

TNO PUBLIEK

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 22 00

TNO-rapport**TNO 2022 R11245****Literatuurstudie naar de toepassing van
verschillende luchtreinigingsmethoden voor
inactivatie van microbiologische
verontreinigingen**

Datum	29 juni 2022
Auteur(s)	Dr. ir. K. Kompatscher Dr. ing. A.A.L. Traversari, MBA
Aantal pagina's	38 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	TNO Intern
Projectnaam	
Projectnummer	060.50994

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

Luchtreinigingsapparatuur wordt veelal gebruikt om deeltjesconcentraties in ruimten te reduceren. Luchtreinigingsapparatuur heeft een filterende werking en heeft potentie om microbiologische verontreinigingen (bacteriën, virussen, schimmels) te verwijderen en of te inactiveren/af te doden, en daardoor de luchtkwaliteit te verbeteren. De SARS-CoV-2 pandemie heeft ervoor gezorgd dat virusinactivatie en het verwijderen van virusdeeltjes een belangrijk onderwerp is geworden. Het gebruik van onder andere UV en ionisatie voor luchtreiniging krijgt steeds meer aandacht. De effectiviteit van deze technologieën is echter niet geheel duidelijk en praktijkstudies lijken gering. Middels een literatuuronderzoek is de volgende onderzoeksvraag onderzocht:

Wat is de effectiviteit van luchtreinigingstechnieken zoals fysieke filtratie, UV en ionisatie voor het verwijderen en inactiveren van micro-organismen en virussen?

Een literatuuronderzoek is uitgevoerd door in verschillende databases en websites middels relevante zoektermen ("peer reviewed" wetenschappelijke) publicaties te selecteren. Door gebruik te maken van de sneeuwbalmethode en kennis van experts op het gebied van filtratie, UV en ionisatie voor luchtzuivering is de literatuurset uitgebreid. Een literatuurset van 69 publicaties is geïncludeerd in deze literatuurstudie.

Er zijn veel studies beschikbaar die filtratie, UV of ionisatie als reinigingstechnologie bestuderen. Studies die filtratie beschouwen gaan merendeels over het filteren van bepaalde deeltjesgroottes. Het afdoden van micro-organismen door filtratie en met name het inactiveren van virussen komt weinig aan bod. Het overgrote deel van deze studies gericht op UV en ionisatie concludeert dat er meer onderzoek nodig is om de werking en effectiviteit van de luchtreinigingstechnologie voor een specifieke microbiologische verontreiniging te bepalen. Wetenschappelijke onderzoeken zijn niet eenduidig als het gaat om de effectiviteit. Praktijksituaties worden zelden onderzocht. Laboratoriumstudies worden uitgevoerd met opgekweekte micro-organismen die aan UV worden blootgesteld. Indien dit het micro-organisme inactieveert of onschadelijk maakt wordt zegt dit iets over de gevoeligheid van micro-organismen voor UV. Het vernevelen van micro-organismen komt dichterbij in de buurt van een praktijk situatie echter is dit niet gelijk aan een continue emitterende bron zoals bij een besmette persoon het geval zal zijn. Het effect wordt gemeten door de afname van het aantal deeltjes over tijd te monitoren. Dit geeft informatie over de filterende werking, echter niet over de inactivatie-effectiviteit van micro-organismen. Er zijn methoden om deze inactivatie-effectiviteit te bepalen, deze worden in de beschouwde literatuur beperkt toegepast. Het effect van een constante of intermitterende bron wordt in deze studies niet altijd meegenomen. Vaak wordt uitgegaan van een eenmalige emissie bij aanvang van het experiment. Hierdoor wordt de praktijk situatie slecht benaderd.

Ionisatie technologieën worden onderzocht in relatie tot niet-pathogene deeltjes. Studies naar de effectiviteit van ionisatie op de inactivatie van microbiologische verontreinigingen zijn schaars. Ditzelfde geldt voor praktijkstudies. De weinige studies die geraadpleegd zijn trekken veelal geen conclusie over de inactivatie van

microbiologische verontreinigingen en de effectiviteit van een bepaalde luchtreiniger.

Studies naar langdurige blootstelling aan UV of restproducten die vrijkomen bij PCO of ioniserende technologieën zijn schaars. De weinige studies die geraadpleegd zijn in deze literatuurstudie geven aan dat de meeste commercieel verkrijgbare luchtreinigers bijproducten emitteren, hoewel deze sterk kunnen afwijken van opgegeven waarden. In het algemeen is het te adviseren om luchtreinigers die gebaseerd zijn op UV en ionisatie eerst grondig op bijproducten te testen. In een aantal Europese landen is dit gebruikelijk of zelfs wettelijk verplicht voordat deze in openbare ruimten toegepast mogen worden. Er is literatuur beschikbaar die suggereert dat een hoge blootstelling aan negatieve elektronen die bij ionisatie vrijkomen kan leiden tot negatieve gezondheidseffecten. Er kunnen dus mogelijk implicaties zijn bij langdurige blootstelling aan deze luchtreinigingstechnologieën. Meer onderzoek naar het vrijkomen van en (langdurige) blootstelling aan UVC, ozon, vrijgekomen radicalen en ioniserende deeltjes op de gezondheid van de mens wordt geadviseerd.

Op basis van de geraadpleegde literatuur en de variatie in de kwaliteit van deze studies kunnen daarom geen eenduidige conclusies getrokken worden voor de effectiviteit van onderzochte luchtreinigingstechnologieën.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Methode	6
2.1	Scoping review	6
3	Resultaat.....	9
3.1	Filtratie	9
3.2	Ultraviolet.....	9
3.3	Ionisatie	11
3.4	Overige technieken.....	12
3.5	Effectiviteit van luchtfilters	13
4	Discussie	22
5	Conclusies.....	24
6	Ondertekening	25
7	Bronnenlijst.....	26
	Bijlage(n)	
	A Onderzoeksopzet	
	B Stralingsblootstelling organismen	

1 Inleiding

Luchtreinigingsapparatuur wordt gebruikt om deeltjesconcentraties in verschillende gebouwen te reduceren.¹ Buiten de filterende werking heeft luchtreinigingsapparatuur de potentie om microbiologische verontreinigingen (bacteriën, virussen, schimmels) te inactiveren/af te doden, en daardoor de luchtkwaliteit te verbeteren.²

De meeste technologieën zijn afkomstig van industriële uitlaatgassen, gasbehandelingstechnologieën en uit waterzuivering. Hierbij worden stofverwijderingstechnologie, gaszuivering en sterilisatietechnologie onderscheiden.³

Gezien de huidige pandemie is virusinactivatie door middel van luchtreiniging een hot topic. Het gebruik van onder andere filtratie, UV en ionisatie voor luchtreiniging krijgt steeds meer aandacht. De effectiviteit van deze technologieën is echter niet geheel duidelijk en praktijkstudies zijn beperkt beschikbaar. Middels deze literatuurstudie wordt gekeken of er onderbouwde uitspraken gedaan kunnen worden over de effectiviteit van filtratie, UV en ionisatie als luchtreinigingstechnologieën. De volgende onderzoeksvraag is hiervoor opgesteld:

Wat is de effectiviteit van luchtreinigingstechnieken zoals fysieke filtratie, UV en ionisatie voor het verwijderen en inactiveren van micro-organismen en virussen?

Om deze vraag te beantwoorden zijn de volgende sub-vragen gevormd:

- *Hoe werken filtratie, UV en ionisatie als luchtreiniging (welk werkingsprincipe hebben deze technologieën)?*
- *Wat is de effectiviteit van systemen gebaseerd op filtratie, UVC en ionisatie voor het verwijderen en inactiveren van micro-organismen en virussen?*
- *Welke (schadelijke) bijproducten komen mogelijk vrij bij UV en ionisatie en wat voor potentiële gevolgen voor de gezondheid zijn daaraan verbonden?*

2 Methode

In verschillende databases en websites zijn middels relevante zoektermen (wetenschappelijke) publicaties gezocht. Deze zoekstrategie en daarmee de literatuurdataset is uitgebreid door gebruik te maken van kennis van experts op het gebied van filtratie, UV en ionisatie voor luchtzuivering en websites van verschillende (kennis)instituten. Op deze wijze is gezocht naar publicaties die aansluiten op de scope van dit onderzoek.

Verdere uitbreiding van de literatuurset is via de zogenoemde sneeuwbalmethode tot stand gekomen. Er is voor deze literatuurstudie geen *systematic review* gedaan. In de komende secties wordt dieper ingegaan op de zoekmethode die gebruikt is in deze review.

2.1 Scoping review

De scoping review is uitgevoerd in de periode 29 april – 11 mei 2022.

2.1.1 Databases

De volgende databases zijn gebruikt bij het verzamelen van publicaties middels zoektermen:

Pubmed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)

Cochrane Library (<https://www.cochranelibrary.com/>)

Scopus (<https://www.scopus.com/>)

De volgende websites zijn gebruikt voor het verzamelen van publicaties:

WHO (<https://www.who.int/>)

RIVM (<https://www.rivm.nl/>)

2.1.2 Zoektermen

Aan de hand van drie onderwerpen voor drie typen technologie zijn zoektermen gevormd. Traditionele filtratie systemen (o.a. HEPA filters), UV en ionisatie gelden als overkoepelende technologieën. Omgeving, gezondheid en micro-organismen en virussen als subcategorieën. Deze zoektermen zijn gecombineerd in negen zoekstrings om in verschillende databases publicaties te zoeken (zie Tabel 1).

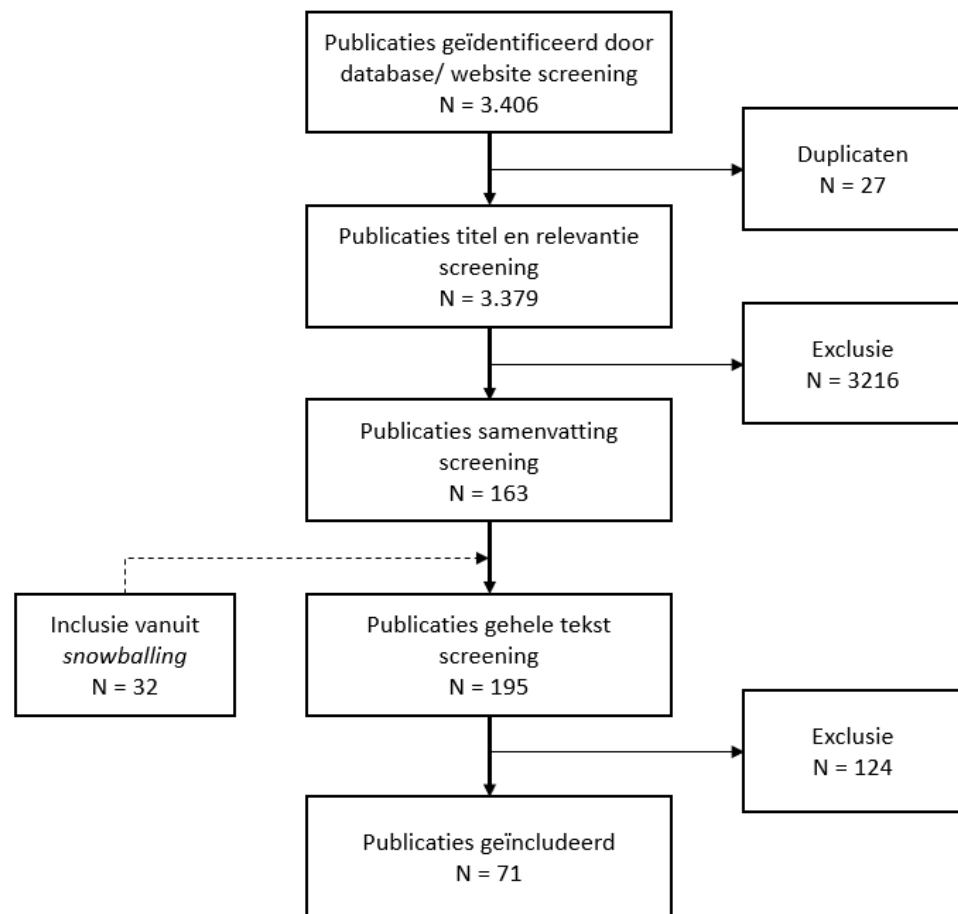
Figuur 1 geeft de zoekstrategie in een overzicht weer. 3.379 publicaties zijn op titel gescreend en 163 publicaties zijn hieruit gedestilleerd om op relevantie te bestuderen.

Naast het verzamelen van literatuur via online databases is gebruik gemaakt van de sneeuwbalmethode. Kennis van experts, bronnenlijsten uit gelezen literatuur en specifieke websites (WHO, RIVM, RKI, Fraunhofer) zijn doorzocht voor missende studies. Via deze methode zijn 32 publicaties toegevoegd.

Na het lezen van de gehele publicatie (n = 195) is op basis van de inhoud bekeken of de studie in deze literatuurstudie geïnccludeerd kon worden. Exclusie is gedaan op basis van een aantal randvoorwaarden:

- Literatuur is niet in Engels, Nederlands, Duits of Italiaans gepubliceerd.
- Simulatiestudie zonder validatiestudie.
- Studie omschrijft resultaten over alleen VOCs of (fijn)stof.
- Studie onderzoekt enkel impact op astmatische patiënten.
- Studie heeft geen betrekking op een binnenklimaat.

In totaal zijn 69 publicaties meegenomen in deze literatuurstudie.



Figuur 1 Overzicht screening proces publicaties

Tabel 1 Overzicht van gebruikte zoekstrings

Filtratie + omgeving	1	("HEPA" OR "filter") AND ("built environment" OR "building" OR "air quality" OR "surface") AND ("indoor air" OR "indoor environment" OR "indoor air quality" OR "indoor environmental quality")
Filtratie + gezondheid	2	("HEPA" OR "filter") AND ("air treatment") AND ("well-being" OR "health" OR "sympt" OR "quality of life" OR "ozone")
Filtratie + micro-organisme	3	("HEPA" OR "filter") AND ("air treatment") AND ("bacteria" OR "virus" OR "micro-organism" OR "aerosol" OR "emission" OR "disinfection" OR "inactivation" OR "dose")
Ionisatie + omgeving	4	("air treatment" OR "ioniser" OR "ionizer" OR "electrostatic" OR "ion generat" OR "ionised air" OR "ionized air" OR "electroporation" OR "HEPA" OR "filter") AND ("built environment" OR "building" OR "air quality" OR "surface") AND ("indoor air" OR "indoor environment" OR "indoor air quality" OR "indoor environmental quality")

Ionisatie + gezondheid	5	("air treatment" OR "ioniser" OR "ionizer" OR "electrostatic" OR "ion generat" OR "ionised air" OR "ionized air" OR "electroporation" OR "HEPA" OR "filter") AND ("air treatment") AND ("well-being" OR "health" OR "sympt" OR "quality of life" OR "ozone")
Ionisatie + micro-organisme	6	("air treatment" OR "ioniser" OR "ionizer" OR "electrostatic" OR "ion generat" OR "ionised air" OR "ionized air" OR "electroporation" OR "HEPA" OR "filter") AND ("air treatment") AND ("bacteria" OR "virus" OR "micro-organism" OR "aerosol" OR "emission" OR "disinfection" OR "inactivation" OR "dose")
UV + omgeving	7	("UVGI") AND ("built environment" OR "building" OR "air quality" OR "surface") AND ("indoor air" OR "indoor environment" OR "indoor air quality" OR "indoor environmental quality")
UV + gezondheid	8	("UVGI") AND ("well-being" OR "health" OR "sympt" OR "quality of life" OR "ozone")
UV + micro-organisme	9	("UVGI") AND ("bacteria" OR "virus" OR "micro-organism" OR "aerosol" OR "emission" OR "disinfection" OR "inactivation" OR "dose")

2.1.3 Onderzoeksdesign

Een overzicht van de volledig beschouwde (wetenschappelijke) literatuur is in Appendix A opgenomen. Na het lezen van de volledige publicatie is een categorisatie aangebracht op basis van onderzoeksdesign. Onder onderzoeksdesign zijn vier hoofdcategorieën bepaald; literatuurstudie, experimenteel onderzoek, simulatie studie en grijze literatuur. Er zijn veel overzichtsstudies aangetroffen op de onderwerpen filtratie, UV en ionisatie als luchtreinigingstechnieken. Met name na de start en gedurende de SARS-CoV-2 pandemie heeft dit onderwerp een vlucht genomen. In deze periode zijn een groot aantal studies uitgevoerd als systematische review om een beter beeld te krijgen van het onderwerp luchtreiniging. Het aantal laboratoriumstudies is hoog waarbij in enkele publicaties middels modelleren nog extra onderzoek is gedaan om andere situaties te benaderen. Er zijn slechts enkele praktijkstudies uitgevoerd en gepubliceerd. Praktijkstudies zijn waardevol als het gaat om de daadwerkelijke effectiviteit van luchtreinigingstechnieken. Deze schaarste in wetenschappelijke publicaties is aangevuld middels grijze literatuur (onder andere publicaties van onderzoeksinstituten en organisaties zoals het RIVM of de WHO) die de effectiviteit van luchtreinigers op het afvangen en inactiveren van micro-organismen en virussen in een praktijksituatie beschrijven.

3 Resultaat

3.1 Filtratie

Een fysiek filter is een methode om deeltjes af te vangen. Er zijn veel soorten filters op de markt. Onderlinge verschillen in effectiviteit worden met G1-4 (grof), M5-6 (medium) en F7-9 (fijn) aangeduid in de praktijk. Naast deze negen filterklassen bestaat er ook nog het high-efficiency particulate absorbing (HEPA) filter en het Ultra-Low Particulate Air (ULPA) filter.⁴ Deze twee laatstgenoemde filterklassen kunnen ook verder onderverdeeld worden. Tabel 2 geeft een overzicht van de effectiviteit van deze filterklassen voor deeltjes met een grootte van 0,3 µm. Deze deeltjesgrootte is de most penetrating particle size (MPPS). Dit houdt in dat de effectiviteit die genoemd wordt geldt voor deze grootte, de grootte die het meest door een filter heen komt. Deeltjes groter of kleiner dan deze grootte worden effectiever afgevangen. In de ISO 16890 standaard worden vier klassen aangeduid: ISO ePM₁, ePM_{2,5}, ePM₁₀ en coarse. Hierbij wordt het rendement gemeten als functie van de deeltjesgrootte in het gebied tussen 0,3 µm en 1, 2, 5 of 10 µm.⁵ De focus in dit onderzoek ligt op HEPA filters. ULPA filters zijn toepasbaar in zeer specifieke toepassingen (o.a. clean room). Deeltjes worden in een HEPA filter op drie wijzen afgevangen. Door middel van impact wordt een deeltje groter dan de ruimte tussen vezels tegengehouden (zeef). Deeltjes krijgen te maken met interceptie als de richtingsveranderingen niet gevolgd kunnen worden door de luchtstroom en worden door een vezel tegengehouden. Diffusie zorgt voor het afvangen van zeer kleine deeltjes.

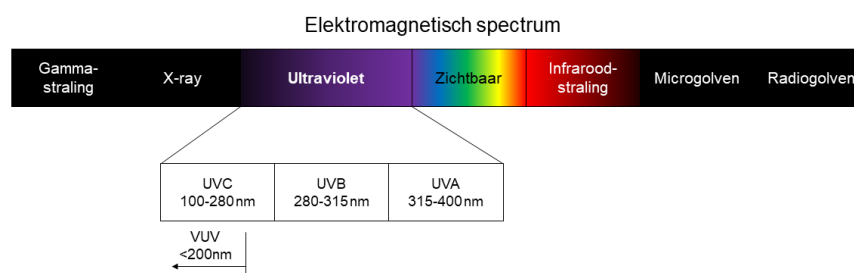
Tabel 2. Effectiviteit voor het afvangen van 0,3 µm deeltjes.⁴

Grof				Medium		Fijn			(H)EPA						ULPA
G1	G2	G3	G4	M5	M6	F7	F8	F9	E10	E11	E12	H13	H14	U15-17	
Effectiviteit voor 0,3 µm deeltjes (%)															
			0-5	5-15	10-25	45-60	65-75	75-85	>85	<95	>99,5	>99,95	>99,995	>99,9995	

3.2 Ultraviolet

3.2.1 UV fotolyse

Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) is kiemdodende UV-straling in het golflengtebereik tussen 100-400nm van het elektromagnetisch spectrum (zie Figuur 2). UV licht is verdeeld in meerdere categorieën. Tabel 3 laat een overzicht zien voor de verschillende categorieën UV straling. In de meeste studies wordt gesproken over UVA (lange golflengte 315-400 nm), UVB (middellange golflengte 280-315 nm) en UVC (korte golflengte 100-280 nm).



Figuur 2 Elektromagnetisch spectrum visueel weergegeven met ultraviolet uitsnede.

Tabel 3 UV-sectie uit ISO 21348 tabel aangaande definities van spectrale categorieën voor zonnestraling¹.

	Golflengte λ (nm)			
UV	10	$\leq \lambda <$	400	Ultraviolet
VUV	10	$\leq \lambda <$	200	Vacuum Ultraviolet
EUV	10	$\leq \lambda <$	121	Extreme Ultraviolet
H Lyman- α	121	$\leq \lambda <$	122	Hydrogen Lyman alpha
FUV	122	$\leq \lambda <$	200	Far Ultraviolet
UVC	100	$\leq \lambda <$	280	Ultraviolet C
MUV	200	$\leq \lambda <$	300	Middle Ultraviolet
UVB	280	$\leq \lambda <$	315	Ultraviolet B
NUV	300	$\leq \lambda <$	400	Near Ultraviolet
UVA	315	$\leq \lambda <$	400	Ultraviolet A

3.2.2 Inactivatie

UVGI is een beproefde techniek als het gaat om inactivatie van micro-organismen en kan worden gebruikt om de verspreiding van bepaalde infectieziekten te voorkomen. Door de straling van UVC (met een piek op 254 nm) doodt of inactieveert de straling microben. Het inactiveren gebeurt door het beschadigen van het DNA waardoor ze niet kunnen repliceren.^{2,6} Een veelvoud aan studies hebben vastgesteld dat het destructieve effect van UVGI op bacterieel en viraal DNA verband houdt met een combinatie van twee factoren. Enerzijds komt dit door de intensiteit van de UVGI-energie waaraan een infectieus deeltje wordt blootgesteld en anderzijds wordt het beïnvloed door de duur van de blootstelling.⁷ Brickner et al. biedt een overzicht in zijn studie van de blootstellingsintensiteit die nodig is om verschillende bacteriën, virussen en schimmelsporten te inactiveren (zie Tabel 11 in Appendix B). Het aanwezig zijn van een celwand en de dikte van deze celwand bepalen de gevoeligheid voor UV-straling. Virussen zonder celwand zijn makkelijker te inactiveren, coronavirussen specifiek, kennen een hoge mate van gevoeligheid voor UV.⁸ Sporen zijn lastiger te penetreren door UVGI en zullen minder makkelijk te inactiveren zijn.

3.2.3 Applicaties

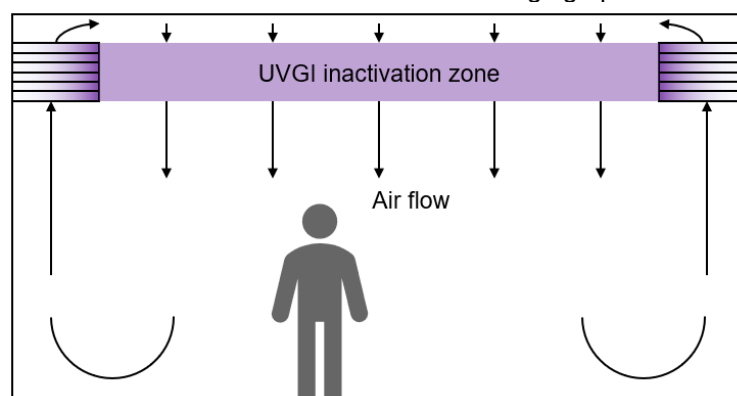
Het desinfecteren middels UVGI kan middels drie methoden: 1) reiniging in het luchtkanaal, 2) *upper-room* luchtreiniging en 3) lokale luchtreinigers.⁶

UVGI lampen worden geplaatst in de HVAC luchtkanalen van een gebouw. Lucht passeert de UV-lampen waar de straling micro-organismen (voor een deel) inactieveert en aan een ruimte wordt toegevoerd of afgevoerd naar buiten.

¹ ISO 21348:2007 - Space environment (natural and artificial) — Process for determining solar irradiances

Menselijke blootstelling aan UVGI van een in een luchtkanaal gemonteerde straler kan vrijwel uitsluitend voorkomen tijdens onderhoud op locatie waar de UV-lampen geïnstalleerd zijn.

Upper-room luchtreiniging is een methode waarbij de UV-lampen geplaatst worden aan het plafond van een ruimte. De UV-lampen worden hierbij afgeschermd waardoor personen in de ruimte niet rechtstreeks worden blootgesteld aan UVGI. Hierbij ontstaat een horizontale laag met UVGI boven het afgeschermd gebied, o.a. boven een verlaagd plafonddeel. Gecontamineerde lucht dient hierlangs te stromen om organismen te inactiveren (zie Figuur 3). Dit wordt gerealiseerd door gebruik te maken van ventilatoren. Onderzoek heeft aangetoond dat ook passieve vormen van luchtcirculatie al voldoende menging oplevert voor luchtreiniging.²



Figuur 3. Schematische weergave toepassing van upper room UVGI.

Lokale UV-luchtreiniging is een toepassing waarbij UV-lampen in een separate veelal mobiele lokale unit zijn geïnstalleerd. De ventilator zuigt lucht uit de ruimte aan waarbij het principe gelijk is aan de andere toepassingen. Gereinigde lucht wordt weer de ruimte ingeblazen.⁹

3.2.4 Fotokatalyse

Fotokatalyse is het versnellen van een reactie door de aanwezigheid van een katalysator (o.a. TiO_2). Fotokatalysatoren zijn chemische verbindingen die de efficiëntie van UV-straling verbeteren door een alternatief mechanisme voor het deactiveren van pathogenen te bieden. Een fotokatalysator wordt geactiveerd door UV-licht te absorberen. Uit de omringende lucht worden een aantal radicalen geproduceerd. Deze radicalen kunnen schimmels effectief inactiveren¹⁰. Fotokatalyse die oxidanten produceert wordt *Photocatalytic Oxidation* (PCO) genoemd en wordt als luchtreinigingstechnologie toegepast. Deze technologie wordt steeds meer toegepast in de HVAC-industrie voor het doden van bacteriën in de lucht, gebruik makend van UVC.¹¹

3.3 Ionisatie

Lucht ionen ontstaan door ongeladen moleculen/atomen te voorzien van een lading. Hiervoor moet voldoende hoge energie beschikbaar zijn voor een molecuul/aatoom om een elektron af te staan. Negatieve lucht ionen ontvangen een elektron en positieve ionen verliezen een elektron.¹² Dit wordt veelal gerealiseerd door een hoge spanning (enkele kV) tussen twee oppervlakken aan te leggen waar de lucht tussendoor stroomt.

Ionisatie is te verdelen in een tweetal hoofdtechnologieën, elektrostatische filtratie en plasma. Bij filtratie technologie wordt door middel van elektrostatische lading ionen gegenereerd. De geladen deeltjes worden bij een elektrostatisch filter door een collector afgevangen. Men spreekt in dit geval ook over gesloten ionisatie. Plasma technologie voor luchtreiniging maakt gebruik van een hoogspanning en richt zich met name op het verwijderen van fijnstof. Gecombineerd met een oxidatief proces maakt het ook mogelijk om VOCs af te breken.¹³ Veelal is hier geen collector aanwezig om de geladen deeltjes af te vangen en stromen de deeltjes door naar de ruimte, dit wordt open ionisatie genoemd.

Een bijproduct wat geproduceerd wordt bij het toepassen van ionisatie is ozon. Over het algemeen geldt dat hoe hoger de elektrische spanning is hoe hoger de ozonproductie.

3.3.1 Applicaties

Elektrostatische filtratie kan weer verder opgedeeld worden in twee subcategorieën. Een specifieke applicatie van elektrostatische technologie is een elektrostatisch filter (*electrostatic precipitators* – ESP). Deze technologie wordt veel gebruikt in de industrie om deeltjes (o.a. stof, rook en schimmelsporen) te voorzien van een lading. Deze deeltjes worden vervolgens op tegenovergesteld geladen platen afgevangen en vastgehouden waarna de platen vervangen dient te worden om de deeltjes te verwijderen. ESP werkt het best met deeltjes boven een bepaalde grootte en wordt daarom regelmatig gebruikt in situaties waar fijnstof verwijderd dient te worden. Deeltjes kleiner dan 0,03 µm worden niet geladen en bij deeltjes kleiner dan 0,05 µm wordt de filter efficiëntie ook lager. Micro-organismen worden afgevangen en gefilterd door deze technologie, echter niet op actieve wijze geïnactiveerd.^{10,14}

De andere applicatie is op basis van het genereren van zuurstof ionen. Deze hechten zich aan verontreinigde deeltjes welke op een oppervlak neerslaan.¹⁵ Beide applicaties worden ook omschreven als gesloten ionisatie (ionen worden in het apparaat gevangen en worden niet aan een ruimte toegevoerd). Bij open ionisatie komen de geproduceerde ionen ook buiten het toestel (deeltjes worden niet in luchtreiniger zelf opgevangen).

Zowel negatieve, positieve als bipolaire ionisatie komt voor. Unipolaire generatoren kunnen zowel positieve als negatieve ionen uitstoten, bipolaire generatoren stoten beiden uit (pulserende ionisatie). Het principe is gelijk, geladen ionen hechten zich aan verontreinigingen en transporteren en hechten zich vast aan oppervlakken waardoor er een verminderde concentratie verontreinigingen in de lucht is. Pulserende ionisatie heeft het voordeel dat er minder ozon wordt geproduceerd, een lager energieverbruik en een hogere efficiency aan toe wordt geschreven.¹⁰

3.4 Overige technieken

Niet-thermische plasma (cold plasma) is in een recente studie onderzocht als techniek om lucht te steriliseren. Het principe achter koud plasma bestaat uit lucht welke passeert over een ionisatiebuis die hoogspanningsontladingen afgeeft. Dit resulteert in positief en negatief geladen ionen, clusters van zuurstofionen, zuurstofhoudende radicalen, UVC straling en een reeks gecombineerde effecten.

Deze reactieve chemische soorten trekken geladen micro-organismen in de lucht aan en beschadigen membranen, DNA of eiwitten. Onder hoogspanning resulteren elektrische ontladingen in de vorming van ozon. Een niet-thermisch plasmasysteem in een luchtkanaal kan grote hoeveelheden lucht reinigen.¹⁶

Elektroporatie is een technologie die gebruik maakt van een continue elektrisch veld. Dit veld is gecreëerd door elektroden gemaakt van zeer poreus elektrisch geleidend schuimmetaalplaten. De elektroden zijn aangesloten op een hoogspanningsbron en realiseert zo een afwisselende elektrische polariteit. In twee laadkamers worden de oppervlakken van micro-organismen keer op keer geladen wat leidt tot inactivatie, dit proces is te vergelijken met onomkeerbare elektroporatie.¹⁷ Deze technologie wordt nog niet veel toegepast als luchtreiniging voor het inactiveren van micro-organismen. De effectiviteit van deze technologie is niet in de gevonden wetenschappelijke literatuur beschreven.

Ozongeneratoren reinigen de lucht door middel van ozonproductie. Een voorwaarde om deze technologie toe te passen is dat er geen personen of dieren aanwezig zijn in de ruimte. Na de behandeling is het reduceren van ozon in de ruimte belangrijk, dit wordt gedaan door ventileren. Er is in deze studie geen literatuur gevonden die het onderwerp ozongeneratoren en reduceren van micro-organismen en virussen behandelt.

3.5 Effectiviteit van luchtfilters

Bij de analyse van de literatuur in de komende paragrafen wordt de focus op fysieke filters, zoals het HEPA filter, en UVGI en ionisatietechnologieën gericht.

3.5.1 Effect van UVGI op inactivatie micro-organismen

Tabel 4 geeft een overzicht waarin de effectiviteit van UVGI op inactivatie van micro-organismen wordt weergegeven.

Tabel 4. Overzicht van studies waarbij de effectiviteit van UVGI wordt onderzocht.

Studie	Bemonstering	Effectiviteit (%)
Bedell, Buchaklian and Perlman, 2017 ¹⁸	Oppervlak* UVC	99,999 effectief tegen Murine hepatitis virus-A59 in 10 minuten
Green and Scarpino, 2001 ⁹	Lucht UVC (1, 2, 4, 8 lampen)	<i>Escherichia coli</i> 99,973 (1) - 99,9999 (2); <i>Staphylococcus aureus</i> 99,220 (4) - 99,998 (2); <i>Micrococcus luteus</i> 99,260 (1) - 99,935 (2); <i>Pseudomonas fluorescens</i> 99,936 (4) - 99,972 (2); <i>Bacillus subtilis</i> 75,934 (4) - schimmelspoor
Jelden <i>et al.</i> , 2017 ¹⁹	Oppervlak UVC	<i>Methicillin-resistant Staphylococcus aureus</i> 99,9 (plastic reling); 99,999 (RVS); 99,999 (chromium)/ VRE 99,999 (plastic reling); 99,999 (RVS); 99,99 (chromium)

Ko et al., 2002 ²⁰	Lucht	UVC	<i>Serratia marcescens</i> 62 (2 ACH), 86 (6 ACH); <i>Mycobacterium bovis</i> 64 (6 ACH)	Bacterie
Lin et al., 2017 ³	Lucht	Pulsed UVC	<i>Pseudomonas virus phi6</i> 99 (10-30s)	Virus
Welch et al., 2018 ²¹	Lucht	Far UVC 222nm	Influenza A H1N1 >95	Virus

Virussen en bijna alle bacteriesoorten zijn kwetsbaar voor blootstelling aan UVGI. De omvang van het effect is sterk afhankelijk van het soort micro-organisme (zie Tabel 11 in Appendix B).^{7,18,22} Tabel 4 laat zien dat voor schimmelsporen de inactivatie effectiviteit laag is (>75%) in vergelijking met de effectiviteit voor bacteriën en virussen (>95%).⁹ Het toepassen van pulserende UVGI op de inactivatie van micro-organismen kan een log2 reductie realiseren, echter het is ook opgemerkt dat het lastig lijkt om volledige (100%) reiniging te bewerkstelligen.^{22,23} Far-UVC straling lijkt voor mensen niet schadelijk te zijn en kan microbiologische verontreinigingen inactiveren met een lagere dosis.²¹

De applicatie waarin UVGI wordt toegepast heeft effect op de inactivatie van micro-organismen. Upper room UVGI is voor infectieuze agentia, waarbij de overdracht via druppels is, minder effectief. Het realiseren van voldoende luchtmenging waarbij deeltjes de UV-zone bereiken voordat deze worden ingeademd is onrealistisch.²⁴

3.5.1.1 Effectiviteit in lucht en op oppervlakken

Inactivatie van micro-organismen wordt vaak onderzocht door het blootstellen van micro-organismen op kweek aan UVGI.^{18,25} Deze experimenten zeggen iets over de gevoeligheid van specifieke micro-organismen voor UVGI onder bepaalde blootstellingsdoses en blootstelduur. Onderzocht wordt dan ook hoe effectief UVGI voor het inactiveren van micro-organismen op oppervlakken is. Om de blootstellingsdosis te verhogen worden soms toepassingen als UV reflecterende verf geïntroduceerd.¹⁹ Een andere variant voor het bepalen van de effectiviteit van UVGI is door het vernevelen van micro-organismen en deze in een testvolume in te brengen. Het afnamepercentage met en zonder UVGI wordt gemeten door luchtmonsters te nemen.^{7,26}

Tabel 11 in Appendix B toont een overzicht van vele vastgestelde blootstellingsdoses voor verscheidene micro-organismen. Veel van deze waarden zijn bepaald voor organismen op een oppervlak. De resultaten overschatten de dosis die nodig is voor inactivatie van vernevelde micro-organismen.⁷

3.5.1.2 Golflengte

Hoewel UVGI een spectrum aan golflengtes bestrijkt, zijn enkele specifieke golflengtes effectiever voor het inactiveren van micro-organismen dan anderen. Gericht inactivatie is voor een brede range aan micro-organismen mogelijk bij een golflengte van 222 nm en 254 nm. Voor schimmelsporen is het kiemdodende effect beperkt, maar voor bacteriën is het een effectieve golflengte.^{25,27}

3.5.1.3 Omgevingsfactoren die effect hebben op de effectiviteit

Omgevingsfactoren kunnen invloed hebben op de effectiviteit van UVGI. Een afhankelijkheid van effectiviteit van een luchtreiniger bij verscheidene luchtvochtigheidsniveaus en temperatuurniveaus is onder gecontroleerde omstandigheden aangetoond waarbij een reductie in effectiviteit bij een hogere luchtvochtigheid is vastgesteld.^{26,28} Deze relatie verschilt echter per micro-organisme. Luchtvochtigheidswaarden boven 75% kunnen de effectiviteit van

UVGI inactivatie sterk verminderen tot een niveau van slechts 40%, dit omdat UVGI, met name de korte golflengtes, minder goed door water penetreert en door de watermoleculen wordt geabsorbeerd.^{10,11}

Het effect van luchtvochtigheid op de inactiverende werking van UVGI, voldoende luchtmenging en ventilatievouden voor upper room UVGI, en microbiële gevoeligheid dient nader onderzocht te worden. Luchtsnelheid is van invloed als het gaat om de blootstellingstijd aan UVGI in een luchtkanaal. Hoe sneller de luchtstroom, hoe korter de blootstellingstijd en hoe kleiner de UVGI dosis is.^{24,29,30}

3.5.1.4 *Restproducten*

Ozon is een product dat wordt geproduceerd bij het gebruik van UV-licht. Ozon ontstaat bij golflengtes <200nm, met een piek bij 180nm. Bij systemen die ozon genereren kan dit een negatief effect op de gezondheid hebben.^{31,32} Zo is het mogelijk dat te hoge ozonniveaus leiden tot hoofdpijn, droge keel en zelfs levensbedreigend kunnen zijn. Ook kan ozon met terpenen tot het schadelijke formaldehyde reageren. Om dit te voorkomen hebben UV lampen meerdere ontwikkelingen doorgemaakt. Zo worden de meeste lampen gemaakt van *doped quartz* glas welke ozon producerende golflengtes blokkeert.^{9,33}

Photocatalytic Oxidation (PCO) technologie reduceert gasvormige verontreinigingen. Bij gebruik van PCO dient voldoende aandacht te zijn voor de bijproducten. Dit geldt ook voor ionisatie via koud plasma (niet thermische plasma). Hiervoor wordt aangegeven dat het energieverbruik hoger is dan andere technologieën met dezelfde functie. Met name de vorming van schadelijke bijproducten (O₃, NO_x, formaldehyde, etc.), verminderde performance bij 'vergiftigde' katalysator (gas moleculen adsorberen onomkeerbaar aan de actieve zijde van de katalysator), en hoog energieverbruik zijn nog obstakels waar meer onderzoek naar nodig is als het gaat om het gebruik van UVGI, PCO en koud plasma voor de verbetering van de luchtkwaliteit.³⁰

3.5.1.5 *Effecten op de gezondheid*

Bekend is dat bij langdurige blootstelling aan UVA en UVB straling er gezondheidsklachten kunnen ontstaan. Voor UVC zijn er twee bijwerkingen bij langdurige blootstelling vastgesteld. Het rood worden van de huid (erytherma), en een uitwendige oogontsteking (photokeratitis).⁶

Zorgvuldig ontworpen UVGI systemen dragen volgens Menzies et al. niet bij aan werk-gerelateerde symptomen bij medewerkers in een kantoorruimte. 99% van de microbiële en endotoxineconcentratie werd gereinigd van de oppervlakken van het ventilatiesysteem. Airborne micro-organismen werden bijna niet gefilterd wat duidde op lokale bronnen in het kantoor. Toch werden de werk gerelateerde gezondheidsklachten (slijmvlies-, ademhalings-, en algemene symptomen) minder bij werknemers. Dit kan verklaard worden door de reductie in groei van schimmels en bacteriën verantwoordelijk voor bepaalde symptomen.³⁴

3.5.1.6 *Praktijksituatie*

Er waren slechts enkele gepubliceerde wetenschappelijke studies uit de geraadpleegde literatuur waar luchtreinigingstechnieken in de praktijk worden onderzocht als het gaat om vermindering en inactivatie van microbiologische verontreinigingen (zie Tabel 5). De laatste studie betreft een conferentie bijdrage.

Tabel 5. Overzicht studies waarbij UV in een praktijksituatie wordt toegepast.

	Locatie	Systeemnaam	Locatie systeem	Oppervlak/ Luchtbemonstering
Menzies et al., 2003 ³⁴	Kantoor	Sanuvox Technologies/	HVAC	Oppervlak/ Petrischaal (HVAC)
Su et al., 2014 ³⁵	School	Lumalier WM-136	Ruimte	Lucht
Hofbauer en Baßler, 2022 ³⁶	Supermarkt	Signify GmbH	UVGI	Lucht
Lindblad et al., 2020 ³⁷	Ziekenhuis	Tru-D™	Ruimte	Oppervlak

Hoewel microbiologische verontreinigingen op oppervlakken in luchtbehandelingskasten een grote reductie (99%) laten zien na blootstelling aan UVGI, kunnen concentraties van microbiologische verontreinigingen in de toevoerlucht achterblijven in reductie (25-30%).³⁴

Absentie is geen goede uitkomstparameter als het gaat om het bepalen van effectiviteit van een UVGI systeem. Het bezette klaslokaal met UVGI had een gereduceerd aantal kleine deeltjes airborne bacteriën in vergelijking met het klaslokaal zonder UVGI systeem.³⁵

Het gebruik van UVGI in een ziekenhuiskamer (36m²) om oppervlakken te reinigen is mogelijk. De hoeveelheid UVGI per oppervlak kan sterk verschillen afhankelijk van blokkades en afstand tot de UVGI bron.³⁷

De studie van Hofbauer en Baßler heeft in een supermarkt upper room UVGI toegepast. De supermarkt was in normaal gebruik en reductie in kolonies van bacteriën en schimmels zijn via luchtmonsters onderzocht. Op de dagen dat het UVGI systeem was ingeschakeld was een afname van 50 tot 56% van het aantal schimmels vastgesteld en een afname van 59% van het aantal bacteriën. Hierbij zijn wel een aantal kanttekeningen te maken. Indien mensen zich op korte afstand van elkaar bevinden kan toch overdracht plaatsvinden. Voor de plaatsing van het systeem is het van belang dat er geen UV straling in de leefzone kan komen.

3.5.2 Effect van ionisatie op inactivatie micro-organismen

Tabel 6 geeft een overzicht waarin de effectiviteit van ionisatie en andere vormen van elektrische lading (ionen, ESP, niet-thermisch plasma) op inactivatie van micro-organismen wordt weergegeven.

Tabel 6. Overzicht van studies waarbij de effectiviteit van ionisatie wordt onderzocht.

Ionisatie	Bemonstering		Effectiviteit (%)	
Hagbom et al., 2015 ³⁸	Oppervlak	Negatieve ionen	Rotavirus >98,4; Capsicum Chlorosis Virus >97,4 infectivity reduction	virus
Hyun, Lee and Hwang, 2017 ³⁹	Oppervlak	filter met unipolair en bipolair ionisator	Filter + ionisatie 63,5 (0,3 m/s luchtsnelheid); 54,1 (0,5 m/s); 36,9 (1,0 m/s)	virus
Xu et al, 2013 ⁴⁰	Oppervlak	ESP	<i>E.coli</i> 31; Gist 5 (1 kV/cm) <i>E.coli</i> 79; Gist 71 (7,5 kV/cm)	Bacterie/ sporen

Daar waar conventionele filters (o.a. HEPA) het nadeel hebben van een hoge drukverschillen, onderhoudsfrequentie en de potentiële verontreiniging van micro-organismen kunnen ESPs de luchtkwaliteit verbeteren zonder deze nadelen. In ziekenhuisomgevingen worden ESPs niet aangeraden, dit omdat virussen niet worden gefilterd door hun beperkte grootte.¹⁰ Een kanttekening kan gemaakt worden dat virusdeeltjes veel voorkomen op grotere deeltjes of in druppeltjes. Het gebruik van een elektrostatisch filter zou, volgens de studie van Liu et al. een efficiëntie van 82%-94% leveren voor deeltjes (o.a. stof en pollen 0,01–100 µm), voor bacteriën (0.2–10 µm) is het gebruik van een ESP slechts partieel effectief en voor virussen is het toepassen van ESP niet tot nauwelijks effectief (0.01–0.3 µm) tenzij het spanningsveld wordt verhoogd met een factor 7,5.^{3,40}

Koud plasma is met name toegepast voor desinfectie van oppervlakken. Onderzoek naar de toepassing van koud plasma als luchtfiltratie is in opkomst. Voor deze technologie zijn de investeringskosten en het energieverbruik hoog hetgeen als obstakel voor toepassing wordt aangegeven.¹⁰

Ionisatie tast de celstructuur van een micro-organisme dusdanig aan dat inactivatie van bacteriën kan optreden.⁴¹ Voor virusdeeltjes is het gebruik van een bipolaire ionisator effectiever dan in vergelijking met unipolaire ionisatoren.⁴² Het toepassen van ionisatie om druppeltransmissie te reduceren lijkt veelbelovend voor het Influenza A virus.³⁸ Reductie van bacteriën in een ventilatiekanaal is mogelijk door ionisatie toe te passen.⁴³

3.5.2.1 *Restproducten*

Ionisatoren kunnen bijdragen aan een vermindering van de luchtkwaliteit. Door de productie van ozon als bijproduct, maar ook door de vorming van gassen (o.a. stikstofdioxide) en ultrafijne deeltjes die ontstaan door chemische reactie met ozon. De productie van deze bijproducten doet de filtering van verontreinigingen teniet,^{13,44,45} mits er al een reductie in verontreinigingen plaatsvindt⁴⁶.

De continue toevoeging van unipolaire ionen in een gesloten omgeving kan leiden tot een opeenhoping van elektrische lading op isolerende oppervlakken. Dit heeft tot gevolg dat er statische ontladingsproblemen veroorzaakt kunnen worden, met name bij een laag luchtvochtigheidsniveau.¹²

Het toepassen van ESP als luchtreiniging heeft als voordeel dat er slechts een kleine hoeveelheid ozon wordt geproduceerd. Bij gebruik van wisselspanning kan dit nog verder gereduceerd worden.³

Het testen van luchtreinigers blijft belangrijk om een goed beeld te krijgen van de geproduceerde restproducten en daarmee de effecten op de gezondheid.⁴⁵

3.5.2.2 *Effecten op de gezondheid*

Het gezondheidseffect van ionisatie op het cardiovasculair systeem, luchtwegsysteem en mentale gezondheid geven een mix aan positieve, negatieve en geen effecten. Zo wordt er een verscheidenheid aan pulmonale voor- en nadelen gerapporteerd na blootstelling aan negatief geladen luchtionen. De geraadpleegde literatuur trekt geen eenduidige conclusie aangaande een mogelijk gunstige rol van geïoniseerde lucht op pulmonale, respiratoire of metabolische aandoeningen.^{12,13,44,47–50}

Verhoogde negatieve ion concentraties zijn geassocieerd met een verhoging van een urinaire biomarker voor oxidatieve stress en negatieve verandering van de hartslag variabiliteit.^{51,52}

3.5.2.3 Praktijksituatie

Voor ioniserende luchtreinigingstechnologieën zijn slechts enkele van de geraadpleegde literatuur studies die praktijksituaties voorstellen (zie Tabel 7).

Tabel 7. Overzicht studies waarbij ionisatie in een praktijksituatie wordt toegepast.

	Locatie	Systeemnaam	Locatie systeem	Oppervlak/ Luchtbemonstering
Bergeron et al., 2007 ⁵³	Ziekenhuis (OK; pediatrische hematologie afdeling)	Plasmair; AirInSpace	Ruimte	Lucht
Meschke et al., 2009 ⁵⁴	Sanitair	Comtech Research Model IG-133A; MKS Ion Systems Model 6442	Ruimte	Oppervlak/ petrischaal
Xia et al., 2019 ⁵⁵	Veestal	Quantum Signal LLC NTP	Ruimte	Lucht
Fennelly et al., 2021 ⁵⁶	Ziekenhuis (beddenzaal)	Novaerus; NV800 (1), NV200 (4)	Ruimte	Lucht, Oppervlak/ petrischaal

In een ziekenhuis zijn op twee locaties, een operatiekamer en de pediatrische hematologie afdeling, mobiele luchtreinigers geplaatst. Het toepassen van een HEPA filter in de ruimte resulteerde in het reduceren van verontreinigingen ($>0,5 \mu\text{m}$) in de OK (118m^3) met 90% in 12 minuten. Het additionele toepassen van niet-thermische plasma reduceerde deze tijd met 10 minuten, ofwel, een reductie van 90% van de verontreinigingen ($>0,5 \mu\text{m}$) is binnen 2 minuten gerealiseerd. Voor de pediatrische omgeving (45m^3) werd een reductie van 75% voor opportunistische soorten micro-organismen en 82% reductie voor non-pathogene soorten micro-organismen gerealiseerd bij het toepassen van een mobiele unit gemeten over de testperiode van 12 dagen met 14 luchtverversingen per uur.⁵³ Ionisatie kan gebruik worden om oppervlaktelading (aantal micro-organismen op een oppervlak) te minimaliseren. Dit kan helpen om de kans op overdracht van ziekten die gemakkelijk via oppervlakken overdraagbaar zijn door de afzetting van bio-aerosolen te verminderen.⁵⁴ Onderzoek naar het effect van een niet-thermische plasma luchtreiniger op een lucht gedragen virus in een veestal liet zien dat met name de monsterafname zorgde voor resultaten die niet goed te duiden waren. Hoeveel reductie aan het gebruik van de luchtreiniger is toe te schrijven is niet duidelijk.⁵⁵

In een ziekenhuis beddenzaal is bestudeerd wat het effect van mobiele luchtreinigers gebaseerd op niet-thermische plasma is. Zowel bemonstering via lucht als oppervlak leverde geen significante verandering in het aantal kolonievormende eenheden bij het aanzetten van de luchtreiniger.⁵⁶

3.5.3 Effect van gecombineerde luchtreinigers op inactivatie micro-organismen

Tijdens dit literatuuronderzoek zijn een aantal studies gevonden waarbij een combinatie van filtratie, UV en ionisatie in een luchtreiniger is bestudeerd. Tabel 8 geeft een overzicht van de geïncorporeerde studies en haar resultaten.

Tabel 8. Overzicht van studies waarbij de effectiviteit van gecombineerde technologieën wordt onderzocht.

Studie	Bemonstering	Effectiviteit (%)
Baldelli et al., 2022 ⁵⁷	Lucht	Filter, UVC en ESP Inactivatie ratio ISO coarse >90% filter (88.69 ± 0.37), UVC (97.02 ± 1.06), ESP (89.48 ± 0.08), gehele systeem (98.96 ± 0.6) Bacterie, schimmel
Islam et al., 2021 ⁵⁸	Lucht, oppervlak	Filter, PCO Totaal aerobe bacteriën (84,86), <i>S. aureus</i> (82,22), en <i>E. coli</i> (100) Bacterie
Blondeau et al., 2021 ⁵⁹	Lucht	Filter, ESP, PCO, UVC ESP ~100 (<i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>A. brasiliensis</i>), PCO 100 (<i>S. epidermidis</i>)* Bacterie, schimmel
Burdack-Freitag et al., 2022 ⁴⁵	Lucht	UVC Plasma Phi-6 65-70 (incl. HEPA >99) Phi-6 50 (incl. HEPA >95) Bacteriofaag

*Note: special mention of single pass method.

Effectiviteit genoemd in studies naar een luchtreiniger met meerdere technologieën is complex te evalueren. Er wordt veelal geen onderscheid gemaakt tussen de bijdrage aan deze effectiviteit per technologie. Deze literatuurstudie heeft getracht juist de studies te includeren die wel dit inzicht bieden.

Baldelli et al. heeft de effectiviteit van een drietal technologieën op twee bacteriën en een schimmel onderzocht. Hierbij is in een laboratorium experiment aangetoond dat de combinatie van een fysiek filter met UVC voor bacteriën effectief is in de geteste situatie. De dosis UVC is soortafhankelijk waardoor dit in de praktijk voor een uitdaging kan zorgen. Deze studie toont aan dat enkel het filter of ESP toepassen niet voldoende is voor optimale microbiologische inactivatie niveaus. De productie van ozon lijkt een groter effect te hebben op de inactivatie van de onderzochte micro-organismen dan door de elektrostaticiteit van de ionen.⁵⁷

Blondeau et al. test meerdere luchtreinigerstechnologieën en de impact van een enkele technologie op de effectiviteit van het totaal te duiden. Deze studie laat zien dat voor een PCO systeem met name de UVC component impact heeft op de effectiviteit en de radicalen die worden geproduceerd minder van invloed zijn. Ook wordt een deel van de effectiviteit toegeschreven aan de mechanische filter.⁵⁹

Een praktijksituatie wordt beschreven in Islam et al. Een luchtreiniger is geïnstalleerd in een veestal. Voor twee bacteriën en deeltjes (2-10 µm) is gekeken wat de reductie was na het gebruiken van de luchtreiniger die met filtratie en PCO technologie was uitgerust. Deze studie bemonstert de lucht nabij de uitlaat. De resultaten zijn daarom representatief voor de lucht die door het

luchtreinigingssysteem gaat. Hoe dit systeem werkt indien er een emitterende bron in de ruimte is, en of de capaciteit voldoende is om op ruimteniveau alle lucht te behandelen is niet duidelijk beschreven.⁵⁸

Burdack-Freitag et al. heeft in een mock-up studie een zestal luchtreinigers getest. Drie gebaseerd op UVC technologie, en drie werkzaam met plasma. Bij elk van de technieken is een variant met een HEPA filter getest. Daar waar de reductie van een enkele technologie op 50% (UVC) en 65% (plasma) in resulteerde, steeg de reductie naar >99% en >95% respectievelijk met het plaatsen van een HEPA filter.⁴⁵

3.5.3.1 SARS-CoV-2

Gedurende de COVID-19 pandemie zijn er veel reviewstudies uitgevoerd gericht op het inactiveren van coronavirussen (in het specifiek SARS-CoV-2) door UVC en filters.^{8,60–62} De bevindingen van studies waarbij effectiviteit van UVC en filtratie op het SARS-CoV-2 virus wordt onderzocht worden in deze paragraaf toegelicht (Tabel 9).

Tabel 9. Overzicht van studies waarbij de effectiviteit op SARS-CoV-2 of surrogaat wordt onderzocht.

Studie	Bemonstering		Effectiviteit (%)	
(Cadnum <i>et al.</i> , 2020) ⁶³	Oppervlak	UVC	<i>MRSA</i> , <i>Phi 6</i> , <i>Phi X174</i> 99,9 (30 s); <i>Bacteriophage MS2</i> 99,9 (30 s)	Bacterie, Virus
(Inagaki <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁴	Oppervlak	UVC-LED	90 (1s); 99,9 (10, 20, 30, 60 s)	Virus
(Kitagawa <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁵	Oppervlak	UVC	99.7 (30 s)	Virus
(Ratnesar-Shumate <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁶	Oppervlak	Zonlicht	90% (6,8 min in speeksel)	Virus
(Rodriguez <i>et al.</i> , 2021) ⁶⁷	Oppervlak en lucht	HEPA	Op 1/5 ruimtes na geen SARS-CoV-2 in luchtmonsters	Virus

Phi6 is een surrogaat dat voor coronavirussen wordt gebruikt om het SARS-CoV-2 virus na te bootsen^{63,68} indien niet met het SARS-CoV-2 virus zelf getest kan worden^{64–66}. Om inactivatie van virusdeeltjes te realiseren is gebruik gemaakt van UV geproduceerd door de zon⁶⁸, kunstmatig zonlicht⁶⁶ of kunstmatig licht (UV-straling)^{63–65}.

Het effect van daglicht op het SARS-CoV-2 virus is onderzocht tijdens een zonnige dag en een nacht. Het virus is gedurende 24 uur op een petrischaal op een voetbalveld geplaatst. 90 minuten in zonlicht reduceert de overlevingskans tot 0 pfu/mL, hierbij is niet duidelijk in welke mate de buitenklimaatcondities nog invloed hebben gehad op de reductie.⁶⁸ Inactivatie van het SARS-CoV-2 virus door UVB (280-400nm – gesimuleerd zonlicht) is afhankelijk van de intensiteit van de lichtbron en de suspensievorm van het virus (speeksel, groeimedium). UVB kan een snelle inactivatie realiseren, echter zal het gesimuleerde zonlicht in een in-vitro studie andere eigenschappen hebben dan zonlicht in een (buiten)omgeving.⁶⁶

Het effect van blootstelling aan UVC, UV-LED (280±5 nm) en UVC (222 nm) op inactivatie van het SARS-CoV-2 virus bedraagt een 3Log reductie (de gebruikte dosis UVC is niet beschreven). Er wordt aangegeven dat er inactivatie plaatsvindt maar er wordt niet aangegeven hoe efficiënt de methode is.⁶⁴ Ook worden reducties

van 88,75% (10s) en 99,7% (30s) beschreven. Er wordt geen reductie in het aantal RNA kopieën SARS-CoV-2 geconstateerd, ook niet na 5 minuten blootstelling, dit omdat RNA niet aangetast wordt en vindbaar blijft.^{63–65}

De systematische literatuurstudie van Thornton et al. geeft aan dat de huidige state-of-the-art in onderzoek positief is als het gaat om UV straling in relatie tot elimineren van coronavirussen, echter, de UV gevoeligheid van het SARS-CoV-2 virus is in de literatuurstudie nog niet naar voren gekomen.⁶⁹ Dit wordt ook benoemd in de systematische literatuurstudie van Sellera et al., hierin wordt nogmaals benadrukt dat ondanks de voordelen van UVC op het reduceren en inactiveren van micro-organismen en virussen, de eventuele blootstelling aan UVC op de mens niet vergeten dient te worden.⁷⁰

Rodriguez et al. geeft een van de weinige studies omtrent het gebruik van luchtreinigers in de praktijk met SARS-CoV-2 patiënten. Tijdens deze studie is gekeken naar het effect van een mobiele HEPA filter luchtreiniger op SARS-CoV-2 RNA in de lucht en op oppervlakken. Deze studie is uitgevoerd in de huishoudens waar de patiënten in isolatie zaten. Een luchtmonster (1 m^3) is voor en na het gebruik van de luchtreiniger genomen en aan een PCR test onderworpen. Van de 5 locaties met een positieve patiënt is na het gebruik van de luchtreiniger op 4 van deze locaties geen SARS-CoV-2 meer in de lucht gedetecteerd.⁶⁷ De studie geeft echter geen informatie over de hoeveelheid infectieuze deeltjes die een patiënt emitteert, dit kan effect hebben op de resultaten en het duiden hiervan. Ook in de ruimtes waar een positieve patiënt verbleef maar geen luchtreiniger is gebruikt werd in de tweede sampling ronde geen SARS-CoV-2 gedetecteerd. Hoeveel van het effect toe te schrijven is aan de luchtreiniger is niet goed na te gaan.

4 Discussie

Er zijn veel studies beschikbaar die filtratie, UV of ionisatie als reinigingstechnologie bestuderen. Studies die filtratie beschouwen gaan merendeels over het filteren van bepaalde deeltjesgroottes. Het afdoden van micro-organismen door filtratie en met name het inactiveren van virussen komt weinig aan bod. Het overgrote deel van deze studies gericht op UV en ionisatie sluit af met de mededeling dat er nog meer onderzoek nodig is om de werking en effectiviteit van de luchtreinigingstechnologie voor een bepaald microbiologische verontreiniging te bepalen. Zo wordt er in een selectie overzichtsstudies aangegeven dat wetenschappelijke onderzoeken niet eenduidig zijn als het gaat om effectiviteit en dat er waarden worden gebruikt die afkomstig zijn van de fabrikanten³. Ook de relatie tussen effectiviteit van UVGI en gebrek aan bewijs als het gaat om preventie van gezondheidszorg gerelateerde infecties komt naar voren als kennishiaat. Dit wordt aangevuld met gebrek aan objectieve, reproduceerbare bewijs van praktijksituaties zoals effectiviteit van UVGI in luchtkanalen en upper room UVGI applicaties die sterk afhankelijk is van voldoende blootstelling. Dit is alleen mogelijk als voldoende luchtmenging is in een ruimte.²⁴

De meeste laboratoriumstudies worden uitgevoerd door het kweken van micro-organismen en die vervolgens blootstellen aan UVGI. Daarna wordt gekeken of UVGI het micro-organisme inactieveert en daarmee onschadelijk maakt. Dit experiment zegt iets over de gevoeligheid van micro-organismen voor UVGI. De andere variant aan laboratoriumstudies betreft het vernevelen van micro-organismen of inbrengen van deeltjes in een testruimte. De emissiebron wordt uitgezet en in de testruimte is vervolgens een luchtreinigingsapplicatie die aangezet wordt. De reiniging wordt gemeten door het afnamepercentage van micro-organismen of virussen als functie van de tijd te onderzoeken en geeft informatie over de filterende werking van een luchtreiniger. Informatie over de inactivatie-effectiviteit van micro-organismen door de luchtreiniger wordt niet gegeven. Het is niet ongebruikelijk dat laboratorium situaties geen goede weerspiegeling van de werkelijkheid zijn.⁴⁸ Recente is een trend te zien in het ontwikkelen van een meetmethodiek toepasbaar in een laboratoriumonderzoek die een praktijksituatie benaderd, denk hierbij aan continue dosering van micro-organismen en virussen en het meten van inactivering.^{71,72}

Veel van de laboratoriumstudies testen op hele specifieke micro-organismen (virus, bacterie of schimmel). Per micro-organisme gelden andere blootstellingsintensiteiten voor UV wat generieke conclusies onmogelijk maakt⁷. Ook zijn onderzochte bacteriën vaak als enkele cellen verneveld in demiwater ingezet. Dit maakt ze niet representatief voor een realistische situatie waar bijvoorbeeld speeksel als een beschermende laag werkt en de cellen minder gevoelig maakt voor UV straling.²⁴ Afgelopen jaren zijn al enkele studies uitgevoerd met deze beschermende laag om deze mee te nemen in de uitkomsten.^{68,73}

Onderzoeken naar het effect van bijproducten op de gezondheid van de mens van zowel UVGI systemen als ionisatie systemen zijn schaars.¹³ Dat er bijproducten gegenereerd worden is bekend en de mate waarin deze geproduceerd worden dient per systeem onderzocht te worden. In het algemeen is het te adviseren om luchtreinigers die gebaseerd zijn op UV en ionisatie eerst grondig op bijproducten te

testen. In een aantal Europese landen is dit gebruikelijk of zelfs wettelijk verplicht voordat deze in openbare ruimten toegepast mogen worden.

De effecten van langdurige blootstelling word in enkele studies benoemd.^{44,47,74} Met name ozon productie door luchtreinigers wordt onderzocht en als negatief beoordeeld als deze boven een bepaalde grenswaarde komt. Het effect van geladen deeltjes in een ruimte op de gezondheid van de mens en bij een langdurige blootstelling is beperkt onderzocht.^{12,44,51}

Wetenschappelijke studies in praktijksituaties zijn in aantal beperkt. Vaak wordt in deze studies gebruik gemaakt van *surface sampling*, oftewel, bemonstering van oppervlakken. Deze manier van testen kan conclusies genereren voor oppervlaktereiniging maar is niet eenduidig over luchtreiniging en inactivatie van microbiologische verontreinigingen.^{34,37,54,56} Studies die in situ zijn uitgevoerd leggen niet altijd de link naar daadwerkelijke reductie van microbiologische verontreinigingen, zo kan het voorkomen dat er alleen wordt gekeken naar de UVC dosis op een oppervlak³⁷ of wordt er alleen gekeken hoeveel depositie van verontreinigingen er plaatsvindt indien de spanning toeneemt van een ionisator.⁵⁴ Dit maakt dat veel studies de effectiviteit van de onderzochte luchtreiniger niet onderzoeken en kunnen hier geen eenduidige conclusies getrokken worden.

5 Conclusies

(HEPA) Filtratiesystemen hebben een genormeerde effectiviteit als het gaat om het afvangen en daarmee in de ruimte reduceren van deeltjes van een bepaalde grootte. Een virusdeeltje is veelal omgeven door vloeistof (speeksel) of hangt aan een groter deeltje vast waardoor het afvangen waarschijnlijker wordt. Uit de beschouwde literatuur is niet gevonden wat de effectiviteit van het inactiveren van virusdeeltjes is.

Er zijn veel laboratoriumstudies die onderzoeken of UVGI effect heeft op verscheidene micro-organismen onder verschillende omgevingscondities beschikbaar. Deze studies zijn echter niet representatief voor een praktijksituatie. Zo wordt er veelal geen emitterende bron gebruikt die onderzocht wordt als het gaat om inactivatie van microbiologische verontreinigingen. Studies die wel met vernevelde micro-organismen werken, bestuderen vaak de afname in een ruimte als functie van de tijd wat iets zegt over filtratie, maar niet over inactivatie van deze verontreinigingen. Ionisatie als luchtreiniging wordt veel onderzocht in relatie tot niet-pathogene deeltjes. Er is een beperkt aantal studies gevonden over effectiviteit van inactivatie van microbiologische verontreinigingen. Voor ionisatoren wordt veelal gekeken hoeveel er van een micro-organisme gefilterd wordt door de verzamelplaat te onderzoeken, dit zegt echter niks over inactivatie van microbiologische verontreinigingen. Met nieuwe onderzoekstechnieken kunnen hier momenteel wel uitspraken over worden gedaan, deze zijn in de beschouwde studies echter niet toegepast.

De hoeveelheid studies in praktijksituaties is beperkt en de studies die geraadpleegd zijn die conclusies trekken over effectiviteit van inactivatie van microbiologische verontreinigingen zijn nog beperkter in aantal. Op basis van de geraadpleegde literatuur kunnen daarom geen eenduidige conclusies getrokken worden voor de effectiviteit en mogelijke risico's bij praktijk toepassing van onderzochte luchtreinigingstechnologieën.

6 Ondertekening

Delft, 29 juni 2022

TNO

Ir. ing. M. Steins
Research Manager

Dr. ir. K. Kompatscher
Auteur

7 Bronnenlijst

1. Kujundzic E, Matakah F, Howard CJ, Hernandez M, Miller SL. UV air cleaners and upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for controlling airborne bacteria and fungal spores. *J Occup Environ Hyg*. 2006;3(10):536-546. doi:10.1080/15459620600909799
2. Reed NG. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Rep*. 2010;125(1):15-27. doi:10.1177/003335491012500105
3. Liu G, Xiao M, Zhang X, et al. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustain Cities Soc*. 2017;32(April):375-396. doi:10.1016/j.scs.2017.04.011
4. NEN Connect - ISO 16890. <https://connect.nen.nl/Family/Detail/48462?compId=10038&collectionId=0>. Accessed May 24, 2022.
5. ISO. 16890. 2017.
6. Medical Advisory Secretariat. *Air Cleaning Technologies: An Evidence-Based Analysis*. Vol 5.; 2005.
7. Brickner PW, Vincent RL, First M, Nardell E, Murray M, Kaufman W. The Application of Ultraviolet Germicidal Irradiation to Control Transmission of Airborne Disease: Bioterrorism Countermeasure. *Public Health Rep*. 2003;118(2):99-114. doi:10.1093/phr/118.2.99
8. Kowalski WJ, Petraitis V, Walsh TJ. *2020 COVID-19 Coronavirus Ultraviolet Susceptibility*.; 2020.
9. Green CF, Scarpino P V. The use of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) in disinfection of airborne bacteria. *Environ Eng Policy*. 2001;3(1):101-107. doi:10.1007/s100220100046
10. Brincat JP, Sardella D, Muscat A, et al. A review of the state-of-the-art in air filtration technologies as may be applied to cold storage warehouses. *Trends Food Sci Technol*. 2016;50:175-185. doi:10.1016/j.tifs.2016.01.015
11. Bolashikov ZD, Melikov AK. Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Build Environ*. 2009;44(7):1378-1385. doi:10.1016/j.buildenv.2008.09.001
12. Jiang SY, Ma A, Ramachandran S. Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement. *Int J Mol Sci*. 2018;19(10). doi:10.3390/ijms19102966
13. Cheek E, Guercio V, Shrubsole C, Dimitroulopoulou S. Portable air purification: review of impacts on indoor air quality and health. *Sci Total Environ*. 2020;142585. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142585
14. Yoo KH, Lee JS, Oh M Do. Charging and collection of submicron particles in two-stage parallel-plate electrostatic precipitators. *Aerosol Sci Technol*. 1997;27(3):308-323. doi:10.1080/02786829708965476
15. González-Martín J, Kraakman NJR, Pérez C, Lebrero R, Muñoz R. A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere*. 2021;262. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128376
16. Masotti F, Cattaneo S, Stuknytė M, De Noni I. Airborne contamination in the food industry: An update on monitoring and disinfection techniques of air. *Trends Food Sci Technol*. 2019;90(December 2018):147-156. doi:10.1016/j.tifs.2019.06.006
17. Liu C, Xie X, Zhao W, et al. Conducting nanosponge electroporation for affordable and high-efficiency disinfection of bacteria and viruses in water. *Nano Lett*. 2013;13(9):4288-4293. doi:10.1021/nl402053z
18. Bedell K, Buchaklian A, Perlman S. Efficacy of an automated multi-emitter whole room UV-C disinfection system against Coronaviruses MHV and MERS-CoV. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 2017;37(5):598-599.

- doi:doi:10.1017/ice.2015.348
19. Jelden KC, Gibbs SG, Smith PW, et al. Ultraviolet (UV)-reflective paint with ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) improves decontamination of nosocomial bacteria on hospital room surfaces. *J Occup Environ Hyg*. 2017;14(6):456-460. doi:10.1080/15459624.2017.1296231
 20. Ko G, First MW, Burge HA. The characterization of upper-room ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airborne microorganisms. *Environ Health Perspect*. 2002;110(1):95-101. doi:10.1289/ehp.0211095
 21. Welch D, Buonanno M, Grilj V, et al. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Sci Rep*. 2018;8(1):1-7. doi:10.1038/s41598-018-21058-w
 22. Lin WE, Mubareka S, Guo Q, Steinhoff A, Scott JA, Savory E. Pulsed ultraviolet light decontamination of virus-laden airstreams. *Aerosol Sci Technol*. 2017;51(5):554-563. doi:10.1080/02786826.2017.1280128
 23. Mishra J, Mohan S. Review on UV germicidal irradiation disinfection in health care. *J Crit Rev*. 2020;7(10):1214-1218. doi:10.31838/jcr.07.10.239
 24. Memarzadeh F, Olmsted RN, Bartley JM. Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology. *Am J Infect Control*. 2010;38(5 SUPPL.):S13-S24. doi:10.1016/j.ajic.2010.04.208
 25. Narita K, Asano K, Naito K, et al. Ultraviolet C light with wavelength of 222 nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens. *J Hosp Infect*. 2020;105(3):459-467. doi:10.1016/j.jhin.2020.03.030
 26. Tseng CC, Li CS. Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Sci Technol*. 2005;39(12):1136-1142. doi:10.1080/02786820500428575
 27. Walker CM, Ko G. Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environ Sci Technol*. 2007;41(15):5460-5465. doi:10.1021/es070056u
 28. McDevitt JJ, Rudnick SN, Radonovich LJ. Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light. *Appl Environ Microbiol*. 2012;78(6):1666-1669. doi:10.1128/AEM.06960-11
 29. Su C, Lau J. Review of air cleaning technologies in ventilation system for bio-aerosols. *12th Int Conf Indoor Air Qual Clim 2011*. 2011;2(June 2011):1168-1173.
 30. Zhang Y, Mo J, Li Y, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmos Environ*. 2011;45(26):4329-4343. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.041
 31. Claus H. Ozone Generation by Ultraviolet Lamps†. *Photochem Photobiol*. 2021;97(3):471-476. doi:10.1111/php.13391
 32. Sliney DH, Stuck BE. A Need to Revise Human Exposure Limits for Ultraviolet UV-C Radiation†. *Photochem Photobiol*. 2021;97(3):485-492. doi:10.1111/php.13402
 33. Miller SL, Linnes J, Luongo J. Ultraviolet germicidal irradiation: Future directions for air disinfection and building applications. *Photochem Photobiol*. 2013;89(4):777-781. doi:10.1111/php.12080
 34. Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: Double-blind multiple crossover trial. *Lancet*. 2003;362(9398):1785-1791. doi:10.1016/S0140-6736(03)14897-0
 35. Su C, Lau J, Gibbs SG. Student absenteeism and the comparisons of two sampling procedures for culturable bioaerosol measurement in classrooms with and without upper room ultraviolet germicidal irradiation devices. *Indoor Built Environ*. 2014;25(3):551-562. doi:10.1177/1420326X14562257
 36. Hofbauer WK, Baßler M. Efficiency of UVC radiation as an air disinfectant in a real environment. In: *Indoor Air*. ; 2022.
 37. Lindblad M, Tano E, Lindahl C, Huss F. Ultraviolet-C decontamination of a

- hospital room: Amount of UV light needed. *Burns*. 2020;46(4):842-849. doi:10.1016/j.burns.2019.10.004
38. Hagbom M, Nordgren J, Nybom R, Hedlund KO, Wigzell H, Svensson L. Ionizing air affects influenza virus infectivity and prevents airborne-transmission. *Sci Rep*. 2015;5:1-10. doi:10.1038/srep11431
 39. Hyun J, Lee SG, Hwang J. Application of corona discharge-generated air ions for filtration of aerosolized virus and inactivation of filtered virus. *J Aerosol Sci*. 2017;107(August 2016):31-40. doi:10.1016/j.jaerosci.2017.02.004
 40. Xu Y, Zheng C, Liu Z, Yan K. Electrostatic precipitation of airborne bio-aerosols. *J Electrostat*. 2013;71(3):204-207. doi:10.1016/j.elstat.2012.11.029
 41. Kim YS, Yoon KY, Park JH, Hwang J. Application of air ions for bacterial de-colonization in air filters contaminated by aerosolized bacteria. *Sci Total Environ*. 2011;409(4):748-755. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.11.012
 42. Hyun J, Lee S-G, Hwang J. Application of corona discharge-generated air ions for filtration of aerosolized virus and inactivation.pdf. *J Aerosol Sci*. 2017;107:31-40.
 43. Zhou P, Yang Y, Huang G, Lai ACK. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. *Build Environ*. 2018;127(October 2017):204-210. doi:10.1016/j.buildenv.2017.11.006
 44. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. *Ionisatoren En Gezondheid*.; 2010.
 45. Burdack-Freitag A, Buschhaus M, Nagele-renzl A, et al. Release of undesired by-products during the operation of virus inactivating air cleaning devices. In: *Indoor Air*. ; 2022.
 46. Zeng Y, Manwatkar P, Laguerre A, et al. Evaluating a commercially available in-duct bipolar ionization device for pollutant removal and potential byproduct formation. *Build Environ*. 2021;195. doi:10.1016/J.BUILDENV.2021.107750
 47. Blackhall K, Appleton S, Cates CJ. Ionisers for chronic asthma. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012;(9). doi:10.1002/14651858.CD002986.pub2
 48. Alexander DD, Bailey WH, Perez V, Mitchell ME, Su S. Air ions and respiratory function outcomes: A comprehensive review. *J Negat Results Biomed*. 2013;12(1):1. doi:10.1186/1477-5751-12-14
 49. Liu S, Huang Q, Wu Y, et al. Metabolic linkages between indoor negative air ions, particulate matter and cardiorespiratory function: A randomized, double-blind crossover study among children. *Environ Int*. 2020;138(March):105663. doi:10.1016/j.envint.2020.105663
 50. World Health Organization. Ultraviolet Radiation As a Hazard in the Workplace. *World Heal Organ*. 2003. http://www.who.int/uv/publications/en/occupational_risk.pdf.
 51. Liu W, Huang J, Lin Y, et al. Negative ions offset cardiorespiratory benefits of PM2.5 reduction from residential use of negative ion air purifiers. *Indoor Air*. 2021;31(1):220-228. doi:10.1111/ina.12728
 52. Dong W, Liu S, Mengtian C, et al. Different cardiorespiratory effects of indoor air pollution intervention.pdf. *Environ Pollution*. 2019;254.
 53. Bergeron V, Reboux G, Poirot JL, Laudinet N. Decreasing Airborne Contamination Levels in High-Risk Hospital Areas Using a Novel Mobile Air-Treatment Unit. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 2007;28(10):1181-1186. doi:10.1086/520733
 54. Meschke S, Smith BD, Yost M, et al. The effect of surface charge, negative and bipolar ionization on the deposition of airborne bacteria. *J Appl Microbiol*. 2009;106(4):1133-1139. doi:10.1111/j.1365-2672.2008.04078.x
 55. Xia T, Lin Z, Lee EM, Melotti K, Rohde M, Clack HL. Field Operations of a Pilot Scale Packed-bed Non-thermal Plasma (NTP) Reactor Installed at a

- Pig Barn on a Michigan Farm to Inactivate Airborne Viruses. *2019 IEEE Ind Appl Soc Annu Meet IAS 2019*. 2019:7-10. doi:10.1109/IAS.2019.8912457
56. Fennelly M, O'Connor DJ, Hellebust S, et al. Effectiveness of a plasma treatment device on microbial air quality in a hospital ward, monitored by culture. *J Hosp Infect*. 2021;108:109-112. doi:10.1016/J.JHIN.2020.11.006
 57. Baldelli G, Aliano MP, Amagliani G, et al. Airborne Microorganism Inactivation by a UV-C LED and Ionizer-Based Continuous Sanitization Air (CSA) System in Train Environments. *Int J Environ Res Public Heal* 2022, Vol 19, Page 1559. 2022;19(3):1559. doi:10.3390/IJERPH19031559
 58. Islam MA, Ikeguchi A, Naide T. Effectiveness of an air cleaner device in reducing aerosol numbers and airborne bacteria from an enclosed type dairy barn. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2022. doi:10.1007/S11356-022-19514-2
 59. Blondeau P, Abadie MO, Durand A, et al. Experimental characterization of the removal efficiency and energy effectiveness of central air cleaners. *Energy Built Environ*. 2021;2(1):1-12. doi:10.1016/J.ENBENV.2020.05.004
 60. Elsaid AM, Mohamed HA, Abdelaziz GB, Ahmed MS. A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic. *Process Saf Environ Prot Trans Inst Chem Eng Part B*. 2021;155:230-261. doi:10.1016/J.PSEP.2021.09.021
 61. Dai R, Liu S, Li Q, Wu H, Wu L, Ji C. A systematic review and meta-analysis of indoor bioaerosols in hospitals: The influence of heating, ventilation, and air conditioning. *PLoS One*. 2021;16(12 December). doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0259996
 62. Heßling M, Hönes K, Vatter P, Lingenfelder C. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies Ultraviolette Bestrahlungsdosen für die Inaktivierung von Coronaviren. *GMS Hyg Infect Control*. 2020;15:1-8. <https://www.egms.de/static/en/journals/dgkh/2020-15/dgkh000343.shtml>.
 63. Cadnum JL, Li DF, Jones LD, et al. Evaluation of ultraviolet-c light for rapid decontamination of airport security bins in the era of SARS-COV-2. *Pathog Immun*. 2020;5(1):133-142. doi:10.20411/pai.v5i1.373
 64. Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, Okabayashi T, Fujimoto S. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with Deep-UV LED irradiation. *Emerg Microbes Infect*. 2020:1-8. doi:10.1080/22221751.2020.1796529
 65. Kitagawa H, Nomura T, Nazmul T, et al. Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination. *Am J Infect Control*. 2020;000:17-19. doi:10.1016/j.ajic.2020.08.022
 66. Rathesar-Shumate S, Williams G, Green B, et al. Simulated Sunlight Rapidly Inactivates SARS-CoV-2 on Surfaces. *J Infect Dis*. 2020;222(2):214-222. doi:10.1093/infdis/jiaa274
 67. Rodríguez M, Palop ML, Seseña S, Rodríguez A. Are the Portable Air Cleaners (PAC) really effective to terminate airborne SARS-CoV-2? *Sci Total Environ*. 2021;785. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2021.147300
 68. Fedorenko A, Orevi T, Kashtan N. Coronavirus and Football (Soccer): Why mid-day matches are much safer for players. 2020;(July):13-16. doi:10.20944/preprints202007.0012.v1
 69. Thornton GM, Fleck BA, Fleck N, et al. The impact of heating, ventilation, and air conditioning design features on the transmission of viruses, including the 2019 novel coronavirus: A systematic review of ultraviolet radiation. Mukherjee A, ed. *PLoS One*. 2022;17(4):e0266487. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0266487
 70. Sellera FP, Sabino CP, Cabral F V, Ribeiro MS. A systematic scoping review of ultraviolet C (UVC) light systems for SARS-CoV-2 inactivation. *J Photochem Photobiol*. 2021;8:100068. doi:10.1016/j.jpap.2021.100068
 71. Schmohl A, Nagele-renz AM, Buschhaus M, et al. Determination of CADR of virus-inactivating air purifiers by surrogate virus plaque assay. 2016.

72. Liu Z, Parry-nweye E, Dhaouadi Y, et al. A Comprehensive Approach to Testing Air Cleaning Devices Under Realistic Room Conditions. 2020.
73. Baldelli G, Aliano MP, Amagliani G, et al. Airborne Microorganism Inactivation by a UV-C LED and Ionizer-Based Continuous Sanitation Air (CSA) System in Train Environments. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(3). doi:10.3390/IJERPH19031559
74. Siegel JA. Primary and secondary consequences of indoor air cleaners. *Indoor Air*. 2016;26(1):88-96. doi:10.1111/ina.12194
75. Berry G, Parsons A, Morgan M, Rickert J, Cho H. A review of methods to reduce the probability of the airborne spread of COVID-19 in ventilation systems and enclosed spaces. *Environ Res*. 2022;203. doi:10.1016/J.ENVRES.2021.111765
76. Luo H, Zhong L. Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors. *Build Environ*. 2021;197. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107852
77. Bono N, Ponti F, Punta C, Candiani G. Effect of UV irradiation and TiO₂-photocatalysis on airborne bacteria and viruses: An overview. *Materials (Basel)*. 2021;14(5):1-20. doi:10.3390/MA14051075
78. Liu DT, Phillips KM, Speth MM, Besser G, Mueller CA, Sedaghat AR. Portable HEPA Purifiers to Eliminate Airborne SARS-CoV-2: A Systematic Review. *Otolaryngol - Head Neck Surg (United States)*. 2022;166(4):615-622. doi:10.1177/01945998211022636
79. Yang H, Hu J, Li P, Zhang C. Ultraviolet germicidal irradiation for filtering facepiece respirators disinfection to facilitate reuse during COVID-19 pandemic: A review. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. 2020;31(August):101943. doi:10.1016/j.pdpdt.2020.101943
80. García De Abajo FJ, Hernández RJ, Kaminer I, Meyerhans A, Rosell-Llompart J, Sanchez-Elsner T. Back to Normal: An Old Physics Route to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. *ACS Nano*. 2020;14(7):7704-7713. doi:10.1021/acsnano.0c04596
81. Heilingloh CS, Aufderhorst UW, Schipper L, et al. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation. *Am J Infect Control*. 2020;48(10):1273-1275. doi:10.1016/j.ajic.2020.07.031
82. Daniels SL. On the ionization of air for removal of noxious effluvia (air ionization of indoor environments for control of volatile and particulate contaminants with nonthermal plasmas generated by dielectric-barrier discharge). *IEEE Trans Plasma Sci*. 2002;30(4 I):1471-1481. doi:10.1109/TPS.2002.804211
83. Zuraimi MS, Nilsson GJ, Magee RJ. Removing indoor particles using portable air cleaners: Implications for residential infection transmission. *Build Environ*. 2011;46(12):2512-2519. doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.008
84. Miller SL, Linnes J, Luongo J. Ultraviolet germicidal irradiation: Future directions for air disinfection and building applications. *Photochem Photobiol*. 2013;89(4):777-781. doi:10.1111/php.12080
85. De Robles D, Kramer SW. Improving Indoor Air Quality through the Use of Ultraviolet Technology in Commercial Buildings. *Procedia Eng*. 2017;196(June):888-894. doi:10.1016/j.proeng.2017.08.021
86. Kanaan M, Ghaddar N, Ghali K. Localized air-conditioning with upper-room UVGI to reduce airborne bacteria cross-infection. *Build Simul*. 2016;9(1):63-74. doi:10.1007/s12273-015-0250-7
87. Lau J, Bahnfleth W, Freihaut J. Estimating the effects of ambient conditions on the performance of UVGI air cleaners. *Build Environ*. 2009;44(7):1362-1370. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.015
88. Lee B, Bahneth WP. Effects of installation location on performance and economics of in-duct ultraviolet germicidal irradiation systems for air disinfection. *Build Environ*. 2013;67:193-201.

doi:10.1016/j.buildenv.2013.05.019

A Onderzoeksopzet

Tabel 10. Overzicht van gevonden (wetenschappelijke) publicaties verdeeld naar onderzoeksopzet.

		Literature review			Experimental research			Grey literature
Author		Systematic review	Not systematic	Laboratory	Experiment	Double blind crossover study	Modeling	
REVIEWS	(Zhang <i>et al.</i> , 2011) ³⁰	x						
	(Su and Lau, 2011) ²⁹	x*						
	(Alexander <i>et al.</i> , 2013) ⁴⁸	x						
	(Bolashikov and Melikov, 2009) ¹¹		x					
	(Brincat <i>et al.</i> , 2016) ¹⁰		x					
	(González-Martín <i>et al.</i> , 2021) ¹⁵		x					
	(Liu <i>et al.</i> , 2017) ³		x					
	(Masotti <i>et al.</i> , 2019) ¹⁶		x					
	(Memarzadeh, Olmsted and Bartley, 2010) ²⁴		x					
	(Reed, 2010) ²		x					
	(Berry <i>et al.</i> , 2022) ⁷⁵		x					
	(Luo and Zhong, 2021) ⁷⁶		x					
	(Thornton <i>et al.</i> , 2022) ⁶⁹	x						
	(Bono <i>et al.</i> , 2021) ⁷⁷		x					
	(Sellera <i>et al.</i> , 2021) ⁷⁰	x						

	Literature review			Experimental research			Grey literature
	Systematic review	Not systematic		Experiment	Double blind crossover study		
	(Liu et al., 2022) ⁷⁸	x					
SARS-CoV-2	(Yang <i>et al.</i> , 2020) ⁷⁹	x					
	(García De Abajo <i>et al.</i> , 2020) ⁸⁰	x					
	(Cadnum <i>et al.</i> , 2020) ⁶³		x				
	(Fedorenko, Orevi and Kashtan, 2020) ⁶⁸		x				
	(Heilingloh <i>et al.</i> , 2020) ⁸¹		x				
	(Inagaki <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁴		x				
	(Kitagawa <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁵		x				
	(Ratnesar-Shumate <i>et al.</i> , 2020) ⁶⁶		x				
	(Kowalski, 2020) ⁸	x					
	(Elsaid and Ahmed, 2021)	x					
	(Dai et al., 2021)	x					
	(Rodriguez et al., 2021)			x			
LUCHT-REINIGING	(Daniels, 2002) ⁸²	x					
	(Meschke <i>et al.</i> , 2009) ⁵⁴			x			
	(Bergeron <i>et al.</i> , 2007) ⁵³			x			

	Literature review			Experimental research			Grey literature
Author	Systematic review	Not systematic	Laboratory	Experiment	Double blind crossover study	Modeling	
(Zhou <i>et al.</i> , 2018) ⁴³			X			X	
(Zuraimi, Nilsson and Magee, 2011) ⁸³			X			X	
(Hagbom <i>et al.</i> , 2015) ³⁸			X				
(Hyun, S.-G. Lee and Hwang, 2017) ³⁹			X				
(Kim <i>et al.</i> , 2011) ⁴¹			X				
(Miller, Linnes and Luongo, 2013) ⁸⁴		X					
(De Robles and Kramer, 2017) ⁸⁵				X			
(Lindblad <i>et al.</i> , 2020) ³⁷				X			
(Kanaan, Ghaddar and Ghali, 2016) ⁸⁶			X			X	
(Lau, Bahnfleth and Freihaut, 2009) ⁸⁷			X			X	
(Brickner <i>et al.</i> , 2003) ⁷		X	X				
(Bedell, Buchaklian and Perlman, 2017) ¹⁸			X				
(Green and Scarpino, 2001) ⁹			X				
(Jelden <i>et al.</i> , 2017) ¹⁹ Je			X				
(Kujundzic <i>et al.</i> , 2006) ¹			X				
(Lin <i>et al.</i> , 2017) ²²			X				
(McDevitt, Rudnick and Radonovich, 2012) ²⁸			X				
(Mishra and Mohan, 2020) ²³			X				
(Narita <i>et al.</i> , 2020) ²⁵			X				

	Literature review			Experimental research			Grey literature
	Systematic review	Not systematic		Experiment	Double blind crossover study		
			X				
			X				
			X				
			X				
			X	X			
			X				
				X			
				X			
				X			
			X				
				X			
			X				
HEALTH						X	
						X	
	X						
	X						
	X						

	Literature review			Experimental research			Grey literature
Author	Systematic review	Not systematic	Laboratory	Experiment	Double blind crossover study	Modeling	
(Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2010) ⁴⁴	x						x
(World Health Organization, 2003) ⁵⁰							x

*methode niet uitgebreid omschreven, claimt om een systematische review te gaan.

B Stralingsblootstelling organismen

Tabel 11. Stralingsblootstelling H bij 253,7 nm, nodig om kolonievorming in 90% (LD90) van organismen te remmen (10% overleving). Tabel overgenomen van ⁷.

Microorganism	(H) Radiant exposure $J \cdot m^{-2}$	(K) Decay rate constant $m^2 \cdot J^{-1}$	Reference	Type	Test medium
<i>Bacillus anthracis</i>	45.2	0.051	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
<i>Bacillus anthracis</i> (spores)		0.0031	Knudson 1986 ³⁶	Bacteria	Plates
<i>S. enteritidis</i>	40.0	0.058	Dreyer et al. 1936 ⁷¹	Bacteria	Plates
<i>B. megatherium</i> sp. (veg.)	37.5*	0.061	Hercik 1937 ⁷²	Bacteria	Plates
<i>B. megatherium</i> sp. (spores)	28.0	0.082	Hercik 1937 ⁷²	Bacteria	Plates
<i>B. paratyphosus</i>	32.0	0.072	Dreyer et al. 1936 ⁷¹	Bacteria	Plates
<i>B. subtilis</i> (mixed)	71.0	0.032	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
	60.0	0.038	Koller 1939 ⁷⁴	Bacteria	Air
<i>B. subtilis</i> spores	120.0	0.019	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	34.0	0.068	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
		0.0701	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
<i>Salmonella typhi</i> (<i>Eberthella typhosa</i>)	21.4	0.108	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
<i>Micrococcus candidus</i>	60.5	0.038	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	Plates
<i>Micrococcus piltonensis</i>	81.0	0.028	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Micrococcus sphaeroides</i>	100.0	0.023	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Neisseria catarrhalis</i>	44.0	0.052	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Agrobacterium tumefaciens</i> (<i>Phytopomonas tumefaciens</i>)	44.0	0.052	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Proteus vulgaris</i>	27.0	0.085	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		0.2375	Collins 1971 ⁷⁷	Bacteria	Plates
		0.5721	Sharp 1940 ⁷⁸	Bacteria	Air
	55.0	0.042	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	Plates
<i>B. pyocyaneus</i>	55.0	0.052	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	Plates
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	35.0	0.066	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	Plates
<i>S. typhimurium</i>	80.0	0.029	Dreyer et al. 1936 ⁷¹	Bacteria	Plates
<i>Micrococcus luteus</i> (<i>Sarcina lutea</i>)	197.0	0.012	Rentschler et al. 1941 ⁷⁶	Bacteria	Air
<i>Serratia marcescens</i>	24.2	0.095	Rentschler et al. 1941 ⁷⁶	Bacteria	Air
	22.0	0.105	Sharp 1938 ⁶²	Bacteria	Air
	8.3	0.277	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	
		0.2208	Collins 1971 ⁷⁷	Bacteria	Plates
		0.214	Riley 1976 ⁷⁹	Bacteria	Air
		0.4449	Sharp 1940 ⁷⁸	Bacteria	Air
<i>Dysentery bacilli</i>	22.0	0.105	Dreyer et al. ⁷¹	Bacteria	Plates
<i>Shigella paradysenteriae</i>	16.8	0.137	Sharp 1938 ⁷⁶	Bacteria	Air
<i>Rhodospirillum rubrum</i> (<i>Spirillum rubrum</i>)	44.0	0.052	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Staphylococcus albus</i>	18.4	0.125	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
	33.0	0.070	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
	18.4	0.125	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air

Tabel gaat verder op volgende pagina.

Microorganism	(H) Radiant Exposure $J \cdot m^{-2}$	(K) Decay Rate Constant $m^2 \cdot J^{-1}$	Reference	Type	Test Medium
<i>Staphylococcus aureus</i>	21.8	0.106	Gates 1929/1930 ⁸⁰	Bacteria	Plates
	49.5	0.047	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	
		0.0886	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
		0.3476	Sharp 1940 ⁷⁸	Bacteria	Air
		0.0419	Abshire 1981 ⁸¹	Bacteria	Plates
<i>Streptococcus pyogenes</i> (<i>Streptococcus hemolyticus</i>)		0.9602	Luckiesh 1946 ¹⁵	Bacteria	Air
	26.0	0.089	Sharp 1938/39 ^{70,75}	Bacteria	Air/Plate
	21.6	0.107	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
		0.6161	Lidwell 1950 ⁸²	Bacteria	Plates
		0.1066	Misterlich 1984 ⁸³	Bacteria	Air
<i>Streptococcus lactis</i>	61.5	0.037	Rentschler et al. 1941 ⁷³	Bacteria	Air
<i>Streptococcus viridans</i>	20.0	0.115	Sharp 1938 ⁷⁰	Bacteria	Air
<i>Clostridium tetani</i>	49.0	0.047	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
<i>Streptococcus salivarius</i>	20.0	0.115	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
<i>Streptococcus albus</i>	18.4	0.125	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
<i>B. prodigiosus</i>	8.3	0.329	Ehrismann et al. 1932 ⁷⁶	Bacteria	Plates
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>		0.0987	David 1973 ⁸⁴	Bacteria	Plates
		0.4721	Riley 1976 ⁸³	Bacteria	Air
		0.2132	Collins 1971 ⁷⁷	Bacteria	Plates
		0.023	Prospect Philips ⁸⁵	Bacteria	Plates
(Tubercle bacillus)	100.0				
<i>Mycobacterium kansasii</i>		0.0364	David 1973 ⁸³	Bacteria	Air
<i>Mycobacterium avium-intra.</i>		0.0406	David 1973 ⁸⁴	Bacteria	Air
<i>Escherichia coli</i>		0.0927	Sharp 1939 ⁷⁵	Bacteria	Plates
		0.3759	Sharp 1940 ⁷⁹	Bacteria	Air
<i>Haemophilus influenzae</i>		0.0599	Mongold 1992 ⁸⁶	Bacteria	Plates
<i>Adenovirus</i>		0.0546	Jensen 1964 ³⁴	Virus	Air
		0.0047	Rainbow 1973 ⁸⁷	Virus	Plates
<i>Vaccinia</i>		0.1528	Jensen 1964 ³⁴	Virus	Air
		0.1542	Galasso 1965 ⁸⁸	Virus	Plates
<i>Coxsackievirus</i>		0.1108	Jensen 1964 ³⁴	Virus	Air
<i>Influenza A</i>		0.1187	Jensen 1964 ³⁴	Virus	Air
<i>Cryptococcus neoformans</i>		0.0102	Wang 1994 ⁸⁹	Fungal spores	Plates
<i>Fusarium oxysporum</i>		0.0112	Asthana 1992 ⁹⁰	Fungal spores	Plates
<i>Fusarium solani</i>		0.00706	Asthana 1992 ⁹⁰	Fungal spores	Plates
<i>Penicillium italicum</i>		0.01259	Asthana 1992 ⁹⁰	Fungal spores	Plates
<i>Penicillium digitatum</i>		0.00718	Asthana 1992 ⁹⁰	Fungal spores	Plates
<i>Rhizopus nigricans</i> spores		0.00861	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air
<i>Cladosporium herbarum</i>		0.00370	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>		0.00344	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air
<i>Mucor mucedo</i>		0.00399	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air
<i>Penicillium chrysogenum</i>		0.00434	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air
<i>Aspergillus amstelodami</i>		0.00344	Luckiesh 1946 ¹⁵	Fungal spores	Air