

Animal Sciences Group

Kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 155

Ionisatie voor reductie fijnstofemissie uit pluimveestallen. Fase I: Inventarisatie

Oktober 2008



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Animal Sciences Group van Wageningen UR
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail Info.veehouderij.ASG@wur.nl
Internet <http://www.asg.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Aansprakelijkheid

Animal Sciences Group aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Liability

Animal Sciences Group does not accept any liability for damages, if any, arising from the use of the results of this study or the application of the recommendations.

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Abstract

The objective of this first phase of the ionization research was to study whether ionization is a suitable method for reducing fine dust emissions from poultry houses.

Keywords: fine dust, emission, poultry, ionisation

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs: G.J. Kasper, F.E. de Buisonjé, A.J.A. Aarnink

Titel: Ionisatie voor reductie fijnstofemissie uit pluimveestallen. Fase I: Inventarisatie Rapport 155

Samenvatting

Het doel van deze eerste fase van het ionisatieonderzoek was te onderzoeken of ionisatie een geschikt instrument is om de fijnstofemissie uit pluimveestallen te reduceren.

Trefwoorden: fijnstof, emissie, pluimvee, ionisatie



Rapport 155

Ionisatie voor reductie fijnstofemissie uit pluimveestallen. Fase I: Inventarisatie

Ionization for reducing fine dust emission from poultry houses. Phase I: Inventory

G.J. Kasper

F.E. de Buissonjé

A.J.A. Aarnink

Oktober 2008

Samenvatting

Om te kunnen voldoen aan de Europese normen voor fijnstof moet de uitstoot van fijnstof uit pluimveestallen worden gereduceerd. Eén van de mogelijke oplossingsrichtingen is het gebruik van ionisatiesystemen. Ionisatiesystemen zorgen voor een positieve of negatieve lading van stofdeeltjes, waardoor deze aan tegengesteld geladen en gearde oppervlakken vastplakken. Het doel van deze eerste fase van het ionisatieonderzoek is te onderzoeken of ionisatie een geschikt instrument is om de fijnstofemissie uit pluimveestallen te reduceren. Bij alle luchtionisatiemethoden vindt steeds hetzelfde basisprincipe plaats: ze sturen elektronen tussen gasmoleculen. Wanneer een gasmolecuul een elektron verliest, wordt deze positief geladen. Het tegenovergestelde geldt ook: als een gasmolecuul een elektron opneemt dan is het molecuul negatief geladen, ofwel een negatief ion. Voor stallen lijken corona-ionisatoren het meeste perspectief te bieden. Corona-ionisatoren vormen sterke elektrische velden geïnitieerd door het toepassen van een hoog voltage. De velden monden uit in een scherp ionisatiepunt die elektronen uitstoten (negatief ionisatiesysteem) of juist ontvangen (positief ionisatiesysteem), afhankelijk van de lading van de ionisator. Op deze manier worden grote aantallen moleculen positief of negatief geladen. Deze geladen moleculen zorgen voor een positieve of negatieve lading van stofdeeltjes in de lucht. Deze stofdeeltjes worden vervolgens aangetrokken door tegengesteld geladen oppervlakken of gearde oppervlakken. Corona-ionisatoren kunnen de lucht op verschillende manieren ioniseren. Het belangrijkste verschil tussen deze methoden is de toepassing van een hoog voltage wisselstroom, gelijkstroom of stroompulsen voor het creëren van ionen. Uni-polaire gelijkstroom en pulserende ionisatiesystemen lijken het meest geschikt voor stallen, omdat deze de ionen over een grotere afstand kunnen verspreiden. Op dit moment wordt al een aantal ionisatiesystemen toegepast voor stofreductie. Er zijn verschillende ionengeneratoren en ionisatielampen op de markt die toegepast kunnen worden in werkomgevingen of binnenshuis. Op dit moment is slechts één systeem beschikbaar die vrij uitgebreid is getest in (pluimvee)stallen: het zogenaamde Electrostatic Particulate Ionization systeem ofwel EPI-systeem. Een systeem dat nog in ontwikkeling is, is de zogenaamde fijnstofmagneet. Dit systeem is in eerste instantie ontwikkeld voor stofreductie langs (snel)wegen, maar zou eventueel doorontwikkeld kunnen worden voor stallen. Het principe van dit systeem is vergelijkbaar met het EPI-systeem.

Uit deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het werkingsprincipe van ionisatiesystemen voor het verwijderen van stof uit de lucht is voldoende aangetoond. De effectiviteit voor stofreductie in stallen moet echter voor de meeste systemen nog worden aangetoond.
- Corona-ionisatie, waarbij positieve of negatieve ionen worden gevormd, is het belangrijkste principe voor (fijn)stofreductie in stallen.
- De meest toegepaste ionisatiesystemen zijn op dit moment alleen geschikt voor relatief schone en kleine ruimten, zoals voor werkomgevingen en voor binnenshuis.
- Voor stallen is op dit moment één systeem beschikbaar, waaraan al vrij veel onderzoek in praktijkstallen is gedaan: het EPI-systeem. De kosten van het EPI-systeem zijn, ten opzichte van alternatieve methoden voor (fijn)stof reductie, relatief laag. Voor de Nederlandse situatie zal de (fijn)stofreductie van het systeem in een vergelijkende proef moeten worden aangetoond. Neveneffecten van het systeem, zoals de reductie van ammoniak en micro-organismen, de vorming van ozon en de vorming van elektrostatische ladingen op oppervlakken, dienen meegenomen te worden in het onderzoek.
- Andere systemen, zoals ionisatielampen en ionengeneratoren voor kleinschalige toepassing, zullen opgeschaald moeten worden naar stalniveau en vervolgens moeten worden getest op effectiviteit en kosten.

Summary

To fulfill the requirements of the European standards on fine dust the emission of fine dust from poultry houses has to be reduced. One possible reduction method is the use of ionization systems. Ionization systems generate a positive or a negative charge of dust particles, causing the particles to be attracted to opposite charged or grounded surface areas. The objective of the first phase of the ionization study was to investigate whether ionization is a suitable principle to reduce fine dust emission from poultry houses. For all air ionization systems the working principle is the same: they send electrons between gas molecules. When a gas molecule loses an electron, it becomes positively charged (positive ion), while it becomes negatively charged when it receives an electron (negative ion). For animal houses corona ionization systems seems to be most suitable. Corona ionization systems form high electric fields by generating a high voltage. The electric fields finish in a sharp ionization point that emit electrons (negative ionization system) or that receive electrons (positive ionization system), depending on the charge of the ionization unit. In this way a large number of molecules become positively or negatively charged. These charged molecules cause dust particles to become positively or negatively charged. These dust particles are then attracted to opposite charged or grounded surface areas. Corona ionization systems can ionize the air in different ways: by high voltage alternating current, direct current, or pulse current. Uni-polar direct current and pulse current ionization systems seems most suitable for use in animal houses, because these systems can spread the ions over a larger distance. At this moment already some ionization systems are used for dust reduction. Different ion generators and ionization lamps are on the market for use in working environments or living environments. At the moment only one system is available for use in animal houses: the so-called Electrostatic Particulate Ionization system or EPI-system. This system has already been tested in different animal, especially poultry, houses. Under development is still the so-called fine dust magnet, that has been developed for use along roads, but might be altered for use in animal houses. The principle of this system is comparable with the EPI-system.

From this study the following can be concluded:

- The working principle of ionization systems for removal of dust from the air has been sufficiently proven. The effectiveness for use in animal houses, however, still needs to be proven for most of the ionization systems.
- Corona ionization, causing positively or negatively charged ions to be formed, is the main principle for (fine) dust reduction in animal houses.
- Most of the present available ionization systems are only suitable for relatively clean and small rooms, like working environments and living rooms.
- For animal houses one system is available at the moment that has already been tested quite extensively: the EPI-system. The costs of the EPI-system are relatively low, compared to other methods for (fine) dust reduction. For the Dutch situation the (fine) dust reduction of the system need to be proven in a comparative study. Side effects of the system, e.g. the reduction of ammonia and micro-organisms, the production of ozone and the formation of electrostatic charging of surfaces, should be considered in this study, as well.
- Other ionization systems, like ionization lamps and ion generators for small scale use, need to be scaled up to animal housing level and need to be tested for dust reduction effectiveness and for costs under the high contaminated environment of animal houses.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	Werkingsprincipe ionisatiesystemen	2
2.1	Werkingsprincipe.....	2
2.2	Wisselstroomionisatie	3
2.3	Gelijkstroomionisatie.....	3
2.4	Pulserende ionisatie.....	3
2.5	Factoren van invloed op stofreductie.....	3
2.6	Effect corona ionisatoren op gasvormige emissies en ziektekiemen.....	5
2.7	Effect corona ionisatoren op de gezondheid van mens en dier.....	5
3	Toepassing ionisatiesystemen	7
3.1	Ionisatiesystemen voor stallen	7
3.2	Ionisatiesystemen voor werkomgevingen en binnenshuis.....	8
3.3	Fijnstofmagneet voor afvang fijnstof in buitenlucht	8
4	Discussie	9
5	Conclusies	11
	Literatuur	12
	Bijlagen	14
	Bijlage 1 Definities van begrippen gebruikt in dit rapport.....	14

1 Inleiding

Om te kunnen voldoen aan de Europese normen voor fijnstofconcentraties in de buitenlucht dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de uitstoot van fijnstof uit belangrijke bronnen terugdringen. In dit kader is door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) verzocht een plan van aanpak uit te werken voor het ontwikkelen van praktijkrijpe bedrijfsoplossingen voor het terugdringen van de fijnstofemissie uit de pluimveehouderij. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat zoveel mogelijk effectieve en praktijkrijpe maatregelen vóór 2010 gereed dienen te zijn. Een van de mogelijke oplossingsrichtingen is het gebruik van ionisatiesystemen.

Uit de literatuur is bekend dat ionisatie van lucht potentie heeft om stofconcentraties belangrijk te reduceren (Bohgard and Eklund, 1998; Grabarczyk, 2001; Grinshpun et al., 2005; Lee et al., 2004a; Niu et al., 2001b). Het is een techniek die al vrij uitgebreid wordt toegepast in bijvoorbeeld kantoren en andere ruimten waarin de lucht via luchtrecirculatie wordt geconditioneerd en gezuiverd. Er zijn ook aanwijzingen dat door ionisatie van de lucht vluchtige organische componenten worden afgebroken, waardoor de stank verminderd (Daniels, 2007; Wu and Lee, 2004). Uit onderzoek blijkt dat ionisatie van de lucht ook een antimicrobiële werking heeft (Bundy and Veenhuizen, 1987; Fletcher et al., 2007; Grinshpun et al., 2004; Krueger and Reed, 1976; Lee et al., 2004a, b; Phillips et al., 1964) en de concentratie allergenen in de lucht reduceert (Dennis, 2003; Goodman and Hughes, 2002, 2004). Een belangrijk voordeel van ionisatiesystemen ten opzichte van bijvoorbeeld filtratie is het lage energiegebruik. Nadelen van ionisatie van lucht zijn de vorming van ozon (Britigan et al., 2006; Chen and Davidson, 2003; Chen and Wang, 2005; Nagato et al., 2006; Niu et al., 2001a, b) en met als gevolg daarvan de vorming van zeer kleine stofdeeltjes (kleiner dan 1 micron) (Alshawa et al., 2007; Hobbs et al., 1990). De mate waarin ozon en kleine stofdeeltjes worden gegenereerd lijken echter sterk afhankelijk te zijn van het gebruikte ionisatiesysteem. Praktische nadelen van ionisatiesystemen zijn dat de oppervlakken waaraan stof gaat binden regelmatig schoongemaakt moeten worden (Tanaka and Zhang, 1996) en dat materialen sterk elektrostatisch geladen kunnen worden (Grabarczyk, 2001; Grinshpun et al., 2005).

Hoewel ionisatiesystemen de laatste jaren sterk zijn verbeterd en goede resultaten zijn geboekt bij het gebruik van ionisatiesystemen in stallen (Chiumenti and Guercini, 1990; Dolejs et al., 2006; Mitchell et al., 2000; Mitchell et al., 2004; Ritz et al., 2006; Rosentrater, 2003; Tanaka and Zhang, 1996), zijn deze systemen nog niet volledig geoptimaliseerd voor gebruik in stallen (Rosentrater, 2004). Daarnaast is meer onderzoek nodig naar de effectiviteit van ionisatiesystemen voor reductie van fijnstof in verschillende staltypen.

Het principe van de verschillende ionisatiesystemen is het aanbrengen van een hoge spanning, waardoor elektronen vrij komen of juist worden afgevangen. Hierdoor ontstaan positief of negatief geladen ionen, die vervolgens stofdeeltjes positief of negatief laden. Deze stofdeeltjes zullen gaan 'plakken' aan tegengesteld geladen oppervlakken, maar ook aan vloeren en wanden. In Amerika is ervaring opgedaan met het zogenaamde 'Electrostatic Space Charge System (ESCS)', o.a. bij gebruik in pluimveestallen. Naast het ESCS systeem zijn er ook andere ionisatiesystemen op de markt, o.a. ionisatielampen, maar deze vinden nog geen toepassing in de veehouderij.

Belangrijke aandachtspunten in het onderhavige onderzoek zijn: 1) het inventariseren van de huidig beschikbare systemen; 2) het testen van de effectiviteit voor reductie van fijnstof van de meest perspectiefvolle systemen; 3) bepaling van de investerings- en operationele kosten. In dit rapport wordt de eerste fase van dit onderzoek, de inventarisatiefase, beschreven.

Het doel van deze eerste fase van het ionisatieonderzoek is te onderzoeken of ionisatie een geschikt instrument kan zijn om de fijnstofemissie uit pluimveestallen te reduceren.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de fundamentele aspecten van de werkingsprincipes van ionisatiesystemen. In hoofdstuk 3 wordt een beschrijving gegeven van de belangrijkste systemen die nu op de markt zijn en die geschikt zouden kunnen zijn voor toepassing in pluimveestallen. In respectievelijk de hoofdstukken 4 en 5 worden de toepassingsmogelijkheden van ionisatiesystemen bediscussieerd en worden de belangrijkste conclusies uit deze studie getrokken.

2 Werkingsprincipe ionisatiesystemen

2.1 Werkingsprincipe

Alle luchtionisatiemethoden berusten steeds op hetzelfde basisprincipe: ze sturen elektronen tussen gasmoleculen. Wanneer een gasmolecuul een elektron verliest, wordt deze positief geladen. Het tegenovergestelde geldt ook: als een gasmolecuul een elektron opneemt dan is het molecuul negatief geladen, ofwel een negatief ion (Daniels, 2001). Ionisatiesystemen genereren elektronen, die getransporteerd en beïnvloed worden door elektrische velden. Deze elektrische velden accelereren de elektronen waardoor deze voldoende kinetische energie krijgen om moleculen te ioniseren (Fletcher et al., 2008).

Twee basismethoden met elektronen worden gebruikt om ionen te creëren, alpha ionisatie en corona ionisatie:

1. Alpha-ionisatoren gebruiken een nucleaire bron, Polonium-210. Dit is een zogenaamde alpha-deeltjesemitter. Het alpha-deeltje, een heliumkern, botst met lucht moleculen die vervolgens elektronen uitzenden. Het alpha-deeltje kan ongeveer over een afstand van 3 cm in de lucht worden weggeschoten. De gasmoleculen die elektronen verliezen, worden positief geladen. De vrije elektronen bestaan niet erg lang in lucht omdat ze worden ingevangen door neutrale gasmoleculen, waarbij negatieve ionen worden gevormd. Het is bij dit punt belangrijk op te merken dat alpha-ionisatoren altijd een gebalanceerd aantal positieve en negatieve ionen vormen. Elk deeltje dat een elektron uitzendt, wordt een positief ion en elk deeltje dat een elektron ontvangt wordt een negatief ion. Met andere woorden: positieve en negatieve ionen worden altijd in gelijke aantallen gevormd, met als voordeel dat ze gevoelige apparatuur, zoals computeronderdelen, beschermen. Gelijke aantallen positief en negatief geladen ionen betekenen dat de ionisator altijd een spanningsverschil heeft van nul Volt en dat ook alles in de omgeving ontladen wordt. Het voorgaande maakt echter tevens dat alpha-ionisatoren niet geschikt zijn om stofdeeltjes uit de lucht te halen, aangezien stofdeeltjes (vrijwel) niet geladen worden. Ze worden immers zowel door positieve als door negatieve deeltjes geladen.
2. Corona-ionisatoren vormen sterke elektrische velden geïnitieerd door het toepassen van een hoog voltage. De velden komen uit in een scherp ionisatiepunt dat elektronen uitstoot of juist ontvangt, afhankelijk van de lading van de ionisator. Bij een positieve lading van de ionisator worden elektronen aangetrokken. Door lekken van sporen van radioactieve elementen in de lucht zijn er altijd een paar elektronen aanwezig in lucht. Deze elektronen worden aangetrokken door de ionisator. Onderweg botsen deze elektronen met lucht moleculen waardoor nog meer elektronen worden uitgestoten en aangetrokken door de ionisator. Op deze manier worden grote aantallen moleculen positief geladen. Deze positief geladen ionen worden afgestoten van het positief geladen veld rond de ionisator en ze worden aangetrokken door negatief geladen oppervlakken. Bij een negatieve lading van de ionisator worden elektronen uitgestoten vanaf het ionisatiepunt. Deze elektronen botsen met neutrale lucht moleculen, waardoor negatieve ionen ontstaan. Deze negatief geladen ionen worden afgestoten door het negatieve elektrische veld van de ionisator en worden aangetrokken door positief geladen oppervlakken. Ionisatoren zijn meestal negatief geladen, omdat voor het creëren van een vergelijkbaar positief geladen elektrische veld hogere voltages nodig zijn (Amuhanna, 2007) en omdat positief geladen ionen in het algemeen groter zijn en zich daardoor minder snel bewegen. Een negatief geladen corona veroorzaakt daardoor meer (negatief geladen) ionen en daardoor een hogere belading van de stofdeeltjes (Smith et al., 1978), die daardoor eerder worden afgevangen door geaarde oppervlakken. Volgens Mayya et al. (2004) en Fletcher (2008) is het corona-ionisatieproces samen te vatten in de volgende stappen: het creëren van een elektrisch veld en het ioniseren van moleculen met behulp van elektronen, het laden van stofdeeltjes door de ionen en als laatste stap de collectie van stofdeeltjes op geaarde oppervlakken.

Er zijn verschillende methoden voor het gebruik van Corona ionisatoren voor het ioniseren van de lucht. Het belangrijkste verschil tussen deze methoden is de toepassing van een hoog voltage wisselstroom/ gelijkstroom of stroompulsen voor het creëren van ionen. Hierna wordt een korte beschrijving gegeven van de verschillen in deze corona ionisatietechnieken.

2.2 Wisselstroomionisatie

Wisselstroomionisatie (Alternating Current Ionization) – Hierbij wordt een hoge spanning aangebracht op een aantal dicht bij elkaar liggende emissiepunten. De emissiepunten worden afwisselend positief en negatief geladen met een frequentie van 50/60 Hz. De efficiëntie van ionisatie is laag, aangezien de emissiepunten telkens maar een korte tijd boven de ionisatie-grensvoltage blijven. Wisselstroomionisatie wordt, net als alpha ionisatie ingezet om negatieve effecten van statische lading te voorkomen, zoals in de elektronica-branchen voor het beschermen van componenten tijdens de assemblage. Vanwege de lage ionisatie is wisselstroomionisatie minder geschikt voor toepassing in cleanrooms (stofvrije kamers) en daarom ook niet geschikt om stof uit stallucht te verwijderen.

2.3 Gelijkstroomionisatie

Bij gelijkstroomionisatie wordt continu een hoog positief of een hoog negatief spanningsverschil aangebracht, waardoor de emissiepunten ofwel positieve ofwel negatieve ionen creëren. Bij 'Steady State DC Ionization' wordt een hoog voltage van beide polariteiten continu toegepast op paren van positieve en negatieve emissiepunten. Hierdoor neemt de efficiëntie van de ionenproductie toe ten opzichte van wisselstroom-ionisatoren. Lagere stroomsterktes kunnen worden gebruikt, waardoor gelijkstroomionisatoren beter toepasbaar zijn voor het gebruik in cleanrooms. De beschikbaarheid van gescheiden positieve en negatieve hoogvoltage elektriciteitsvoorzieningen maakt het mogelijk om verschillende schema's te gebruiken voor regeling en controle van ionbalansen die beter zijn dan +/- 5 Volt, waardoor statische ladingen nauwkeurig gecontroleerd en beheerst kunnen worden. Gelijkstroomionisatie kan toegepast worden in ruimtes met een hoge luchtsnelheid. Ze vinden een brede toepassing voor het regelen (beheersen) van de statische lading van systemen in ruimtes, werkoppervlakken, afzuigkappen, en 'point-of-use' toepassingen in apparatuur.

Gelijkstroomionisatie kan ook toegepast worden met alleen een positieve of alleen een negatieve lading, het zogenaamde uni-polaire systeem. De positief of negatief geladen deeltjes worden aangetrokken door geaarde of tegengesteld geladen oppervlakken. Het voordeel is dat ze een groot gebied kunnen bestrijken. Dit systeem is niet toepasbaar in ruimten waar apparatuur staat die zeer gevoelig is voor statische elektriciteit zoals geldt voor bepaald computeronderdelen, die ook in meet- en regelapparatuur kunnen voorkomen.

2.4 Pulserende ionisatie

Pulserende ionisatie (Pulsed DC) – Hierbij wordt wisselend een positieve of een negatieve hoge spanning op de emissiepunten gezet, waardoor er wolken van positieve en negatieve ionen worden gevormd. Deze vermengen zich in de ruimte. Hierdoor worden moleculen minder snel geneutraliseerd, waardoor het mogelijk is om ionisatoren aan het plafond van ruimtes te plaatsen op 5 meter hoogte of meer. Pulserende ionisatoren worden gebruikt in ruimtes met een lage luchtsnelheid en zijn het meest gebruikte type ionisator in cleanrooms. Het voordeel van dit type ionisator is zijn flexibiliteit en zijn veelzijdigheid, zoals het aanpassen van de wisseltijd aan de specifieke luchtstroomcondities. Pulserende ionisatie is in het algemeen minder geschikt in ruimtes waarin, voor statische elektriciteit, zeer gevoelige apparatuur is geplaatst.

Uit voorgaand overzicht kan geconcludeerd worden dat gelijkstroomionisatie en pulserende ionisatie het meest in aanmerking komen voor het reduceren van (fijn) stofconcentraties en -emissies in stallen. Deze ionisatiesystemen hebben een (relatief) groot bereik en kunnen ook in geventileerde ruimtes worden toegepast.

2.5 Factoren van invloed op stofreductie

Het effectief neerslaan van stofdeeltjes in een binnenruimte (kantoor of stal) is mogelijk indien de stoomsnelheid in het elektrisch veld E significant hoger is dan de snelheid die wordt veroorzaakt door de zwaartekracht en de snelheid van de luchtstroom (Grabarczyk, 2001). De snelheid v_g voor een stofdeeltje die veroorzaakt wordt door de zwaartekracht kan als volgt worden weergegeven (1):

$$v_g = g d^2 \rho (1 + 2\lambda/d) / (18\eta), \quad (1)$$

waar g de constante van de zwaartekracht, d de diameter van het stofdeeltje, ρ de dichtheid van het materiaal van het stofdeeltje, λ de vrije baan in de lucht, η de dynamische viscositeit van de lucht. De maximale stroomsnelheid v_e van een deeltje met groottes van 0,3 tot 25 μm , geladen en weggehaald door het elektrisch veld E is bij benadering gelijk aan (2):

$$v_e = \mu E = E^2 \varepsilon_0 (3 \varepsilon_r / (2 + \varepsilon_r)) \cdot (1/3 \eta) (1 + 2\lambda/d) d, \quad (2)$$

waar μ is de mobiliteit van het deeltje, E is de ladingsintensiteit en neerslaan door het elektrisch veld, ε_0 is de diëlektrische constante van de lucht, ε_r is de relatieve diëlektrische constante van het deeltje.

Vergelijking (3) geeft de voorwaarden voor effectieve vergroting van het neerslaan van deeltjes in niet geventileerde lucht weer en volgt uit de vergelijkingen (1) en (2):

$$E \gg \sqrt{(2 + \varepsilon_r) g d \rho} / (18 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \quad (3)$$

Voor deeltjesgroottes van 0,3 tot 2,5 μm moet het elektrisch veld respectievelijk tenminste 7 - 20 kV/m zijn. Voor deeltjes kleiner dan 10 μm zou het elektrisch veld circa 30 kV/m moeten zijn. Bovendien moet de hele ruimte gevuld zijn met elektrische veldlijnen en ionstromen om te voorkomen dat schone lucht zich vermengd met verontreinigde lucht.

Het effect van ionisatiesystemen op de verwijdering van stofdeeltjes uit de lucht is gemodelleerd door Mayya et al. (2004). De verschillende processen die hierbij een rol spelen zijn in formules beschreven, zoals de effecten op de verwijdering van de deeltjes als gevolg van diffusie, gravitatie, ventilatie en het elektrische veld. Het verwijderingrendement van stofdeeltjes door ionisatiesystemen wordt beïnvloed door kenmerken van de deeltjes zelf (concentratie, deeltjesgrootteverdeling) (Bohgard and Eklund, 1998), verdeling van de elektrische lading op het deeltje (Lee et al., 2004a), en door het aantal gegenereerde en de dichtheid van de ionen.

Het meeste werk om het effect van verschillende factoren op de werking van ionisatiesystemen te testen is gedaan in gecontroleerde experimenten in kleine ruimten (< 30 m³). Vooral de effecten van voltages, stofconcentraties en deeltjesgrootte zijn onderzocht. Bohgard en Eklund (1998) onderzochten het verloop van de stofconcentratie bij gebruik van een -60 kV ionisatiesysteem. Ze vonden een significante afname van de stofdeeltjes in de ruimte. De verlaging van de stofconcentratie bleek meer af te hangen van de dichtheid van de gegenereerde ionen (in het algemeen rond de 10⁵ tot 10⁶ ionen per cm³) en de tijd dan van de grootte van de deeltjes. De grootte van de te ioniseren ruimte in relatie tot de capaciteit van het ionisatiesysteem is ook van belang voor de efficiëntie van het systeem, waarbij de efficiëntie toeneemt bij een kleinere gesloten ruimte. Grinshpun et al. (2005) evalueerde vijf uni-polaire ionisatiesystemen op hun efficiëntie om stof te reduceren. Hun resultaten laten zien dat deeltjes in de range van 0,3 tot 3 μm verminderen bij emissie van uni-polaire ionen en dit was onafhankelijk van de deeltjesgrootte. Stofconcentraties worden door corona ionisatiesystemen verlaagd door een toename van de depositie van de stofdeeltjes op (geaarde) oppervlakken als gevolg van migratie van de deeltjes in een elektrisch veld. Zij vonden ook dat de effectiviteit van het ionisatiesysteem sterk wordt beïnvloed door de dichtheid van de ionenemissie. Ze vonden de beste resultaten bij de meest krachtige uni-polaire ionisatiesystemen. Ook vonden ze een sterke relatie met het volume van de te reinigen ruimte. Grinshpun et al. (2004) vonden ook een significante afname (92%) van bacteriën in de lucht. Onderzoek van Grabarczyk (2001) lieten wel een effect zien van deeltjesgrootte op de verwijderingsefficiëntie, waarbij een hogere reductie werd bereikt voor de kleinere deeltjes (0,3–0,4 μm vergeleken met 0,4–2,5 μm range).

Ventilatie blijkt negatief gecorreleerd te zijn met stofreductie via ionisatie. Bundy (1984) vond dat bij een toename van de ventilatie de stofreductie afnam voor deeltjes >0,5 μm bij gebruik van een 12 kV ionisatiesysteem. Deze onderzoeker vond echter ook een lagere efficiëntie wanneer er helemaal geen ventilatie was.

Concluderend kan gesteld worden dat de stofreductiecapaciteit van een ionisatiesysteem wordt beïnvloed door:

1. de ionenemissie
2. het elektrisch veld
3. de deeltjesgrootte verdeling van het stof
4. het ventilatie-debiet
5. de grootte van de te ioniseren ruimte

Voor het berekenen van de benodigde capaciteit van het ionisatiesysteem moet dus rekening worden gehouden met deze parameters. Gedetailleerde kennis over de invloed van de afzonderlijke parameters op de reductie van fijnstof ontbreekt echter nog op dit moment.

2.6 Effect corona ionisatoren op gasvormige emissies en ziektekiemen

Naast het effect op de stofconcentratie worden er ook effecten van ionisatiesystemen op concentraties geurcomponenten en (andere) organische vluchtige componenten gerapporteerd (Wu and Lee, 2004; Daniels, 2007). De uitgestoten elektronen kunnen zich binden aan zuurstof en vormen zo het superoxide radicale anion O_2^- (Daniels, 2001). Dit radicale zuurstofion gaat oxidatiereacties aan met de vluchtige organische componenten. In de literatuur wordt geen melding gemaakt van effecten van ionisatie op methaanconcentraties en -emissies. Door sommige auteurs wordt een effect beschreven van ionisatie op de ammoniakconcentratie en -emissie (Mitchell *et al.*, 2004; Ritz *et al.*, 2006). Er is echter geen helder werkingsprincipe aan te geven dat de ammoniakreductie zou kunnen verklaren. Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat ammoniak wordt omgezet in nitraat. Nagato *et al.* (2006) vonden nitraationen in de lucht als gevolg van ionisatie. Deze zouden mogelijk ontstaan kunnen zijn als gevolg van oxidatie van ammoniak.

Daarnaast blijken de gegenereerde ionen in de lucht een bacteriedodend effect te hebben en kunnen ze het aantal micro-organismen (Phillips *et al.*, 1964; Krueger and Reed, 1976; Grinshpun *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004b; Fletcher *et al.*, 2007) en allergenen (Goodman and Hughes, 2002; Dennis, 2003; Goodman and Hughes, 2004) in de lucht reduceren. Ionisatiesystemen zouden daarom toegepast kunnen worden om de infectiedruk in stallen te verlagen (Holt *et al.*, 1999; Mitchell and Waltman, 2003; Mitchell *et al.*, 2004).

2.7 Effect corona ionisatoren op de gezondheid van mens en dier

Corona ionisatoren kunnen op drie manieren een effect hebben op de gezondheid van mens en dier. Ten eerste veroorzaken ionisatoren een elektrisch veld dat bepaalde effecten kan hebben; ten tweede produceren ionisatoren positieve en/of negatieve ionen die ook gezondheidseffecten kunnen hebben; ten derde kunnen elektrische stromen zorgen voor magnetische velden. Echter, door de zeer lage stroomsterkte van ionisatiesystemen zijn effecten als gevolg van magnetische velden te verwaarlozen.

Ten aanzien van elektrische velden heeft de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) in juni 2007 adviezen opgesteld (WHO, 2007). Deze adviezen zijn overgenomen door de Gezondheidsraad (Gezondheidsraad, 2007). Het WHO-document geeft een actueel overzicht van de stand van wetenschap met betrekking tot effecten van blootstelling aan deze velden. Op basis hiervan adviseert de WHO maximale waarden voor elektrische velden van 5 kV/m voor de algemene bevolking en 10 kV/m voor beroepsmatige blootstelling. In deze blootstellinglimieten zijn veiligheidsmarges ingebouwd, waardoor de limieten voor de algemene bevolking een factor 50 en voor de beroepsbevolking een factor 10 lager liggen dan niveaus waarboven gezondheidseffecten voor zouden kunnen komen. Overschrijding van de limieten betekent dus niet dat er direct een kans is op het optreden van gezondheidseffecten. In ons land zijn blootstellinglimieten niet wettelijk vastgelegd, maar in de praktijk worden wel de aanbevelingen gehanteerd.

Ten aanzien van ion-concentraties in de lucht en de ionenbalans is er enig bewijs dat ze van invloed zijn op het functioneren en de gezondheid van biologische organismen (planten, dieren en mensen). Verhoogde concentraties negatieve ionen in de lucht blijken een positief effect te hebben op de gezondheid, terwijl verlaagde concentraties van negatieve of positieve ionen, of verhoogde niveaus van positieve ionen, een negatief effect hebben op de gezondheid. Deze effecten zijn getest bij muizen, waarbij verschillen zijn aangetoond in sterftepercentage (Krueger, 1976) en bij kippen, waarbij een hogere groei werd gevonden bij dieren in een omgeving met een verhoogd niveau van negatief geladen ionen (Quarantelli *et al.*, 2000). Andere positieve effecten die worden toegeschreven aan negatieve ionbalansen zijn: een verlaagde ademhaling, een verlaagd basaal metabolisme, verlaagde bloeddruk, een energiek gevoel, verlaagde huidtemperatuur, een verhoogde resistentie tegen ziekten. Deze effecten zijn echter (nog) niet wetenschappelijk bewezen. Ionisatiesystemen die negatieve ionen creëren worden vanwege deze effecten soms ingezet bij therapieën voor een aantal chronische aandoeningen.

Aan een positieve ionenbalans echter worden negatieve effecten op de gezondheid toegeschreven: verhoogde ademhaling, verhoogd basaal metabolisme, verhoogde bloeddruk, hoofdpijn, vermoeidheid, verkoudheid, keelpijn, duizeligheid, verhoogde huidtemperatuur.

Zowel kleine negatieve als kleine positieve ionen blijken een desinfecterende werking te hebben en kunnen verschillende typen schimmels en bacteriën doden (Krueger and Reed, 1976), waardoor ze een bijdrage leveren aan diergezondheid en productie. Hoge elektrostatische ladingen en wisselende positieve en negatieve elektrische velden kunnen de concentratie kleine ionen verminderen, waardoor de positieve effecten verdwijnen. Het lichaam lijkt het best te functioneren wanneer het blootgesteld wordt aan een constant verticaal elektrisch veld. Blootstelling aan wisselende elektrische velden kan negatief werken op de gezondheid.

3 Toepassing ionisatiesystemen

Hierna worden een aantal ionisatiesystemen beschreven die op dit moment al worden toegepast voor stofreductie.

3.1 Ionisatiesystemen voor stallen

Ionisatiesystemen in de veehouderij zijn vooral getest in pluimveestallen met het gepatenteerde systeem van Mitchell en Stone (2000), het zogenaamde Electrostatic Particulate Ionization (EPI) systeem. Dit is een product dat geleverd wordt door Baumgartner Environics, Inc. Het Amerikaanse bedrijf Chore-Time heeft een licentie om het systeem op de markt te brengen. Het EPI-systeem werd in het verleden ook wel het Electrostatic Space Charge System (ESCS) genoemd. De werking van het EPI-systeem is gebaseerd op uni-polaire gelijkstroom-ionisatie waarbij stofdeeltjes negatief worden geladen. Deze stofdeeltjes worden vervolgens aangetrokken door gearde platen en door vloeren en wanden (Mitchell en Waltman, 2003). Het systeem hanteert voltages die variëren van -20 tot -30 kV en stroomsterkten lager dan 2 mA.

Het huidige EPI-systeem bestaat uit metalen draden die over de volledige lengte van de stal worden aangebracht. Op deze draden zijn om de 1.3 cm scherpe elektroden geplaatst. De metalen draden zijn 7.6 cm geplaatst onder een gearde metalen frame. Op de elektronen wordt een spanning gezet van -30 kV, met een stroomsterkte van 0,7 mA. De ingestelde stroomsterkte is afhankelijk van de lengte en de inhoud van de stal. Het EPI-systeem wordt op circa 2,2 m vanaf de vloer in het midden van de stal geplaatst. Mitchell en anderen hebben verschillende onderzoeken gedaan om het effect van het EPI-systeem aan te tonen. In stallen voor vleeskuikenouderdieren werden reducties in concentraties gevonden van 61, 56 en 67% voor totaalstof, ammoniak en bacteriën (Mitchell et al., 2004). PM10-concentraties werden gereduceerd met 78% in broedmachines en met 47% in batterijhuisvesting voor leghennen (Mitchell and Baumgartner, 2007). Holt et al. (1999) en Richardson et al. (2003) onderzochten de reductie van *Salmonella enterica* serovar enteritidis en andere bacteriën in de lucht in verschillende pluimveestallen. Ze vonden reducties die op konden lopen tot 96%.

Het EPI-systeem is door de US Environmental Protection Agency (EPA) officieel erkend als een systeem dat stof reduceert in batterijstallen voor leghennen. Het systeem is sinds 2005 commercieel beschikbaar. Hoewel het systeem vooral is uitgetest in pluimveestallen, is het systeem toepasbaar in alle stallen.

Er zijn ook enkele onderzoeken gedaan met ionisatiesystemen in varkensstallen (Rosentrater, 2003; Tanaka and Zhang, 1996), rundveestallen (Dolejs et al., 2006) en in konijnenstallen (Chiumenti and Guercini, 1990). De systemen die in deze onderzoeken zijn gebruikt verschillen van het EPI-systeem. De gebruikte voltages zijn in het algemeen lager dan bij het EPI-systeem, namelijk variërend van -7 tot -24 kV. In de beschikbare literatuur zijn alleen testen gedaan met ionisatiesystemen die een negatieve geladen corona creëren. Dolejs et al. (2006) vonden in rundveestallen reducties van 70 tot 75% voor stofdeeltjes kleiner dan 10 µm. Chiumenti en Guercini (1990) vonden een reductie van 67% in bacterieconcentratie en 30% in concentraties schimmels in de lucht van konijnenstallen.

Figuur 1 Het EPI-systeem in een vleeskuikenstal van Het Spelderholt in Lelystad



In de praktijk zijn een aantal problemen met ionisatiesystemen aan het licht gekomen. Deze zijn meestal gerelateerd aan spanningsverliezen. Dit kan veroorzaakt worden als de spanning- en geaarde draden te dicht bij elkaar zitten of door stofophoping op oppervlakken. De geaarde platen moeten daarom regelmatig worden schoongemaakt. Daarnaast kan elektrostatische lading op oppervlakken vervelend zijn voor mensen die in de stal werken (Tanaka en Zhang, 1996). De positie van het ionisatiesysteem in stallen, het effect van ventilatie en de toepassing van het optimale spanningsverschil zijn nog punten van verder onderzoek en optimalisering. Het schoonmaken van oppervlakken waarop stof zich ophoopt is ook een punt dat verbetering behoeft. Op dit moment wordt het stof dat neergeslagen is op de geaarde platen nog handmatig verwijderd door het stof van de platen te kloppen. Uit oogpunt van arbo is dit ongewenst, tenzij een volledig gezichtsbescherming wordt gebruikt. Daarnaast kan het afgeklopte stof vanuit het strooisel weer in de lucht worden gebracht door dieractiviteit. Enkele systemen waarbij het stof van de oppervlakken wordt gespoeld of gewassen zijn al uitgetoet en lijken perspectief te bieden (Mitchell et al., 2002; Mitchell and Waltman, 2003). Het is noodzakelijk dat dit waswater wordt opgevangen om nadelige effecten op het strooisel en de dieren te voorkomen.

3.2 Ionisatiesystemen voor werkomgevingen en binnenshuis

Er zijn verschillende ionisatiesystemen op de markt die toegepast kunnen worden in werkomgevingen of binnenshuis. Deze ionisatiesystemen zijn meestal gebaseerd op het principe van ionenproductie door het creëren van een corona ofwel een elektrisch veld, vergelijkbaar met het EPI-systeem. Deze ionengeneratoren hebben echter in het algemeen een te kleine capaciteit voor toepassing in omgevingen met een zeer grote stofproductie en een relatief hoog ventilatiedebiet, zoals in stallen.

Verschillende (internet)bedrijven bieden lampen te koop aan die de lucht zuiveren van fijnstof. Het werkingsprincipe van deze lampen lijkt ook gebaseerd op coronavorming en het laden van stofdeeltjes die vervolgens aan oppervlakken gaan kleven. Belangrijke vraag is hoeveel lampen in stallen moeten worden geïnstalleerd om een redelijke fijnstofreductie (> 30%) te bewerkstelligen. Waarschijnlijk zijn dusdanige aantallen nodig dat dit geen kosteneffectieve methode is. Experimenteel onderzoek zal hier echter uitsluitsel over moeten geven.

3.3 Fijnstofmagneet voor afvang fijnstof in buitenlucht

De fijnstofmagneet is een ionisatiesysteem dat nog in ontwikkeling is. Dhr. Van Ursem, directeur van de Botanische tuin van de Technische Universiteit Delft, heeft een simpele manier bedacht om fijnstof uit de lucht te halen. Hij heeft hiervoor een wereldwijd patent aangevraagd. Het systeem is in eerste instantie bedacht voor het reinigen van lucht langs wegen. Langs de weg worden drie dunne draden gespannen. Op de draden wordt een positieve spanning gezet, waardoor luchtmoleculen in de omgeving positief worden geladen. Deze positieve ionen komen in aanraking met stofdeeltjes die vervolgens ook positief worden geladen. De positief geladen stofdeeltjes worden vervolgens afgevangen door oppervlakken die geaard zijn, zoals bomen. In het plan van Van Ursem wordt langs de weg een heg geplaatst met gaas, waardoor deeltjes extra worden aangetrokken. Het principe is vergelijkbaar met de beschreven corona ionisatoren in hoofdstuk 2 en is tevens vergelijkbaar met het EPI-systeem.

4 Discussie

Ionisatiesystemen worden tot nu toe vooral ingezet in cleanrooms en in het plaatselijk stofvrij maken van de lucht. De meeste ionisatiesystemen hebben slechts een bereik over korte afstand. Voor werking over grotere afstanden, zoals in stallen, zijn deze systemen niet geschikt. In hoofdstuk 3 zijn enkele systemen beschreven die wel geschikt lijken voor stallen. Van deze systemen is het EPI-systeem als enige al vrij uitgebreid getest in stallen.

Op basis van theorie, experimenten en ervaring kan worden geconcludeerd dat ionisatiesystemen (fijn)stofconcentraties in de lucht kunnen verlagen. Het belangrijkste principe is gebaseerd op het creëren van een elektrisch veld (corona) waardoor luchtmoleculen positief of negatief worden geladen. Deze ionen zorgen voor een positieve of negatieve lading van stofdeeltjes. Deze stofdeeltjes kleven vervolgens aan gearde oppervlakken, zoals vloeren en wanden. Tanaka en Zhang (1996) geven aan dat het effect van ionisatiesystemen afneemt met de tijd als gevolg van stofaccumulatie op oppervlakken. In het EPI-systeem wordt veel stof verzameld op gearde platen. Deze platen moeten dan ook regelmatig worden schoongemaakt. Bij vleeskuikens bijvoorbeeld zal dit in het begin van de ronde één maal per week moeten gebeuren, waarna de frequentie geleidelijk wordt opgevoerd tot het dagelijks schoonmaken aan het eind van de ronde. Hiermee kan worden voorkomen dat het stof als een soort isolatielaag werkt voor verdere aantrekking van stofdeeltjes door de platen. Tanaka en Zhang (1996) geven tevens aan dat het effect van ionisatiesystemen afhankelijk is van het ventilatie-debiet. Bij hoge ventilatie-debieten (circa 20 x stalinhoud per uur) vonden zij een beduidend lagere reductie van de stofconcentratie dan bij lage ventilatie-debieten (circa 4 x stalinhoud per uur). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat bij een hoog ventilatie-debiet ionen in de lucht relatief snel worden afgevoerd met de ventilatielucht waardoor ze geen kans krijgen om in aanraking te komen met stofdeeltjes. Dit wordt bevestigd door modelberekeningen van Mayya et al. (2004). Zij geven aan dat bij een relatief laag ventilatie-debiet van 0,5 maal de inhoud per uur, de stofreductiefactor afneemt van circa 100 naar circa 10. In pluimveestallen wordt de inhoud van de stal een aantal malen per uur verversd. Hier zal rekening mee moeten worden gehouden bij het dimensioneren van ionisatiesystemen. Als gevolg van het vastplakken van negatief geladen deeltjes aan vloeren en wanden neemt de elektrostatische lading van deze oppervlakken toe. Tanaka en Zhang (1996) vonden een toename van 137 V (controleafdeling) naar 319 V (proefafdeling). Deze toename had volgens deze onderzoekers echter geen negatieve effecten voor mens, dier of materialen. De effecten van elektrostatische lading en het voorkomen hiervan is echter wel een aandachtspunt in vervolgonderzoek.

Hoewel duidelijk is dat ionisatie een werkbaar principe is om (fijn)stof in ruimten te reduceren, is er ook nog veel onduidelijk. Dit veroorzaakt tevens dat er verschillende systemen worden aangeboden waaraan hoge stofreducties en andere positieve effecten worden toegeschreven. Er moet een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen systemen die geschikt zijn voor relatief kleine en relatief schone ruimten, zoals kantoren of cleanrooms en stallen. Stallen stellen belangrijk zwaardere eisen aan ionisatiesystemen vanwege de hoge stofconcentraties, hoge ventilatie-debieten en grote ruimten. Onderzocht zal moeten worden in een vergelijkende proef of ionisatielampen en ionengeneratoren, die tot nu toe alleen in relatief kleine en schone omgevingen worden toegepast, voor stallen geschikt zijn. Via modelberekeningen (model van Mayya et al, 2004) moet een redelijke inschatting gemaakt kunnen worden van het benodigde elektrische veld in stallen, gegeven de grootte van de stal, het ventilatie-debiet en de stofconcentratie.

Ionisatiesystemen kunnen een verhoging geven van de productie van ozon. Verhoogde ozonconcentraties zijn ongewenst, aangezien deze luchtwegaandoeningen bij mens en dier kunnen veroorzaken. Ozon kan ook materialen aantasten en het heeft negatieve effecten op ecosystemen (Emissieregistratie, 2007). Daarnaast kan ozon via een reactie met vluchtige organische componenten (VOC's) stofdeeltjes vormen in de ultrafijne range ($< 0,1 \mu\text{m}$) en fijne range ($< 2,5 \mu\text{m}$) (Alshawa et al., 2007). Vorming van ozon en ultrafijne deeltjes zullen daarom meegenomen moeten worden in vervolgonderzoek aan ionisatiesystemen. Aandacht verdient verder het voorkomen van blootstelling van pluimveehouders aan sterke elektrische velden. Hierbij is de afstand tussen de ionisatieleiding met emissiepunten tot het lichaam van de pluimveehouder van belang. Daarnaast moet voorkomen worden dat oppervlakken die aangeraakt kunnen worden door de dieren of door de pluimveehouder sterk elektrostatisch worden geladen. Het aarden van deze oppervlakken zou hiervoor een mogelijke oplossing kunnen bieden.

De kosten van ionisatiesystemen variëren sterk, afhankelijk van principe en uitvoering. Voor het EPI-systeem is een globale kostenberekening gemaakt op basis van gegevens van de leverancier. De investeringskosten per dierplaats bedragen circa € 0,50 voor vleeskuikens en circa € 1,25 voor leghennen. De jaarkosten per dierplaats zijn circa € 0,10 voor vleeskuikens en € 0,20 voor leghennen. Ter vergelijking, voor het aanbrengen van een oliefilm bedragen de investeringskosten per vleeskuikenplaats € 0,45 en voor leghennen in

scharrelhuisvesting € 0,60. De jaarkosten per dierplaats zijn voor dit systeem: € 0,20 - € 0,40 voor vleeskuikens en € 0,15 – € 0,30 voor leghennen. Voor gecombineerde luchtwassystemen bedragen de investeringskosten per dierplaats circa € 5,00 voor vleeskuikens en circa € 3,50 voor leghennen. De jaarkosten per dierplaats bedragen circa € 0,75 voor vleeskuikens en € 0,50 voor leghennen. Dit betekent dat ionisatiesystemen kosteneffectieve systemen kunnen zijn voor het reduceren van de fijnstofemissie. Onderzoek zal moeten uitwijzen of met ionisatiesystemen vergelijkbare stofreducties kunnen worden bereikt in pluimveestallen als met het aanbrengen van een oliefilm.

Concluderend kan gesteld worden dat meer onderzoek nodig is om de efficiëntie van ionisatiesystemen voor fijnstofreductie in stallen vast te stellen. Kennis die verkregen is in laboratoriumopstellingen en in rekenmodellen dienen onder praktijkomstandigheden te worden gevalideerd. Verder zal de invloed van verschillende omgevingsfactoren, zoals stofconcentratie, ventilatiehoeveelheid en luchtstroming, op de stofreductie moeten worden vastgesteld. De gerapporteerde gunstige neveneffecten van ionisatiesystemen, reducties van ammoniak- en geurconcentraties en reductie van micro-organismen in de lucht, zal tevens onder praktijkomstandigheden in een vergelijkende proef moeten worden vastgesteld.

5 Conclusies

Uit deze deskstudie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het werkingsprincipe van Ionisatiesystemen voor het verwijderen van (fijn)stof uit de lucht is voldoende aangetoond. De effectiviteit voor stofreductie in stallen moet echter voor de meeste systemen nog worden aangetoond.
- Corona ionisatie, waarbij positieve of negatieve ionen worden gevormd is het belangrijkste principe voor (fijn)stofreductie in stallen.
- De meeste toegepaste ionisatiesystemen zijn op dit moment alleen geschikt voor relatief schone en kleine ruimten, zoals voor werkomgevingen en voor binnenshuis.
- Voor stallen is op dit moment één systeem beschikbaar, waaraan al vrij veel onderzoek in praktijkstallen is gedaan: het EPI-systeem. De kosten van het EPI-systeem zijn, ten opzichte van alternatieve methoden voor (fijn)stof reductie, relatief laag. Voor de Nederlandse situatie zal de (fijn)stofreductie van het systeem in een vergelijkende proef moeten worden aangetoond. Neveneffecten van het systeem, zoals de reductie van ammoniak en micro-organismen, de vorming van ozon en de vorming van elektrostatische ladingen op oppervlakken, dienen meegenomen te worden in het onderzoek.
- Andere systemen, zoals ionisatielampen en ionisatiesystemen voor kleine ruimten, zullen opgeschaald moeten worden naar stalniveau en vervolgens moeten worden getest op effectiviteit en kosten.

Literatuur

- Alshawa, A., A. R. Russell, and S. A. Nizkorodov. 2007. Kinetic analysis of competition between aerosol particle removal and generation by ionization air purifiers. *Environmental Science and Technology*.2007; 41: 2498-2504.
- Amuhanna, E. 2007. Dust control in livestock buildings with electrostatically-charged water spray, Kansas State University
- Bohgard, M., and P. Eklund. 1998. Effect of an ionizer on sub-micron particles in indoor air. *Journal of Aerosol Science* 29: S1313-S1314.
- Britigan, N., A. Alshawa, and S. A. Nizkorodov. 2006. Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and ozonolysis air purifiers. *Journal of the air and waste management association* 56: 601-610.
- Bundy, D. S. 1984. Rate of dust decay as affected by relative humidity, ionization and air movement. *Transactions of the ASAE* 27: 865-870.
- Bundy, D. S., and M. A. Veenhuizen. 1987. Dust and bacteria removal equipment for controlling particulates in swine buildings. Latest developments in livestock housing : Seminar of the 2nd Technical Section of the C.I.G.R./ Univ of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, USA, June 22-26, 1987 ; hosted by American Society of Agricultural Engineers.: 137-145.
- Chen, J. H., and J. H. Davidson. 2003. Ozone production in the negative dc corona: The dependence of discharge polarity. *Plasma chemistry and plasma processing* 23: 501-518.
- Chen, J. H., and P. X. Wang. 2005. Effect of relative humidity on electron distribution and ozone production by dc coronas in air. *IEEE transactions on plasma science* 33: 808-812.
- Chiumenti, R., and S. Guercini. 1990. Control of dust and microbiological load in rabbit rearing using the ionization technique. *Genio-Rurale* 53: 67.
- Daniels, S. L. 2001. Applications of air ionization for control of vocs and pmx. In: *Proceedings of the 94th Air and Waste Management Association Annual Conference, Orlando, Florida.*
- Daniels, S. L. 2007. On the qualities of the air as affected by radiant energies (photocatalytic ionization processes for remediation of indoor environments). *Journal of environmental engineering and science* 6: 329-342.
- Dennis, D. P. 2003. Chronic sinusitis: Defective t-cells responding to superantigens, treated by reduction of fungi in the nose and air. *ARCHIVES OF ENVIRONMENTAL HEALTH* 58: 433-441.
- Dolejs, J., O. Masata, and O. Toufar. 2006. Elimination of dust production from stables for dairy cows. *Czech journal of animal science* 51: 305-310.
- Emissieregistratie. 2007. Milieu en natuurcompendium. <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0473-Fotochemische-luchtverontreiniging:-oorzaken-en-effecten.html?i=14-65>, MNP, Bilthoven.
- Fletcher, L. A. et al. 2007. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *Bmc Microbiology* 7: 32.
- Fletcher, L. A., C. K. Noakes, P. A. Sleigh, C. B. Beggs, and S. J. Shepherd. 2008. Air ion behaviour in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment* 17 173-182.
- Gezondheidsraad. 2007. Brief gezondheidsraad aan de minister van vrom. <http://www.gr.nl/pdf.php?ID=1725&p=1>, Den Haag.
- Goodman, N., and J. F. Hughes. 2002. The effect of corona discharge on der p 1. *CLINICAL AND EXPERIMENTAL ALLERGY* 32: 515-519.
- Goodman, N., and J. F. Hughes. 2004. The effect of corona discharge on dust mite and cat allergens. *Journal of Electrostatics* 60: 69-91.
- Grabarczyk, Z. 2001. Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers. *Journal of electrostatics* 51: 278-283.
- Grinshpun, S. A. et al. 2004. Indoor air pollution control through ionization *Air pollution xii*. p 689-704. WIT Press, Southampton, Boston.
- Grinshpun, S. A. et al. 2005. Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces. *Indoor air* 15: 235-245.
- Hobbs, P. C. D., V. P. Gross, and K. D. Murray. 1990. Suppression of particle generation in a modified clean room corona air ionizer. *Journal of Aerosol Science* 21 463-465.
- Holt, P. S., B. W. Mitchell, K. H. Seo, and R. K. Gast. 1999. Use of negative air ionization for reducing airborne levels of salmonella enterica serovar enteritidis in a room containing infected caged layers. *Journal of Applied Poultry Research* 8: 440-446.
- Krueger, A. P., and E. J. Reed. 1976. Biological impact of small air ions. *Science* 193: 1209-1213.
- Lee, B. U., M. Yermakov, and S. A. Grinshpun. 2004a. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Atmospheric environment* 38: 4815-4823.

- Lee, B. U., M. Yermakov, and S. A. Grinshpun. 2004b. Unipolar ion emission enhances respiratory protection against fine and ultrafine particles. *Journal of Aerosol Science* 35: 1359-1368.
- Mayya, Y. S., B. K. Sapra, A. Khan, and F. Sunny. 2004. Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. *Journal of Aerosol Science* 35: 923-941.
- Mitchell, B. W., and J. W. Baumgartner. 2007. Electrostatic space charge system for reducing dust in poultry production houses and the hatchery. In: *DustConf 2007, How to improve air quality. International Conference, 23-24 April, Maastricht, The Netherlands*
- Mitchell, B. W., R. J. Buhr, M. E. Berrang, J. S. Bailey, and N. A. Cox. 2002. Reducing airborne pathogens, dust and salmonella transmission in experimental hatching cabinets using an electrostatic space charge system.
- Mitchell, B. W., P. S. Holt, and K. H. Seo. 2000. Reducing dust in a caged layer room: An electrostatic space charge system. *Journal of applied poultry research*. 9: 292-296.
- Mitchell, B. W., L. J. Richardson, J. L. Wilson, and C. L. Hofacre. 2004. Application of an electrostatic space charge system for dust, ammonia, and pathogen reduction in a broiler breeder house. *Applied Engineering in Agriculture: Volume 20* 20: 87-93.
- Mitchell, B. W., and W. D. Waltman. 2003. Reducing airborne pathogens and dust in commercial hatching cabinets with an electrostatic space charge system. *AVIAN DISEASES* 47: 247-253.
- Nagato, K., Y. Matsui, T. Miyata, and T. Yamauchi. 2006. An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air. *International journal of mass spectrometry* 248: 142-147.
- Niu, J. L., T. C. W. Tung, and J. Burnett. 2001a. Ozone emission rate testing and ranking method using environmental chamber. *Atmospheric environment* 35: 2143-2151.
- Niu, J. L., T. C. W. Tung, and J. Burnett. 2001b. Quantification of dust removal and ozone emission of ionizer air-cleaners by chamber testing. *Journal of electrostatics* 51: 20-24.
- Phillips, G., G. J. Harris, and M. W. Jones. 1964. Effect of air ions on bacterial aerosols. *Journal of Biometeorology* 8: 27-37.
- Quarantelli, A., M. Renzi, and L. Gandolfi. 2000. Effetti della ionizzazione della aria sulle performances del pollo da carne. *Universit... di Parma. Facolt... di Medicina Veterinaria. Annali* 2000
- Richardson, L. J., C. L. Hofacre, B. W. Mitchell, and J. L. Wilson. 2003. Effect of electrostatic space charge on reduction of airborne transmission of salmonella and other bacteria in broiler breeders in production and their progeny. *Avian-Diseases* 47: 1352.
- Ritz, C. W., B. W. Mitchell, B. D. Fairchild, M. Czarick, and J. W. Worley. 2006. Improving in-house air quality in broiler production facilities using an electrostatic space charge system. *Journal of Applied Poultry Research* 15: 333-340.
- Rosentrater, K. A. 2003. Performance of an electrostatic dust collection system in swine facilities [electronic resource]. *CIGR ejournal*.
- Rosentrater, K. A. 2004. Laboratory analysis of an electrostatic dust collection system [electronic resource]. *CIGR ejournal*.
- Smith, W. B., L. G. Felix, D. H. Hussey, D. H. Pontius, and L. E. Sparks. 1978. Experimental investigations of fine particle charging by unipolar ions-a review. *Journal of Aerosol Science* 9: 101-124.
- Tanaka, A., and Y. Zhang. 1996. Dust settling efficiency and electrostatic effect of a negative ionization system. *Journal of Agricultural Safety and Health* 2: 39-47.
- WHO. 2007. Criteria deal 238 "extremely low frequency fields". http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html.
- Wu, C. C., and G. W. M. Lee. 2004. Oxidation of volatile organic compounds by negative air ions. *Atmospheric environment* 38: 6287-6295.

Bijlagen

Bijlage 1 Definities van begrippen gebruikt in dit rapport

Alpha ionisatie	Ionisatie van lucht door gebruik te maken van een alpha-deeltjesemitter. Het alpha-deeltje, een heliumkern, botst met luchtmoleculen die vervolgens elektronen uitzenden.
Cleanroom	Een cleanroom is een ruimte, die vooral gebruikt wordt voor industriële productie of wetenschappelijk onderzoek, waarbij een zo laag mogelijke hoeveelheid vervuiling, zoals stof, micro-organismen of chemische stoffen in de lucht aanwezig mag zijn.
Corona-ionisatoren	Corona-ionisatoren vormen sterke elektrische velden door toepassing van een hoog spanningsverschil. De velden komen uit in een emissiepunt dat elektronen uitstoot of juist ontvangt, afhankelijk van de lading van de ionisator.
Elektrisch veld	Een elektrisch veld (eigenlijk elektrostatic veld) wordt geproduceerd door niet-bewegende elektrische ladingen en zorgt voor een elektrische kracht op andere ladingen. De eenheid voor de sterkte van een elektrisch veld is kV/m.
Emissiepunt	Een scherpe metalen punt dat elektronen uitstoot of juist ontvangt.
EPI-systeem	'Electrostatic Particulate Ionization' systeem. Ionisatiesysteem, geleverd door Baumgartner Environics, Inc., dat werkt volgens het principe van uni-polaire gelijkstroomionisatie.
Fijnstof	Fijnstof is stof dat voor het merendeel bestaat uit deeltjes met een aërodynamische diameter kleiner dan 10 µm. Dit stof wordt aangeduid als PM10. De aërodynamische diameter van een deeltje is de diameter van een bolvormig deeltje met een dichtheid van 1 kg/dm ³ dat dezelfde valsnelheid heeft als het betreffende deeltje.
Gelijkstroomionisatie	Ionisatiesysteem waarbij continu een hoog positief of een hoog negatief spanningsverschil wordt aangebracht, waardoor de emissiepunten ofwel positieve ofwel negatieve ionen creëren.
Ionenbalans	Het verschil tussen het aantal positief en negatief geladen ionen.
Ionisatiesysteem	Systeem / apparaat dat ionen kan genereren in lucht door een elektrisch spanningsveld te creëren waardoor elektronen vrij komen in de lucht (creëren van negatieve ionen) of juist uit de lucht worden weggevangen (creëren van positieve ionen).
kV/m	Kilovolt per meter: eenheid voor de sterkte van een elektrisch veld.
Ionisatie-grensvoltage	Minimale benodigde voltage om ionen te genereren.
Magnetisch veld	Een magnetisch veld wordt geproduceerd door bewegende elektrische ladingen, en wordt daarom ook wel elektrodynamisch veld genoemd.
Ozon	O ₃ ; Ozon is een sterke oxidator; het heeft een doordringende geur. Het maakt een belangrijke component uit van luchtvervuiling, waar het ontstaat in fotochemische smog.
Pulserende ionisatie	Ionisatiesysteem waarbij wisselend een positieve of een negatieve hoge spanning op de emissiepunten wordt gezet, waardoor er wolken van positieve en negatieve ionen worden gevormd.

Steady State DC Ionization	Ionisatiesysteem waarbij een hoog voltage van beide polariteiten continu wordt toegepast op paren van positieve en negatieve emissiepunten, waardoor zowel positieve als negatieve ionen worden gecreëerd.
Uni-polaire gelijkstroomionisatie	Gelijkstroomionisatie waarbij alleen een negatief of positief spanningsverschil wordt gecreëerd, waardoor alleen negatieve of positieve ionen worden gevormd.
Wisselstroomionisatie	Ionisatiesysteem waarbij een hoge spanning wordt aangebracht op een aantal dicht bij elkaar liggende emissiepunten. De emissiepunten worden afwisselend positief en negatief geladen met een frequentie van 50/60 Hz.