H, Sanchez Basurto LA, Protasenko VV, Bharadwaj S, Islam M, et al. Inactivation of *Listeria* and *E. coli* by Deep-UV LED: effect of substrate conditions on inactivation kinetics. *Sci Rep.* 2020;10(1):3411.
10. Lowe JJ, Paladino KD. N95 Filtering Facepiece Respirator Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) Process for Decontamination and Reuse. nebraskamedcom 2020.
11. von Woedtke T, Julich WD, Thal S, Diederich M, Stieber M, Kindel E. Antimicrobial efficacy and potential application of a newly developed plasma-based ultraviolet irradiation facility. *J Hosp Infect.* 2003;55(3):204-11.
12. Moore G, Ali S, Cloutman-Green EA, Bradley CR, Wilkinson MA, Hartley JC, et al. Use of UV-C radiation to disinfect non-critical patient care items: a laboratory assessment of the Nanoclave Cabinet. *BMC Infect Dis.* 2012;12:174.
13. Vo E, Rengasamy S, Shaffer R. Development of a test system to evaluate procedures for decontamination of respirators containing viral droplets. *Appl Environ Microbiol.* 2009;75(23):7303-9.
14. Lore MB, Heimbuch BK, Brown TL, Wander JD, Hinrichs SH. Effectiveness of three decontamination treatments against influenza virus applied to filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg.* 2012;56(1):92-101.

15. Fisher EM, Shaffer RE. A method to determine the available UV-C dose for the decontamination of filtering facepiece respirators. *J Appl Microbiol.* 2011;110(1):287-95.
16. Smith JS, Hanseler H, Welle J, Rattray R, Campbell M, Brotherton T, et al. Effect of various decontamination procedures on disposable N95 mask integrity and SARS-CoV-2 infectivity. *medRxiv.* 2020:2020.04.11.20062331.
17. Baluja A, Arines J, Vilanova R, Bao-Varela C, Flores-Arias MT. UV light dosage distribution over irregular respirator surfaces. Methods and implications for safety. *medRxiv.* 2020:2020.04.07.20057224.
18. Fisher EM WJ, Shaffer RE. The effect of soil accumulation on multiple decontamination processing of N95 filtering facepiece respirator coupons using physical methods. *J Int Soc Respir Prot.* 2010;27: 16–26.
19. Mills D, Harnish DA, Lawrence C, Sandoval-Powers M, Heimbuch BK. Ultraviolet germicidal irradiation of influenza-contaminated N95 filtering facepiece respirators. *Am J Infect Control.* 2018;46(7):e49-e55.
20. O'Hearn K, Gertsman S, Sampson M, Webster RJ, Tsampalieros A, Ng R, et al. Decontaminating N95 Masks with Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) Does Not Impair Mask Efficacy and Safety: A Systematic Review. *OSF Preprints.* 2020.
21. Card KJ, Crozier D, Dhawan A, Dinh M, Dolson E, Farrokhian N, et al. UV Sterilization of Personal Protective Equipment with Idle Laboratory Biosafety Cabinets During the Covid-19 Pandemic. *medRxiv.* 2020:2020.03.25.20043489.
22. Fischer R, Morris DH, van Doremalen N, Sarchette S, Matson J, Bushmaker T, et al. Assessment of N95 respirator decontamination and re-use for SARS-CoV-2. *medRxiv.* 2020:2020.04.11.20062018.
23. Price AD, Cui Y, Liao L, Xiao W, Yu X, Wang H, et al. Is the fit of N95 facial masks effected by disinfection? A study of heat and UV disinfection methods using the OSHA protocol fit test. *medRxiv.* 2020:2020.04.14.20062810.
24. Viscusi DJ, Bergman MS, Novak DA, Faulkner KA, Palmiero A, Powell J, et al. Impact of three biological decontamination methods on filtering facepiece respirator fit, odor, comfort, and donning ease. *J Occup Environ Hyg.* 2011;8(7):426-36.
25. Bergman MS, Viscusi DJ, Zhuang Z, Palmiero AJ, Powell JB, Shaffer RE. Impact of multiple consecutive donnings on filtering facepiece respirator fit. *Am J Infect Control.* 2012;40(4):375-80.
26. CDC. Decontamination and Reuse of Filtering Facepiece Respirators 2020 [Available from: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/decontamination-reuse-respirators.html>].
27. Viscusi DJ KW, Shaffer RE. Effect of decontamination on the filtration efficiency of two filtering facepiece respirator models. *J Int Soc Resp Prot.* 2007;24:93-107.
28. Viscusi DJ, Bergman MS, Eimer BC, Shaffer RE. Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg.* 2009;53(8):815-27.
29. Bergman MS VD, Heimbuch BK, Wander JD, Sambol AR, Shaffer RE. Evaluation of multiple (3- cycle) decontamination processing for filtering facepiece respirators. *JEFF.* 2010;4:33-41.

30. Heimbuch BK, Wallace WH, Kinney K, Lumley AE, Wu CY, Woo MH, et al. A pandemic influenza preparedness study: use of energetic methods to decontaminate filtering facepiece respirators contaminated with H1N1 aerosols and droplets. *Am J Infect Control*. 2011;39(1):e1-9.
31. Lin TH, Tang FC, Hung PC, Hua ZC, Lai CY. Relative survival of *Bacillus subtilis* spores loaded on filtering facepiece respirators after five decontamination methods. *Indoor Air*. 2018.
32. Poster DL, Miller CC, Obeng Y, Postek MT, Cowan TE, Martinello RA. Innovative Approaches to Combat Healthcare-Associated Infections Using Efficacy Standards Developed Through Industry and Federal Collaboration. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2018;10730.
33. Kim DK, Kang DH. UVC LED Irradiation Effectively Inactivates Aerosolized Viruses, Bacteria, and Fungi in a Chamber-Type Air Disinfection System. *Appl Environ Microbiol*. 2018;84(17).
34. Nakpan W, Yermakov M, Indugula R, Reponen T, Grinshpun SA. Inactivation of bacterial and fungal spores by UV irradiation and gaseous iodine treatment applied to air handling filters. *Sci Total Environ*. 2019;671:59-65.
35. Rowan NJ, Laffey JG. Challenges and solutions for addressing critical shortage of supply chain for personal and protective equipment (PPE) arising from Coronavirus disease (COVID19) pandemic - Case study from the Republic of Ireland. *Sci Total Environ*. 2020;725:138532.
36. Leung KCP, Ko TCS. Improper use of germicidal range ultraviolet lamp for household disinfection leading to phototoxicity in COVID-19 suspects. *Cornea*. 2020.
37. Gilbert RM, Donzanti MJ, Minahan DJ, Shirazi J, Hatem CL, Hayward-Piatkovskiy B, et al. Healthcare worker mask reuse in a global pandemic: Using idle resources to create an inexpensive, scalable, and accessible UV system for N95 sterilization. *medRxiv*. 2020:2020.04.19.20070870.
38. n95DECON. COVID N95 DECON & REUSE UV-C Factsheet 2020 [Available from: https://static1.squarespace.com/static/5e8126f89327941b9453eeef/t/5eb6fc4021f556696b7e4e3b/1589050433943/UVC_factsheet_2pager.pdf].

De informatie in dit document is niet meer actueel. Vanaf 1 september is herverwerking van single-use medische materialen niet meer toegestaan.

3 Bijlage

Von Woedtke et al. ((11), 2003) hebben een manier gevonden om UV-C straling (254nm) rondom een product te geven (universele homogene ultraviolet (UHUV)). Hierbij wordt het product in een buis geplaatst waar UV-C straling op vrij komt. Nadat ze dit in suspensie en op oppervlakten getest hadden, hebben ze tandgeneeskundig handgereedschap gecontamineerd met bloed/speeksel gespiked met *S. aureus*. De bacterie werd hiermee met een factor 10^6 gereduceerd binnen 5-15 minuten, er was echter wel een hogere dosis nodig (tot 13 mW/cm^2) dan voor de suspensie en oppervlakten gebruikt (0.3 mW/cm^2). Echter wanneer ze een orthodontische pincet op dezelfde manier contamineerden, werd er na 5 minuten op de hoogste dosering (13 mW/cm^2) een reductie gezien van minder dan factor 10^5 . Alleen door de pincet eerst te reinigen met een desinfectie doekje werd wel de maximale reductie behaald. De vorm van het UHUV systeem zou aangepast kunnen worden, zodat verschillende vormen snel en effectief gedecontamineerd kunnen worden volgens de auteurs.

Tseng et al. ((8), 2007) onderzochten de effectiviteit van UVGI voor verschillende virussoorten op het oppervlak van gelatine-medium. Voor de inactivatie van virussen in lucht is een minder hoge dosis UV-C nodig dan bij virussen op een oppervlak. De auteurs waarschuwen voor alertheid op de eigenschappen van het materiaal van het oppervlak omdat UV-C niet goed kan doordringen in oneffenheden vanwege schaduwwerking, terwijl micro-organismen daar wel in kunnen doordringen. Voor virusreductie van 99% was een twee maal hogere dosis UV-C nodig dan voor 90% virusreductie. Enkelstrengs RNA virussen zijn gevoeliger voor UV-C dan dubbelstrengs RNA virussen. Bij een hogere luchtvochtigheid was een hogere UV dosis nodig voor dezelfde virusreductie.

Walker et al. ((7), 2007) onderzochten de gevoeligheid van virale aerosolen voor ultraviolet germicidal air disinfection. Hiervoor werden aerosolen van MS2, adenovirus en Murine Hepatitis Virus coronavirus bewerkstelligd en de inactivatie door UV-C gemeten. De coronavirus aerosolen waren 7-10x gevoeliger voor UV-C dan de MS2 of adenovirus aerosolen. Een hoge relatieve luchtvochtigheid gaf voor de virale aerosolen geen beschermend effect tegen UV-C (in tegenstelling tot bacteriële aerosolen).

Viscusi et al. ((27)#, 2007) hebben de functie van een N95 en een P100 masker getest na tien verschillende decontaminatie methoden, waaronder UV-C. Van deze methode had onder andere UV-C het minste effect op de deeltjespenetratie door het materiaal van het masker. Er werden geen visuele afwijkingen gezien na behandeling met UV straling.

Christofi et al. ((4), 2008) vergeleken de effectiviteit van twee verschillende typen UV-C lampen wat betreft de inactivatie van een bacteriefilm op de oppervlakte van droge membraanfilters. De lampen waren XeBr excilampen (emissiepiek bij 283nm) en microwave UV lampen (emissiepiek bij 253.7nm) die ook ozon genereren. Beide UV

lampen gaven effectieve inactivatie van micro-organismen op oppervlakten. De ozonvorming levert ook een bijdrage aan de decontaminatie, met name bij sporen en sterke verontreiniging.

Viscusi et al. ((28)#, 2009) hebben vijf decontaminatiemethoden gebruikt op mondmaskers (6x N95 en 3x P100) in hun studie, waaronder UV straling. Na behandeling met UV straling werden geen zichtbare veranderingen aan het mondmasker gezien en de functie bleef intact. Er is niet gekeken naar inactivatie van het virus in deze studie.

Vo et al. ((13), 2009) beschrijven een methode om N95 mondmaskers te contamineren met virale (MS2 colifaag) deeltjes. Vervolgens decontamineren ze deze maskers met natriumhypochloriet (bleek) en met UV straling. Bij een dosering van 2.75-5.50 mg/L bleek werd na 10 minuten een 3- tot 4-log reductie gevonden van het virus. Bij een dosering van >8.25 mg/L werd na diezelfde tijd geen levend virus meer gevonden. UV straling (254 nm) gaf een 3-log reductie van het virus met een dosis van 4.32 J/cm² (wat 3 uur bestraling betekent met een dosis van 0.4 mW/cm²). Bij een dosis van ≥7.20 J/cm² (wat ≥5 uur bestraling betekent) werd geen levend virus meer gevonden. Er werden alleen mondmaskers met een hydrofiele buitenste laag getest.

Fisher et al. ((18)#, 2010) hebben gekeken of vervuiling op een mondmasker (één type N95) de efficiëntie van de decontaminatie methoden verminderden. Hiervoor is decontaminatie met magnetron gegenereerd stoom en UV straling gebruikt. Aerosolen van bacteriofaag MS2 werden samen met vervuiling op coupons van de maskers aangebracht in drie verschillende cycli, waarbij dus na elke cyclus de vervuiling toenam. Magnetron gegenereerd stoom was na alle cycli even effectief en ondervond geen effect van de vervuiling. UV straling liet verschil zien in effectiviteit tussen de verschillende cycli: bij een toename van de vervuiling nam de penetratie van de UV straling af. Er werd een lineaire correlatie gezien tussen de hoeveelheid UV penetratie in het masker (tot in het filter medium) en de decontaminatie efficiëntie. Voor toepassing in de praktijk zou er dus meer UV straling nodig zijn voor vervuilde maskers of de maskers zouden eerst schoongemaakt moeten worden. Indien maskers meerdere malen gedecontamineerd worden, dient er rekening mee gehouden te worden dat opgebouwde vervuiling de effectiviteit van de decontaminatie negatief kan beïnvloeden.

Bergman et al. ((29)#, 2010) hebben zes verschillende N95 maskers op acht verschillende manieren gedecontamineerd en dit driemaal achter elkaar gedaan om de kwaliteit van de maskers na drie maal decontaminatie te onderzoeken. Een van de gebruikte methodes was UV straling (254nm). Na behandeling met UV-C bleef de filter aerosol penetratie <5%, de filter airflow resistentie was voldoende en visueel werden er geen afwijkingen gezien. De fit van de maskers na decontaminatie is niet meegenomen in deze studie. Ook is niet onderzocht of het virus daadwerkelijk inactief was na de decontaminatie rondes.

Viscusi et al. ((24)#, 2011, *alleen abstract*) hebben voor verschillende decontaminatiemethoden, onder andere UV straling, onderzocht of ze

N95 mondkmaskers aantasten (zes verschillende typen). Over het algemeen werden na deze decontaminatiemethoden geen problemen gevonden in fit, geur, comfort of met het op en afdoen van deze typen N95 maskers.

Heimbuch et al. ((30)#, 2011) hebben een studie uitgevoerd met zes verschillende N95 maskers, die zijn gecontamineerd met het H1N1 influenza virus. Deze maskers worden gedecontamineerd met drie methoden, waaronder UV straling (254nm). Alle drie de methoden gaven >4-log reductie van het levende virus, zowel voor maskers gecontamineerd met druppels als met aerosolen. In 93% van de uitgevoerde experimenten was er geen virus meer te detecteren op de maskers. Bij de druppel testen werd er sporadisch nog levend virus gevonden op de maskers die behandeld zijn met UV straling. De auteurs geven aan dat de testmethoden niet zijn geoptimaliseerd en dat verdere optimalisatie van de protocollen een beter resultaat kunnen geven. Visueel liet UV straling geen afwijkingen zien. UV straling is goedkoop en kan volgens de auteurs snel op grote schaal ingezet worden, maar kan niet goed thuis worden gebruikt.

Fisher et al. ((15), 2011) hebben onderzocht of ultraviolet licht met korte golflengte (100-280 nm), ook wel UV-C straling (meestal met golflengte van 254 nm) genoemd, kan worden toegepast om mondkmaskers te decontamineren. Hiervoor zijn zes verschillende N95 ABM's gebruikt. De coupons van de verschillende mondkmaskers lieten zien dat met een dosis van minimaal 1000 J/m² (0.1 J/cm²) op het interne filter medium een 3-log reductie bereikt kon worden van levend MS2 colifaag. Om deze dosis te halen was echter voor ieder mondkmasker een andere belichtingstijd nodig (range 2-266 min.) Bij een voldoende hoge dosis kan UV-C volgens de auteurs bij de coupons zowel de buitenzijde als de interne filter media bestralen, maar de dosis is voor ieder mondkmasker anders. Belangrijke beperkingen van deze studie zijn volgens de auteurs dat er geen geheel mondkmasker is bestraald, maar alleen coupons. Ook zijn de rubber bandjes en andere onderdelen van de maskers niet meegenomen. Verder is er geen rekening gehouden met de vloeistoffen waar het virus in kan zitten op het masker, wat mogelijk het virus tegen inactivatie kan beschermen.

Lore et al. ((14), 2012) hebben drie manieren van decontaminatie getest (UV straling, magnetron stoom en vochtige hitte (65-70 °C)) voor twee N95 mondkmaskers gecontamineerd met influenza (H5N1) virus. Alleen de kant van de maskers waar de druppels met virus op gekomen zijn is getest. Kweken van het virus na decontaminatie liet zien dat de drie methoden effectief zijn en een 4-log reductie laten zien. Met RT-qPCR werd nog wel viraal RNA gevonden, echter met UV straling het minste. De filterfunctie van de maskers was voldoende na decontaminatie (bij deeltjes van 300 nm allemaal <5% penetratie). Er is geen fittest gedaan.

Moore et al. ((12), 2012) hebben de 'Nanoclave cabinet' getest, welke UV-C straling geeft van 53 W/m² (5,3 mW/cm²) en is ontworpen om klinische apparatuur te desinfecteren. Hiervoor hebben ze objecten die gebruikt worden voor de patiëntenzorg gecontamineerd met *C. difficile* en Adenovirus en vervolgens in de Nanoclave cabinet bestraald met UV-

C. Van de acht voorwerpen die twee keer 30 seconden werden bestraald, was de bacteriële contaminatie op 40/51 plaatsen niet meer te meten (≥ 4.7 log₁₀ reductie). Mogelijk was op de andere plaatsen sprake van schaduw door de vorm van de objecten, waardoor deze plaatsen minder goed gedesinfecteerd konden worden en mogelijk andere manieren van desinfectie nodig hebben. Objecten die moeilijk te desinfecteren waren met UV-C (bijvoorbeeld een bloeddruk manchet), waren ook moeilijk te desinfecteren met antimicrobiële doekjes. Door toevoegen van vervuiling veranderde de efficiëntie van de Nanoclave niet. *C. difficile* sporen waren resistenter voor UV-C dan vegetatieve bacteriën en hiervoor waren twee rondes van 60 seconden nodig om de sporen beneden de detectielimiet te krijgen. Voor het Adenovirus werd een 3 log₁₀ reductie gezien na 3 minuten bestraling, na 6 minuten was het virale DNA niet meer te meten. Als laatste dient te worden opgemerkt dat de Nanoclave maar een object tegelijk kan bestralen.

Lindsley et al. ((6), 2015) hebben onderzoek gedaan naar UV straling (254 nm) op decontaminatie van vier N95 mondkmaskers. Hiervoor hebben ze coupons genomen van de maskers en beide kanten bestraald met UV, daarnaast hebben ze ook de bandjes van de maskers verwijderd en bestraald met UV. Voor zowel de lagen van de maskers als de rubber bandjes werd bepaald hoeveel kracht er nodig was om ze te laten scheuren of breken. De UV doses waren in de range van 120-950 J/cm². UV straling had wel effect op de deeltjespenetratie: 16/20 coupons (12 significant) hadden een verhoogde penetratie (max. + 1.25%). Uiteindelijk hadden wel alle maskers een filterpenetratie <5%. Ook de flow resistentie veranderde na UV straling: voor 12 coupons nam deze toe en voor 8 nam deze af, maar de verandering was <6% voor alle coupons. Vooral de scheursterkte van het filtermateriaal werd aangetast bij de hogere UV doses, in sommige gevallen wel tot >90%: bij 120 J/cm² verloor 2/13 coupons een significante hoeveelheid kracht, maar bij 950 J/cm² waren dit er 10/13. Er was veel verschil tussen de diverse modellen die gebruikt werden. De rubber bandjes werden minder aangetast, bij een dosis van 590 J/cm² nam de kracht af met 10-21% (vergeleken met de controles) en bij 2360 J/cm² werd de sterkte met 20-51% verminderd. Het is dus goed om rekening te houden met het gebruikte materiaal en de dosis die nodig is om een bepaald pathogeen te doden om te bepalen hoe vaak een masker hergebruikt kan worden als er gebruik wordt gemaakt van UV straling. UV straling zou goed toegepast kunnen worden, maar bij maskers die weinig veiligheidsmarge hebben voor deeltjespenetratie is voorzichtigheid geboden, de flow resistentie zal waarschijnlijk niet de beperkende factor zijn voor de maskers. Het gebruikte model masker is een belangrijk punt: op de buitenste lagen van het masker moet 3.2-400 keer zoveel straling worden gegeven als voor de binnenste lagen nodig is, afhankelijk van de vorm van het model. Ook het ophopen van verontreiniging kan de penetratie van de UV straling afremmen, waardoor een hogere dosis UV straling nodig is voor decontaminatie.

Meunier et al. ((2), 2017) hebben middels een literatuurreview de experimentele gevoeligheid voor UV-C van organismen (bacteriën en virussen) die bij biotechnologische productie van geneesmiddelen een probleem kunnen veroorzaken. De verzamelde data, die betrekking hebben op virussen in vloeibaar kweekmedium, bevatten geen gegevens

over inactivatie van het Coronavirus. Duidelijk is dat de gevoeligheid voor UV-C per virus verschilt. De effectiviteit van de UV-C straling, dus de uiteindelijke dosis, hangt daarbij sterk af van het medium waarin het virus zich bevindt (UV-absorptie) en van eventuele klontjesvorming van de virus partikels. Het berekenen van de uiteindelijk benodigde UV-C dosis is daardoor zeer complex.

Lin et al. ((31)#, 2018) hebben onderzocht of *Bacillus subtilis* sporen op een N95 masker kunnen overleven na vijf methoden van decontaminatie, waaronder UVC (254nm). Dit artikel kijkt vooral naar de decontaminatie van bacteriesporen, waarvoor veel zwaardere decontaminatie nodig is dan voor de decontaminatie van (envelopped) virussen. De auteurs concluderen dat UVC een effectieve sterilisatie techniek is voor bacteriesporen.

Poster et al. ((32), 2018) vermelden in hun artikel dat de methodologie van UV-C wel bewezen is, maar dat UV-C technologie nog maar sporadisch in de gezondheidszorg wordt toegepast. Dit komt voornamelijk door gebrek aan kennis en uniforme prestatienormen of meetgegevens waarmee de effectiviteit bepaald kan worden, waardoor er geen onderbouwde, betrouwbare beslissingen genomen kunnen worden. Doordat er geen standaard laboratorium effectiviteit testmethode is, gebruiken fabrikanten nu verschillende benaderingen om effectiviteitsclaims te maken. Hierdoor kunnen de verschillende UV-C apparaten moeilijk met elkaar vergeleken worden.

Kim et al. ((33), 2018) hebben onderzocht of LED UV lampen net zo effectief zijn als kwik UV lampen, aangezien de kwiklampen waarschijnlijk worden verboden vanwege milieu- en gezondheidsoverwegingen. Hiervoor hebben ze gekeken of UV LED lampen net zo effectief virussen, bacteriën en schimmelaërosolen decontamineren in een luchtdesinfectiesysteem als kwiklampen. De bacteriën bleken het meest UV-gevoelig, daarna de schimmels en de virussen. Na het testen van meerderen micro-organismen was de conclusie van de auteurs dat UV LED lampen ook voldoende effectief zijn om de conventionele kwiklampen te vervangen.

Nakpan et al. ((34), 2019) hebben onderzocht of (bacterie en schimmel) sporen gedecontamineerd kunnen worden op "platte" HEPA en niet-HEPA filters, om oppervlakte desinfectie na te bootsen. Daarnaast hebben ze een commerciële niet platte HEPA filter getest. Voor decontaminatie werd UV-C ($6\text{mW}/\text{cm}^2$) gecombineerd met jodium in gasvorm. Voor beide typen sporen was het effectiever om eerst UV-C toe te passen en daarna het jodium, dan om dit gelijker tijd te doen of in de andere volgorde. De inactivatie van bacterie sporen was voor alle drie de verschillende combinaties (van jodium en UV-C) minder effectief voor de niet platte filters dan voor de platte filters, echter voor de schimmel sporen werd deze trend niet waargenomen. Zelfs als de filters plat worden gemaakt kunnen de sporen zich in het filter materiaal afzetten, en dus niet alleen op het oppervlakte. Omdat de filters waar de bacterie sporen op zaten werden blootgesteld aan lagere hoeveelheden UV-C, is dit waarschijnlijk de reden waarom de effectiviteit bij de platte en niet platte filters veel lager was dan de perfecte platte (MCE) filters die als controle werden gebruikt. De schimmelsporen zijn waarschijnlijk

veel gevoeliger voor de jodium behandeling dan het UV-C, waardoor de vorm en materiaal van het filter voor schimmelsporen minder belangrijk was voor de uitkomsten omdat jodium ook de ronde vorm van het filter kan penetreren.

Rowan et al. ((35), 2020) geven aan dat tekorten aan mondmaskers in de COVID-19 crisis als laatste optie opgelost kunnen worden door het herverwerken van mondmaskers. In dit artikel, waarbij de focus op Ierland ligt, worden hiervoor als mogelijke opties gegeven waterstofperoxide (in gasvorm), UV straling en vloeibare desinfectie (Actichlor+). Over UV wordt het volgende vermeld: efficiëntie van UV straling is afhankelijk van de toepaste dosis of sterkte van de lamp (W/m^2) en wordt beïnvloed door schaduwvorming, waarbij het alleen werkzaam is op de stukken die het ook bestraalt. Daarvoor zullen de beschermingsmiddelen gedraaid moeten worden tijdens de behandeling met UV. Ze zetten verschillende artikelen uiteen die UV als decontaminatie van mondmaskers hebben onderzocht, maar concluderen dat op het moment van schrijven van het artikel UV weliswaar als veelbelovend wordt gezien, maar dat er nog geen gevalideerde decontaminatiemethode voor mondmaskers is gebaseerd op UV-C.

Leung et al. ((36), *alleen abstract beschikbaar*, 2020) beschrijven een case report van een gezin met drie volwassenen die hinder ondervonden van fototoxiciteit door gebruik van UV-C in hun huishouden. Ze benadrukken dat de effectiviteit van UV-C om COVID-19 te inactiveren nog niet bewezen is en dat UV-C op de juiste manier moet worden gebruikt en op dit moment niet voor desinfectie van COVID-19 in huishoudens gebruikt zou moeten worden.

Cadnum et al. ((5), 2020) onderzochten voor drie methoden, waaronder UV-C licht, de desinfectie-effectiviteit bij drie verschillende typen N95 maskers. Hiervoor werden de maskers geïnoculeerd met methicilline-resistente *Staphylococcus aureus* (MRSA) en bacteriofagen MS2 en Phi6. Phi6 is een enveloped RNA-virus dat werd gebruikt als surrogaat voor coronavirussen. Als criterium voor een effectieve decontaminatie hanteerden de auteurs een $10\log$ CFU / PFU reductie van 3 op het masker; voor een effectieve desinfectie was een $6\log$ reductie het criterium. Er werden twee UV-behandelingen onderzocht: een behandeling in een UV-C box met een cyclus van 1 minuut en een behandeling met een UV-apparaat voor ruimteontsmetting met een cyclustijd van 30 minuten. De maskers werden aan twee kanten bestraald met UV-C. Met beide UV-C methoden werden niet alle plekken op de maskers voldoende gedecontamineerd. De auteurs concluderen dat UV-C wel enige mate van decontaminatie van N95 adembeschermingsmaskers kan geven, maar onvoldoende om te spreken over volledige decontaminatie. Met UV-C werd geen desinfectie bereikt.

Cheng et al. ((9), 2020) onderzochten de kiemdodende effectiviteit van diep-ultraviolet light-emitting diodes (DUV LED) met een golflengte van 280 nm op bacteriën op verschillende substraten. Hierbij werd ook gekeken naar mogelijk herstel van bacteriële cellen, die door UV-straling zijn beschadigd. Als nadeel van DUV noemen de auteurs de beperkte

penetratiediepte van DUV, wat kan worden verholpen door het te desinfecteren substraat te schudden of te roeren. Inactivatie in een thin liquid film (TLF) van meer 1.2 mm verliep langzamer dan in een dunnere TLF. De auteurs tonen aan dat aggregatie van bacteriën op het grensvlak vloeistof-lucht de cellen in de vloeistof afschermt voor de inactivatie door DUV waardoor de inactivatie in het begin langzamer verloopt. Er werd geen herstel van de bacteriële cellen gevonden.

Allen et al. ((1), 2020) onderzochten in een ziekenhuissetting of routinematig reinigen van tablets met ofwel desinfectiedoekjes ofwel UV-C resulteert in een lager bacterie-niveau op de tablet. In ziekenhuizen worden tablets steeds meer gebruikt om patiënten gegevens te laten invullen. Hierbij is er een risico van overdracht van pathogene bacteriën, zoals MRSA, van patiënt op patiënt. De studie gaf geen significant verschil in resultaten tussen desinfectiedoekjes en UV-C behandeling: beide methoden gaven een bacteriële reductie van 67%. De auteurs verwachten dat met andere UV-C apparatuur met hoger vermogen een hogere bacteriële reductie behaald kan worden.

Mills et al. ((19)#, 2018) hebben onderzoek gedaan naar UV straling (254nm) als decontaminatiemethode voor 15 verschillende N95 mondmaskers die gecontamineerd waren met influenza H1N1 (zowel het masker als het bandje). Verder hebben ze twee soorten extra verontreiniging toegevoegd aan het masker (kunstmatige speeksel en huidolie). De mondmaskers werden bestraald met 1 J/cm^2 gedurende 1 minuut. Hierna werden de besmette delen van de maskers uitgesneden om het virus te extraheren. Een ≥ 3 -log reductie van het influenza virus werd gezien in 12/15 maskers en in 7/15 bandjes van de maskers voor beide verontreinigingsmethoden. De drie maskers die deze decontaminatie niet lieten zien waren wit, 'cup-shaped' en hadden een licht ruwe textuur. Voor hydrofiele mondmaskers is het mogelijk dat het virus verder in het masker opgenomen wordt en de UV straling er dus niet goed bij kan. De resultaten laten zien dat de desinfectie effectiviteit afneemt als er meer verontreiniging op een masker zit. Echter, er werd veel verontreiniging gebruikt in deze studie en er werd alsnog afname gezien van het virus. Schaduw in het ontwerp van het mondmasker zorgt ook voor een mindere werkzaamheid van de UV straling, vooral bij de bandjes lijkt dit een groot probleem. Maar de bandjes zouden eventueel met een desinfectiedoekje kunnen worden gedesinfecteerd. Alleen de buitenkant van het mondmasker is bekeken in deze studie, de binnenkant van het mondmasker zou ook moeten worden onderzocht voordat deze techniek geïmplementeerd kan worden in de kliniek, omdat zowel de gebruiker als de omgeving het masker kan verontreinigen. Op basis van deze studie lijkt het mogelijk om mondmaskers te decontamineren met UV straling, maar bij implementatie moet zorgvuldig gekeken worden naar het materiaal en het model van de verschillende maskers.

Card et al. ((21), 2020; geen peer review) hebben onderzocht of persoonlijke beschermingsmiddelen (PPE) gedecontamineerd kunnen worden met UV-C in biosafety cabinets (BSC's). Omdat er voor decontaminatie van ABM's of chirurgische maskers minimaal 1 Jcm^{-2} nodig is, zou er een bestralingstijd van 4.3 uur per kant nodig zijn als de N95 maskers op de bodem van de BSC worden gelegd. Indien het

masker hoger wordt gelegd (op 19 cm van de bovenkant van de BSC) zou het masker in 62 minuten per kant gedecontamineerd zijn. Een mogelijk obstakel in het gebruik van UV-C is dat het stralingsniveau binnen een BSC kan variëren. Het is bekend dat de hoeveelheid UV-C kan afnemen naarmate de lampen ouder worden. Daarom is het belangrijk om de geleverde UV-dosis aan de maskers op locatie te verifiëren. Er werden geen virologische testen gedaan op de masker om de decontaminatie van de binnenste lagen ook aan te tonen. De filtratie efficiëntie van de ABM's werd niet aangetast door de UV-C.

Fischer et al. ((22), 2020; geen peer review) hebben vier decontaminatiemethoden met elkaar vergeleken: UV-C, 70°C droge hitte, 70% ethanol en waterstofperoxide (VHP, gasvorm). Hierbij hebben ze gekeken naar inactivatie van SARS-CoV-2 (op coupons van het masker en op een stukje roestvrij staal als controle) en de filterfunctie van de N95 ABM's. Voor UV-C was de toegepaste energie na 10, 30 en 60 minuten bestralen was respectievelijk 0.33 J/cm², 0.99 J/cm² en 1.98 J/cm². De auteurs stellen dat CDC geen specifieke minimum dosis aanbeveelt maar wel aangeeft dat 1 J/cm² een reductie van 99% van de viable viral load geeft. VHP en ethanol konden het virus heel snel inactiveren op zowel de maskers als op het roestvrij staal. UV-C inactiverde het virus snel op roestvrij staal, maar minder snel op het masker door het poreuze materiaal. Droge hitte had vergelijkbare inactivatie van het virus op de maskers als UV, maar inactivatie op het staal was langzamer. De filterfunctie van de maskers was bij alle vier technieken niet verminderd na eenmaal decontamineren. Na meerdere malen decontamineren daalde de filterfunctie van de ethanol behandelde maskers en in mindere mate ook van de hitte behandelde maskers. Voor UV en VHP was de filterfunctie na twee keer decontamineren nog vergelijkbaar met de controles en na driemaal was de filterfunctie nog steeds acceptabel. De auteurs concluderen dat VHP de beste combinatie geeft van virus-inactivatie en preservatie van de integriteit van het masker. UV-C doodt het virus langzamer, maar heeft wel vergelijkbare uitkomsten voor de integriteit van het masker.

Gilbert et al. ((37), 2020; geen peer review) beogen een eenvoudige en goedkope methode/werkwijze aan te reiken om met UV-C lampen die beschikbaar zijn in laboratoria en instellingen N95 maskers te decontamineren. De methode is daardoor ook haalbaar op afgelegen plekken in de USA of elders, waar andere methoden niet beschikbaar zijn. Op basis van literatuur is het uitgangspunt van de auteurs is dat UV-C een effectieve methode is om adembeschermingsmaskers snel te steriliseren. Het artikel bevat een overzichtstabel met toegepaste methoden uit de literatuur.

Smith et al. ((16), 2020; geen peer review) onderzochten het effect van verschillende decontaminatiemethoden, waaronder UV-C, op de integriteit van N95 maskers en op inactivatie van infectieus SARS-CoV-2. Na langdurige UV blootstelling zakte de fit-waarde van de N95 maskers aanzienlijk, al bleef de gemiddelde fitwaarde boven 100 (acceptatiegrens). Om de virusinactivatie te testen werd 100 µl gepooled viraal materiaal uit 6 patiënten met hoge SARS-CoV-2 titer in medium in verschillende type N95 maskers gebracht, waarbij ook de binnenste lagen van het masker werden bereikt. Na decontaminatie

werden de maskers in kweekmedium gebracht. Een deel van het medium werd getest op aanwezigheid van virus met RT-qPCR en een deel van het medium werd aan Vero E6 celkweken toegevoegd. Vervolgens werd na 4 dagen cel kweek het medium getest op aanwezigheid van SARS-CoV-2 met behulp van RT-qPCR en semi-kwantitatief op basis van cytopathische effecten. UV behandeling bleek slechts in 1 masker een virucidaal effect te hebben gehad. De auteurs verwachten dat een virusload zoals in normale zorgomstandigheden voorkomt, minder diep het masker binnendringt en betere resultaten zal geven. Ook was de dosis UV-C vrij laag gekozen in dit experiment, dat slechts een maal is uitgevoerd. Gezien de effecten van de decontaminatiemethode op de filterintegriteit vragen de auteurs zich af of afzien van decontaminatie en de maskers laten liggen gedurende 7 dagen mogelijk een verkiesbare strategie is.

Price et al. ((23) 2020; geen peer review) onderzochten de filtratie-eigenschappen en de fit van vijf modellen N95 maskers van drie verschillende fabrikanten (3M, Jackson en 4C) na een UVGI behandeling, die zij veelbelovend achten (UVGI 254 nm, 8W, 30 minuten bestralen in een sterilisatiekast, 10 cycli). (Opgemerkt wordt dat 8W zeer hoog lijkt en dat niet duidelijk is wat de toegepaste energie per cm² is). In een fittest wordt gecontroleerd of het adembeschermingsmasker een voldoende aansluiting van het masker op het gezicht van de drager garandeert. Na 10 UVGI-cycli voldeden de N95 maskers niet meer in de kwantitatieve fit test volgens het OSHA testprotocol. De afname van de fitfactor was gemiddeld 90%. Volgens het OSHA protocol wordt de test uitgevoerd op 8 proefpersonen die tijdens het meten een programma van verschillende manieren van ademen en bewegingen doorlopen (normaal ademen, diep ademen, ademen tijdens hoofdbewegingen links-rechts, ademen tijdens hoofdbewegingen voor-achterwaarts, al pratend, ademen tijdens grimassen trekken, ademen tijdens naar voor en achter buigen en normaal ademen). UVGI tast vooral het elastiek van de banden aan waardoor de fit afneemt.

O'Hearn et al. ((20), 2020; geen peer review) hebben recent een systematische review uitgevoerd, waarvan de resultaten als preprint beschikbaar zijn. Het doel van de review was om 1) de invloed van UGI op de filtereigenschappen van N95 mondmaskers na te gaan (met name aerosol penetratie en airflow resistance), 2) de effectiviteit van UVI om de virale en bacteriële load te verlagen te bepalen en 3) maatregelen en observaties met betrekking tot de fit of degradatie van het masker te beschrijven. De auteurs concluderen dat de filtereffectiviteit van de maskers niet wordt aangetast na één UV-C decontaminatiecyclus. Hoe meer cycli, hoe groter de kans op aantasting van het masker. Voor afdoende decontaminatie van N95 maskers met UV-C behandeling is de onderbouwing minder sterk. Er zou in elk geval een cumulatieve UV dosis van 40.000 J/m² (4 J/cm²) toegepast moeten worden en verder onderzoek in 'real world' omstandigheden is nog nodig. Ook moet aandacht besteed worden aan de fit van N95 maskers die met UV-C behandeld worden, omdat hierover nog weinig gegevens beschikbaar zijn.

Lowe et al. ((10), 2020; geen peer review) een rapport van de Universiteit van Nebraska waarin een uitgebreid gedocumenteerde procedure voor de decontaminatie van N95 mondmaskers met twee 'operating room UVGI towers' wordt beschreven met foto's en instructies voor verschillende ziekenhuisfunctionarissen. De procedure gaat uit van gepersonaliseerd hergebruik van de mondmaskers met een beperkte aantal keren hergebruik. De auteurs hebben de opstelling gevalideerd en geven aan dat de maskers een veelvoud van de benodigde straling ondergaan zodat de methode een gedecontamineerd masker voor hergebruik oplevert. Volgens Gilbert et al ((280), 2020) is dit systeem goedgekeurd door CDC.

Baluja et al. ((17), 2020; geen peer review) onderzochten de verdeling van UV-C straling op verschillende mondmaskers en op een verschillende plaats ten opzichte van de UV-C lampen. De benodigde UV-C bestralingsduur voor decontaminatie hangt af van de vorm van de mondmaskers en de oriëntatie (afstand en hoek) ten opzichte van de UV-lampen. Hierdoor kunnen bepaalde delen van de maskers een hogere dosis straling ontvangen dan voor decontaminatie noodzakelijk is. De auteurs concluderen dat bestralen met UV-C de virale load vermindert maar dat meer studies nodig zijn om complete inactivatie van de binnenlagen van FFP maskers aan te tonen. Zij stellen voor de tekorten door de COVID-19 pandemie een procedure voor decontaminatie voor gepersonaliseerd hergebruik van N95 mondmaskers voor.

N95DECON, Factsheet COVID N95 DECON & REUSE UV-C, 23 april 2020(38):

N95DECON is een wetenschappelijk consortium in de Verenigde Staten waarin wetenschappers op persoonlijke titel samenwerken om wetenschappelijke gegevens over decontaminatie van N95 adembeschermingsmaskers bij elkaar te brengen. Op 23 april 2020 heeft deze groep een factsheet over decontaminatie van N95 adembeschermingsmaskers met behulp van UV-C uitgebracht. Belangrijke punten: altijd bij voorkeur nieuwe N95 adembeschermingsmaskers gebruiken, alleen decontamineren als het niet anders kan vanwege nijpende tekorten, na decontaminatie alleen gepersonaliseerd hergebruik toestaan. Gebruik alleen UV-C licht met een golflengte van 254 nm.

Conclusie in de factsheet is: *If implemented properly using sensors to ensure $\geq 1.0 \text{ J/cm}^2$ UV-C dose to the N95, this method likely inactivates SARS-CoV-2; however, this has not yet been confirmed directly with SARS-CoV-2. This method may protect against some bacterial co-infection risks but not all. Only UV-C light with a peak wavelength of 254 nm has demonstrated substantial germicidal effects on N95 FFRs.*