

Aërosolen

*door dr. ir. J. C. M. Marijnissen
Delft University of Technology
Julianalaan 136, 2628 BL Delft, tel. (015) 278 43 68*

1.	Inleiding	173- 3
2.	Fundamenten en meetmethoden	173- 4
3.	Moderne ontwikkelingen en toepassingen	173-10
3.1.	Gas-naar-deeltje omzetting	173-11
3.2.	Druppeltje-naar-vast-deeltje omzetting	173-14
4.	Literatuur	173-17

Chemische Feitelikheden is een uitgave van Ten Hagen & Stam bv
in samenwerking met de Koninklijke Nederlandse Chemische Ver-
eniging.

1. Inleiding

Menigeen denkt bij het horen van het woord aërosol misschien aan de producten van spuitbussen. Toch is dit maar een klein deel van het toepassingsgebied van aërosolen. Een aërosol kan gedefinieerd worden als vaste of vloeibare deeltjes gesuspendeerd in een gas. De deeltjesgrootte varieert van zo'n 0.001 μm tot wel 100 μm . Er zijn zeer veel aërosolen. In de ons omringende lucht zweven als gevolg van natuurlijke of antropogene oorzaken allerlei kleine deeltjes, zoals rook van schoorstenen en tabak, kleine minerale fragmentjes, mistdeeltjes, virussen, enzovoort. Er wordt al lang onderzoek naar aërosolen verricht. Zo schrijft G. Agrigola in zijn „De Re Metallica”, een boek over mijnbouwkunde uit 1556, over ziektes bij mijnwerkers: „Aan de andere kant zijn sommige mijnen zo droog dat ze totaal verstoken zijn van water, en deze droogte veroorzaakt bij de werkers zelfs meer schade, want het stof dat door het delven wordt geroerd en opgeslagen dringt in de luchtpijp en longen en brengt moeilijkheden bij het ademen teweeg, en de ziekte die de Grieken astma noemen. Als het stof corrosieve eigenschappen heeft, eet het de longen op”.

Ook kunnen de proeven van Millikan, aan het begin van deze eeuw, ter bepaling van de elementaire lading (van het elektron) onder aërosolen gerekend worden. Echter, vooral gedurende de laatste 50 jaar zijn er grote vorderingen gemaakt en is er een eigen, zij het interdisciplinaire, wetenschap van de aërosolen ontstaan. Die grote vooruitgang in aërosolkunde is vooral te danken aan onderzoek dat primair tot doel had de schadelijke effecten van aërosolen op de menselijke gezondheid en het milieu te begrijpen en te voorkomen. De kennis die op die manier is opgebouwd wordt momenteel echter ook voor een heel ander doel aangewend. Het blijkt namelijk dat poeders, bestaande uit heel kleine, zuivere en uniforme deeltjes via aërosolen gemaakt kunnen worden, waarbij de milieueffecten van een dergelijk productieproces veel minder ernstig zijn dan met „natte processen”.

2. Fundamenten en meetmethoden

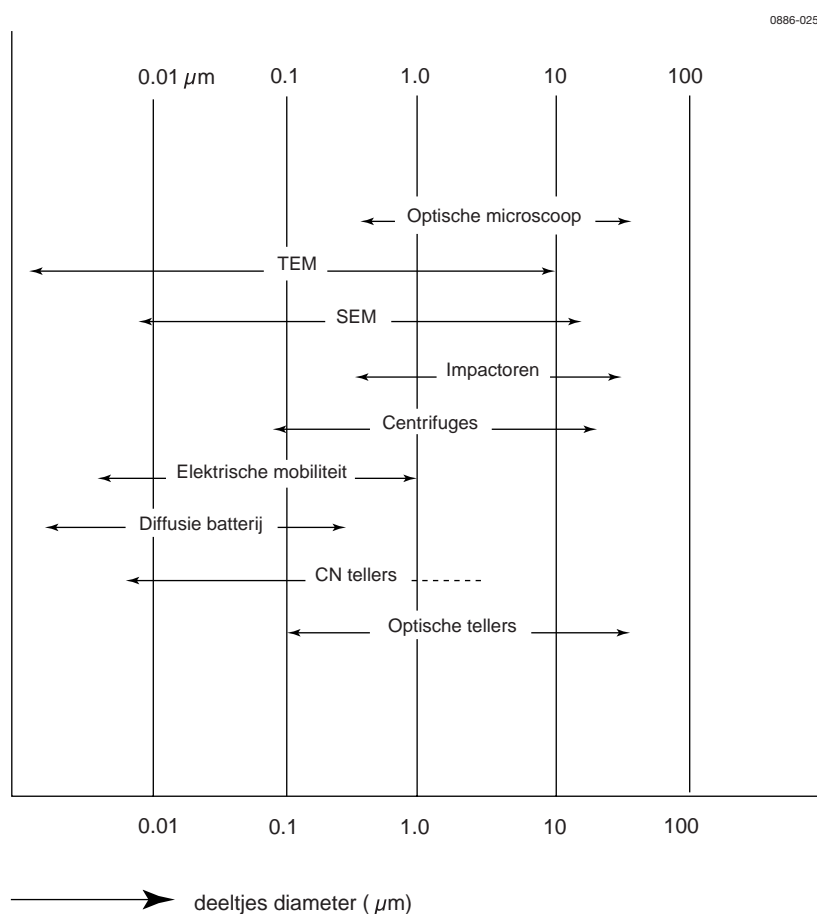
Gedurende de laatste decennia is luchtvervuiling een zeer voorname drijvende kracht achter het aërosol-onderzoek geweest. Nieuwe fysische en chemische technieken werden ontwikkeld om de ons omringende aërosolen te kunnen karakteriseren en ook werd heel wat vooruitgang geboekt in het ontwerpen van verbeterde technieken om de uitstoot van verontreinigende deeltjes in de lucht beter te beheersen. In de lucht komen zeer veel verschillende deeltjes voor met een aanzienlijke variatie in grootte. Het zal ook onmiddellijk duidelijk zijn dat één instrument voor karakterisatie niet het hele bereik kan dekken, maar dat er verscheidene instrumenten nodig zijn. Voor de chemische analyse worden vooral de gebruikelijke analysetechnieken gebruikt, waarbij de monsters bijvoorbeeld op een filter worden opgevangen.

Voor de fysische meetmethoden is een aantal instrumenten ontwikkeld, ieder gebaseerd op een bepaald fysisch mechanisme. Diezelfde mechanismen worden ook weer toegepast in de luchtreinigingsapparatuur. Figuur 1 geeft een overzicht van veelgebruikte aërosol-grootte-meetapparatuur, met het (huidige) meetbereik.

Voor de eenvoud wordt hier, tenzij anders vermeld, steeds uitgegaan van vaste bolvormige deeltjes met gelijke soortelijke massa.

Het simpelste instrument, de sedimentatie spectrometer (niet in figuur 1), maakt gebruik van de zwaartekracht. In een horizontale stroom sedimenteren deeltjes van verschillende grootten met uiteenlopende snelheden en komen dus op een andere plaats op bijvoorbeeld een glazen plaatje op de bodem van het instrument terecht. De depositie op het plaatje kan worden geanalyseerd. Dit instrument is alleen te gebruiken voor wat grotere deeltjes. In de industrie worden soms sedimentatiekamers gebruikt om grof stof (> enkele tientallen μm) af te vangen ter ontlasting van filters die voor verdere reiniging van de lucht dienen.

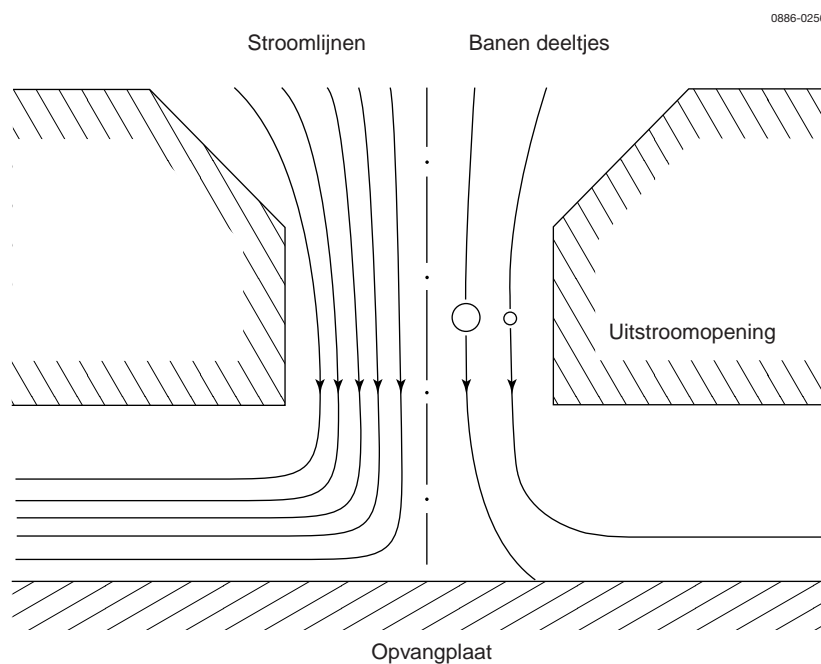
In een centrifuge wordt de zwaartekracht vervangen door centrifugale kracht. Het aërosol wordt hierin gescheiden naar grootte tot deeltjesgrootten zo klein als $0,1 \mu\text{m}$ aërodynamische diameter. (De aërodynamische diameter van een deeltje van willekeurige vorm en dichtheid is de diameter van een bolletje met een dichtheid van 1000 kg/m^3 met dezelfde sedimentatiesnelheid als het deeltje in kwestie.)



Figuur 1. Aërosol meetapparatuur met (huidig) meetbereik.

In de industrie wordt de centrifugale kracht veel toegepast in cyclonen voor scheiding en reiniging.

Een andere, zeer veel toegepaste karakteriseringsmethode maakt gebruik van een plotselinge richtingverandering van de aërosolstroom. Het gaat hier om de zogenaamde inertiële impactor. Uit de naam blijkt al dat het mechanisme waar het om draait de inertie is. Het principe van de impactor is schematisch afgebeeld in figuur 2.



Figuur 2. Het principe van een impactor.

Het aërosol wordt onder versnelling van de luchtstroom in een cirkelvormige of rechthoekige uitstroomopening geleid. De stroom uit de opening komt tegen een vlakke plaat waardoor de luchtstroom een bocht van 90° moet maken. Deeltjes met voldoende inertie kunnen de stroomlijnen niet volgen en impacteren op de plaat, de andere deeltjes volgen de stroomlijnen en stromen uit de impactor. We krijgen dus een scheiding naar grootte (bij gelijke dichtheid). Heel vaak wordt een aantal impactoren in serie gemonteerd tot een zogenaamde cascade impactor. Iedere volgende trap heeft een kleinere uitstroomopening, waardoor de luchtsnelheid steeds groter wordt. Hierdoor worden op de opeenvolgende opvangplaten steeds deeltjes behorend in een interval van kleinere deeltjes gevangen. In de industrie speelt het inertiemechanisme een erg belangrijke rol bij filtratie.

Een andere mogelijkheid om op kleine deeltjes een kracht groter dan de gravitatiekracht uit te oefenen is door ze een lading te geven en

in een elektrisch veld te brengen. In een zogenaamde elektrische mobiliteitsmeter komen deeltjes met een uiteenlopende elektrische mobiliteit op een verschillende plaats op een opvangplaat terecht. Natuurlijk wordt in de industrie ook heel veel gebruikgemaakt van elektrische krachten voor luchtreiniging of het afvangen van poedervormige producten met behulp van elektrostatische precipitatoren.

Voor het meten van submicron aërosolen wordt een diffusiebatterij gebruikt (zie figuur 1). Hiermee kunnen deeltjes van 0.002 tot 0.2 μm gemeten worden. Dit apparaat is gebaseerd op het feit dat een aërosoldeeltje onderhevig is aan Brownse beweging door het bombardement van gasmoleculen tegen het deeltje, terwijl er een netto transport, diffusie, van aërosoldeeltjes optreedt bij aanwezigheid van een concentratiegradiënt. Hoe kleiner het deeltje, hoe groter de diffusiecoëfficiënt. Als een aërosol laminair door een buisje stroomt zullen door de Brownse beweging deeltjes tegen de wand botsen en afgevangen worden. Bij een bepaalde doorstroomsnelheid zullen deeltjes naarmate ze kleiner worden beter afgevangen worden. Dit wiskundig geformuleerde feit wordt bij de diffusiebatterij gebruikt voor het meten van de diameter van aërosoldeeltjes. In de industrie speelt het diffusiemechanisme een zeer belangrijke rol bij de filtratie van submicron deeltjes.

Bij een diffusiebatterij kan de deeltjesconcentratie voor en na doorgang door het instrument gemeten worden met een condensatiekernen-teller (Condensation Nuclei Counter, CNC). Deze is gebaseerd op het feit dat bij een oververzadigde water- of alcohol damp condensatie optreedt op deeltjes groter dan een bepaalde minimum diameter. De oververzadiging kan gecreëerd worden door een verzadigd aërosol te koelen door adiabatische expansie of op een andere manier. De betreffende deeltjes groeien aan tot een grootte die met behulp van optische technieken gedetecteerd, dus geteld kan worden. Het is in dit verband interessant, dat in de atmosfeer condensatie om hele kleine deeltjes het primaire mechanisme is voor wolkvorming.

Zoals in figuur 1 is aangegeven, kunnen aërosoldeeltjes die ergens opgevangen zijn, ook met behulp van microscopie bestudeerd worden. Aan de hand van figuur 1 kan nog iets gezegd worden over

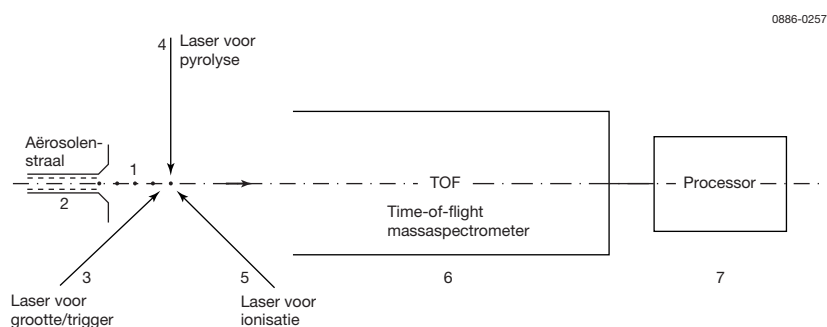
optische detectiemethoden en elektronenmicroscopie. Er is een groep van instrumenten die gebaseerd zijn op de optische eigenschappen van aërosolen. Deeltjes, zwevend in de lucht, dus aërosoldeeltjes, die door een lichtbundel worden verlicht, verstrooien en absorberen een deel van dat licht. De intensiteit van de bundel wordt verminderd. Bepaalde instrumenten maken hier gebruik van om de deeltjesconcentratie in een aërosol, zoals de lucht, te meten. De optische eigenschappen van aërosolen zijn natuurlijk ook verantwoordelijk voor het verminderd zicht dat met luchtverontreiniging gepaard gaat. Heel vaak ook worden optische deeltjestellers voor individuele deeltjes gebruikt. Een deeltje in een gefocuseerde lichtbundel verstrooit het licht. Dit verstrooide licht wordt op een detector opgevangen. De intensiteit van het verstrooide licht is een functie van de deeltjesgrootte.

Momenteel is er veel belangstelling voor de vorming van heel kleine deeltjes in de orde van grootte van nanometers uit de gasfase, zowel bij de vorming van atmosferische aërosolen als bij het vervaardigen van poeders via de aërosolen. Er wordt nu dan ook veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van instrumenten die de grootte van deeltjes beneden de 10 nm kunnen meten. We hebben al gezien welke fysische mechanismen van belang zijn voor het gedrag van ultrafijne aërosoldeeltjes. Dit zijn de Brownse beweging, diffusie, elektrische krachten op geladen deeltjes, condensatie op kleine deeltjes (heterogene condensatie) en de nog niet genoemde thermoforese en coagulatie. Thermoforese is de beweging van deeltjes ten gevolge van een temperatuurgradiënt in het omringende gas. Coagulatie van aërosolen is het proces waarbij aërosoldeeltjes met elkaar in aanraking komen, aan elkaar gaan zitten en zodoende grotere deeltjes vormen. Veel pogingen worden gedaan om de bestaande methoden, gebaseerd op deze mechanismen, te verfijnen.

Tegelijkertijd vinden nog vele andere ontwikkelingen plaats. Men onderzoekt bijvoorbeeld de mogelijkheden van zogenaamde niet-elastische lichtverstrooiing bij de analyse van aërosolen. Hierbij is de frequentie van het verstrooide licht niet dezelfde als de frequentie van het opvallende licht. Bij het onderzoek en de fabricage van elektronische componenten zoals chips werkt men in schone ruimten, cleanrooms. Het valt niet mee om daarin toch nog iets zinvol te kunnen meten met betrekking tot concentratie en grootte van de per

volume nog maar zeer beperkt aanwezige aërosoldeeltjes. Verschillende methoden worden getest, zoals het concentreren van de aanwezige deeltjes in een kleiner volume of het gebruik van een optische deeltjesteller, waarin de lichtstraal een aantal malen gereflecteerd wordt om een veel groter meetvolume te creëren, zodat de kans op detectie van een deeltje sterk vergroot wordt.

Voor bijvoorbeeld tijdsafhankelijke deeltjesvormingsprocessen zou het zeer gunstig zijn als één apparaat direct grootte én chemische samenstelling van de individuele aërosoldeeltjes kan bepalen. Zo'n instrument is op de TU-Delft ontwikkeld. Figuur 3 geeft een schema van het instrument.



Figuur 3. Ontwerp van een instrument voor gelijktijdige analyse van deeltjesgrootte en chemische samenstelling.

Een bundel aërosoldeeltjes (1) wordt gegenereerd door de aërosol via een capillair (2) in een vacuüm te expanderen. Een aërosoldeeltje passeert dan eerst een laserstraal van lage energie (3). Het door het deeltje verstrooide licht geeft niet alleen informatie over de grootte van het deeltje, maar laat ogenblikkelijk een hoge energielaser een flits geven. De laserflits fragmenteert het deeltje en ioniseert de fragmenten gedeeltelijk. Een derde laser (5) kan de ionisatie nog verbeteren. De resulterende ionen worden geanalyseerd met behulp van een zogenaamde time-of-flight (TOF) massaspectrometer. De verwerking gebeurt via de computer (7). Het resultaat is dat zonder tijdverlies de grootte en chemische samenstelling van individuele deeltjes worden gemeten.

Het is al lang bekend dat de lading van aërosoldeeltjes een grote

invloed heeft op het gedrag en het effect van de aërosol. Hieraan is echter over het algemeen weinig aandacht besteed. Het wordt steeds duidelijker dat lading een belangrijke rol speelt in veel aërosolprocessen, zoals wolkvorming, bemonstering, binnenhuis depositie, enzovoort. Ook wordt door een aantal onderzoekers gesteld dat in de atmosferisch biologische processen, de lading op deeltjes een veelbetekenende rol speelt. Wereldwijd zijn er dan ook verschillende onderzoeksgroepen bezig met geladen deeltjes, opladingsmechanismen en de ontwikkeling van meetapparatuur.

Het woord aërosol is al vaak gevallen in verband met de atmosfeer. Toch leek het er een aantal jaren geleden op dat de echte onderzoeksinteresse op dit gebied tanende was. Maar sinds de vraag of menselijke activiteiten het klimaat kunnen beïnvloeden serieus genomen wordt, staan naast de „broeikasgassen” ook de aërosolen in de atmosfeer weer volop in de belangstelling. Omdat, zoals gezegd, vermoed wordt dat ook de lading op deeltjes belangrijk is voor atmosferische processen, zal ook die invloed erbij betrokken moeten worden.

Een ander belangrijk aspect is dat recente epidemiologische studies aangeven dat er negatieve gezondheidseffecten optreden bij veel lagere concentraties van aërosoldeeltjes dan de bestaande luchtkwaliteitsstandaard. Ook wordt er op gewezen dat deeltjes kleiner en zelfs veel kleiner dan $1\ \mu\text{m}$ absoluut niet verwaarloosd mogen worden. Verder staan tegenwoordig ook de zogenaamde bio-aërosolen, gevormd door virussen, bacteriën, sporen, plantenresten, enzovoort, en ook door textielvezels, producten van waterzuiveraars en dergelijke, in de belangstelling, omdat zij een aanzienlijk deel uitmaken van het totaal.

In het voorafgaande is geen onderscheid gemaakt tussen buiten- en binnen-aërosolen (werkplek, woonomgeving). Het concept is hetzelfde, alhoewel er natuurlijk specifieke situaties optreden.

3. Moderne ontwikkelingen en toepassingen

De laatste 50 jaar is er veel werk verzet om iets meer te begrijpen van het gedrag van aërosolen. Meetinstrumenten zijn ontworpen, theorieën en modellen ontwikkeld. Het doel van al dat onderzoek was er

vooral op gericht om de schadelijke effecten van aërosolen op de gezondheid en het milieu beter te kunnen inschatten en tegen te gaan. De op die manier opgedane kennis wordt inmiddels ook gebruikt voor de productie van materialen, vooral in poedervorm, met speciale eigenschappen en toepassingen. Het is heel aantrekkelijk om materialen te maken via aërosolen omdat er geen grote, lastige vloeistofvolumes bij komen kijken zoals in de natte chemische productieprocessen. Verder kunnen er kleine en zeer zuivere deeltjes worden geproduceerd. In wezen is de productievorm via aërosolen al heel oud. Een paar duizend jaar voor onze jaartelling werd roetzwart eigenlijk via een aërosolproces gemaakt door de Chinezen. Zij verbrandden plantaardige oliën in een zuurstofarme vlam en schraapten daarna het afgezette roet van de koudere oppervlakken in de buurt. In de recentere geschiedenis zijn meer aërosolprocessen ontwikkeld, maar door de ontwikkeling van de aërosolwetenschap kunnen bekende processen nu worden verbeterd, beheerst en voorspeld, terwijl nieuwe processen ontwikkeld kunnen worden. Bij de productie van materialen langs de aërosolroute zijn twee vormen van omzetting te onderscheiden, afhankelijk van het uitgangsmateriaal: de gas-naar-deeltje en de druppeltje-naar-vast-deeltje omzetting.

3.1. Gas-naar-deeltje omzetting

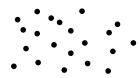
Figuur 4 geeft een overzicht van de verschillende processtappen. Bij de gas-naar-deeltje omzetting worden de deeltjes „opgebouwd” uit individuele moleculen in de gasfase. De drijvende kracht achter het deeltjesvormingsproces is de vorming van nieuwe moleculen vanuit een uitgangsgas door een chemische reactie of de snelle afkoeling van een damp. Er vindt nucleatie plaats van de productmoleculen. Deze kernen groeien verder door condensatie en/of coagulatie. Als de zo ontstane primaire (ronde) deeltjes afkoelen vormen ze door botsing aggregaten die op hun beurt door botsingen weer de lossere agglomeraten vormen. De hoge temperaturen, die nodig zijn voor de reacties, worden afhankelijk van het type reactor op verschillende manieren bereikt. Zo zijn er vlamreactoren, plasmareactoren, laserreactoren en elektrische ovenreactoren.

Grote hoeveelheden poeders worden industrieel op deze manier ge-

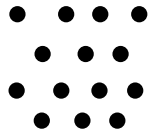
173-12 Aërosolen

0886-0258

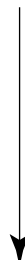
Damp of gas (moleculen)



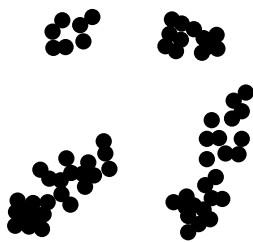
Chemische reactie of fysisch creëren van overzadiging nucleatie, condensatie, coagulatie



Primaire deeltjes



Aggregatie)
) Botsen
Agglomeratie)



Eindproduct (poeder)

Figuur 4. Gas-naar-deeltje omzetting.

maakt. Een belangrijk product is roetzwart. Natuurlijk wordt de primitieve methode van de oude Chinezen niet meer gebruikt. Momenteel vindt voornamelijk het vlamovenproces plaats. Als grondstof wordt een aromatische residuele olie in een hete gas-luchtvlam verneveld; daarbij worden roetdeeltjes gevormd door het uiteenvalen van de koolwaterstoffen en de aangroeiing tot deeltjes. Het gas met roetdeeltjes wordt snel afgekoeld en de roetdeeltjes worden opgevangen met elektrostatische precipitatoren, cyclonen of zakfilters. Verschillende soorten roet kunnen gemaakt worden door reactie-temperatuur en verblijftijd te veranderen. Roetzwart wordt veel gebruikt als zwart pigment in onder andere inkt en verf. Voorts wordt het ook in grote hoeveelheden als versterker gebruikt in rubber. Als men bedenkt dat in iedere autoband een paar kilogram roet wordt gebruikt is het niet vreemd dat alleen voor deze toepassing wereldwijd al verschillende miljoenen tonnen per jaar worden geconsumeerd. Een ander belangrijk product dat op deze manier wordt bereid en waarvan jaarlijks vele duizenden tonnen wordt geproduceerd, is een fijnkorrelig siliciumdioxide (in het Engels „Fumed Silica”). Het wordt in allerlei producten gebruikt zoals in silicone rubbers, glasfiber reinforced polyester resins, cake mixes, tandpasta, enzovoort. Het wordt gemaakt door siliciumtetrachloride in een waterstofvlam te laten reageren.

Zoals reeds genoemd is een van de voordelen van het aërosolproces dat het milieu veel minder belast wordt dan door de natte processen. Dat is een belangrijke reden dat de productie van titaandioxide, dat vroeger door een vloeistofprecipitatie proces (sulfaatproces) werd vervaardigd, vervangen wordt door een aërosolproces (vlamproces). Gezuiverd titaantetrachloride wordt verbrand en de gevormde deeltjes worden afgevangen in doekfilters. Chloor uit de afvalgasstroom wordt gerecirculeerd naar de reactor om er het rutielerts mee te chloreren. De gereinigde gasstroom kan worden uitgestoten in de atmosfeer en er is bijna geen afvalwater. Enkele miljoenen tonnen titaandioxide worden jaarlijks over de hele wereld verbruikt. Het is een belangrijk wit pigment bijvoorbeeld in verven en kunststof. Het geperfectioneerde aërosolproces levert een nauwe deeltjesgrootteverdeling, een goed gecontroleerde deeltjesdiameter en een kristalvorm op, die een optimaal resultaat geven in verf, papier, kunststof, enzovoort.

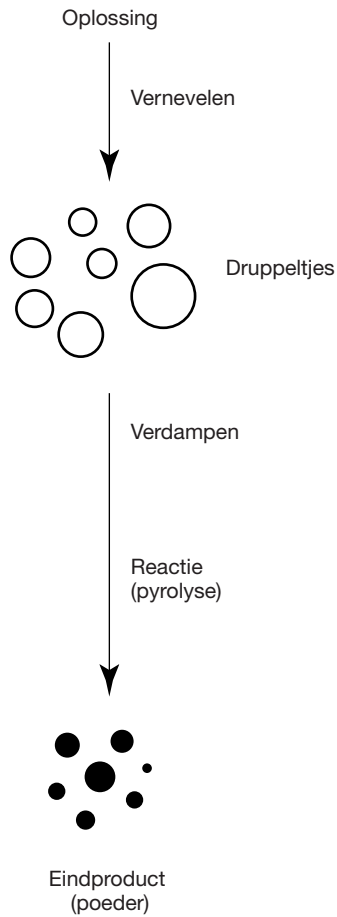
De milieuoverwegingen spelen bij de productie van uraniumoxiden een nog grotere rol dan bij TiO_2 . Hier lijkt de natte route zeer in het nadeel ten opzichte van de aërosolroute, waarbij uraniumhexafluoride in een vlam wordt geoxideerd. Van het zo gevormde poeder worden pellets geperst en gesinterd voor gebruik in nucleaire reactoren. De gasemissies van dit droge proces kunnen beter en goedkoper gereinigd worden dan de vloeistof afvalstromen die vrijkomen bij vloeistofprecipitatie-processen.

De opmars van de optische vezels voor de transmissie van lichtsignalen over lange afstanden en met minimale vervormingen is mede mogelijk door de aërosoltechnologie. De zeer zuivere SiO_2 vezels met een kleine toevoeging van germaniumdioxide om een radiale variatie in brekingsindex te creëren, worden via de aërosolroute gemaakt door de fijn gevormde deeltjes op een substraat neer te laten slaan, waardoor een voorvorm ontstaat die wordt gesinterd en waaruit vezels worden getrokken.

Een van de meest veelbelovende structurele keramieken is siliciumnitride, Si_3N_4 , wegens zijn sterkte bij hoge temperaturen, thermische schokbestendigheid en chemische stabiliteit. Deze keramiek is daarom een belangrijke kandidaat voor toepassingen bij hoge temperaturen zoals lichtgewicht motoronderdelen. Onzuiverheden in de poeders kunnen nadelig zijn. Aan de TU-Delft wordt de vorming van dit poeder bestudeerd langs de aërosolroute met laserverhitting. Karakteristiek voor de gasfasereactie met laserverhitting is een goed gedefinieerde reactiezone die de beheersing van samenstelling, grootte alsook de deeltjesgrootteverdeling vergemakkelijkt. Ook resulteert deze reactie, omdat het proces in een koude-wand-reactor plaatsvindt, in een lage concentratie van onzuiverheden in de poeders. Het blijkt dat een economisch rendabele productie van Si_3N_4 mogelijk is, uitgaande van het gechlloreerde silaan SiH_2Cl_2 en NH_3 .

3.2. *Druppeltje-naar-vast-deeltje omzetting*

Figuur 5 geeft een overzicht van de verschillende processtappen. De eerste stap is het vernevelen van een oplossing, waarna de druppeltjes verhit worden, zodat het oplosmiddel kan verdampen en kristallisatie van de opgeloste stof plaatsvindt. Naast het bekende sproeidrogen en vriesdrogen bestaat er de sproeipyrolyse waarbij de



Figuur 5. Druppeltje-naar-vast-deeltje omzetting.

uitgangproducten in het deeltje nog een reactie ondergaan en zo het gewenste poeder opleveren. Deze productiemethoden bieden veel voordelen en industriële mogelijkheden. Omdat een oplossing als uitgangsmateriaal gebruikt wordt zijn de druppeltjes en de poederdeeltjes homogeen van samenstelling, de reactietijd bedraagt seconden en het poeder kan continu geproduceerd worden. Organische en

anorganische materialen kunnen gebruikt worden en het is mogelijk allerlei multicomponent-materialen te vormen. Wel moet er rekening mee gehouden worden dat onder bepaalde omstandigheden poreuze of holle deeltjes gevormd worden. Verder dient uitgegaan te worden van de druppelgrootteverdeling van het vernevelen. Wel worden weer niet geagglomererde deeltjes gemaakt en er kan een hoge graad van zuiverheid worden bereikt omdat malen niet nodig is. Deze deeltjes zijn dus uitermate geschikt voor keramische materialen.

Deze bereidingsmethode van sproeien en pyrolyse is zeer geschikt voor de synthese van metaaloxiden uit in water opgeloste metaalzouten. Commercieel wordt de methode gebruikt voor de productie van MgO en ferrietpoeders en op laboratoriumschaal wordt veel onderzoek gedaan naar de bereiding van hoge kwaliteits enkelvoudige en samengestelde oxidepoeders. Met name dienen supergeleidende oxides genoemd te worden. Een mooi voorbeeld is het IBM-onderzoek naar de productie van fijn $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ -poeder voor de vervaardiging van supergeleidende keramieken.

Over het algemeen vindt nu veel onderzoek plaats om na te gaan hoe door manipulatie van de verschillende parameters, poeders met de gewenste eigenschappen kunnen worden gemaakt.

Belangrijke parameters zijn de droogsnelheid van de druppeltjes, de druppeltjesgrootte en -verdeling. Primair worden deze laatste bepaald door de vernevelaar die gebruikt wordt. En hoewel er heel wat vernevelingstechnieken bestaan, denk bijvoorbeeld aan de simpele parfumverstuiver, zijn de conventionele technieken niet geschikt voor de productie van grote hoeveelheden redelijk uniforme submicronpoeders, omdat de meeste een brede distributie en relatief grote druppeltjes genereren. De laatste jaren is er daarom veel onderzoek gedaan naar de zogenaamde elektrostatische sproeier. Deze ziet er als volgt uit. Hij bestaat uit een vloeistofreservoir met aan de onderkant een metalen buisje (nozzle, interne diameter bijv. 0,2 mm). Als het reservoir gevuld wordt met vloeistof zal de tuit gaan druppelen. Wanneer nu een potentiaalverschil van een aantal kV's wordt aangelegd tussen de tuit en een plaat op een aantal centimeters van de tuit, zal een druppel die aan de tuit hangt, veranderen in een kegel (zie figuur 6). De straal die gevormd wordt aan de punt van de kegel, breekt op in vele zeer kleine druppeltjes, die allemaal onge-

veer even groot kunnen zijn. De druppeltjes bezitten een grote lading. Dit is vlak na de generatie heel gunstig, omdat ze door elkaar af te stoten goed dispergeren. Om ze daarna echter hanteerbaar te maken moeten ze ontladen worden. Daarom wordt er in plaats van een geaarde plaat een geaarde naald gebruikt. Door het hoge elektrische veld rond de naald ontstaat daar een corona-ontlading. Hierin ontstaan tegengesteld geladen ionen, die in het veld van de naald af bewegen, de druppeltjes tegenkomen en ontladen. Voor stabiliteit is er nog een ring geplaatst tussen de tuit en de naald. De belangrijkste parameters in het elektrospinning-proces zijn de vloeistofstroomsterkte, de elektrische geleidbaarheid en de oppervlaktespanning van de vloeistof. Behalve voor gebruik bij spraypyrolyse zijn er vele andere toepassingen voor het elektrostatisch sproeien te bedenken. Gedacht kan worden aan bijvoorbeeld medicinale vernevelaars, productie van fotografisch papier en het maken van bolletjes voor het calibreren van instrumenten, het maken van gestructureerde materialen en het toedienen van pesticiden aan gewassen. Ook lijkt het een aangewezen methode om mee te doen in de race voor het maken van nano-deeltjes. Deze kleine deeltjes hebben andere elektronische, optische en magnetische eigenschappen dan het bulkmateriaal en er worden veel toepassingen voor verwacht. Er vinden dus zeer opwindende ontwikkelingen plaats in de aërosolwereld en het ziet er naar uit dat het nog slechts een begin is. De uitbreiding van de aërosoltechnologie met de synthese van materialen maakt weer veel andere uitdagende ontwikkelingen noodzakelijk. Deze houden bijvoorbeeld in het „realtime” meten van deeltjesgrootten en -distributies bij zeer hoge concentraties en hoge temperaturen, de productie van grote hoeveelheden submicrondeeltjes met een zeer nauwe specificatie, het beschrijven van niet ronde deeltjes, enzovoort.

4. Literatuur

- Hinds, William C., *Aërosol Technology, Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, Inc., 1999, 2nd ed.

173–18 Aërosolen

- Marijnissen, Jan C. M., „Nieuwe ontwikkelingen in de aerosol-technologie belicht”, de Ingenieur, jaargang 104, nr. 3, maart 1992.
- Vincent, James H., Aërosol Sampling, Science and Practice, John Wiley & Sons, 1989. – Willeke, Klaus en Paul A. Baron (ed's), Aërosol Measurements, Principles, Techniques and Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.