

Renaissance in de keramische technologie

Citation for published version (APA):

Stuijts, A. L. (1969). *Renaissance in de keramische technologie*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1969

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

RENAISSANCE
IN DE
KERAMISCHE TECHNOLOGIE

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN
HET AMBT VAN BUITENGEWOON HOGLERAAR
IN DE AFDELING DER
SCHEIKUNDIGE TECHNOLOGIE
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL
TE EINDHOVEN
OP VRIJDAG 9 MEI 1969

DOOR

IR. A. L. STUIJTS

*Mijne Heren Curatoren,
Mijnheer de Rector Magnificus,
Mijne Heren Hoogleraren en Lectoren,
Dames en Heren Leden van de Wetenschappelijke,
Technische en Administratieve Staven,
Dames en Heren Studenten,
en voorts
Gij allen die door Uw aanwezigheid blijkt geeft
van Uw belangstelling,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Vaste stoffen hebben bij de ontwikkeling van de mens een zó belangrijke rol gespeeld dat tijdperken ernaar zijn genoemd: het stenen, het bronzen en het ijzeren tijdperk. Men kan zich afvragen in welk materiaaltijdperk wij nu leven. Stevils heeft al eens de mogelijkheid genoemd dat wij aan de vooravond staan van het glazen tijdperk.

De beschikbaarheid van materialen heeft in vele gevallen het uiterlijk van een cultuur bepaald. Evenzeer geldt dit voor de belangrijke technische ontwikkelingen van de laatste eeuw. De groei van de spoorwegen, en later ook van de auto, was sterk gekoppeld aan de productie van ijzer; de namen chemins de fer of Eisenbahnen drukken dit nog fraai uit. De vliegtuigindustrie kon zich pas goed gaan ontwikkelen door het beschikbaar zijn van aluminiumlegeringen. De gloeilamp kwam als verlichtingsbron pas echt in algemeen gebruik na het toepassen van wolfram als gloeidraadmateriaal.

Uit de genoemde voorbeelden kunt U terecht concluderen dat metalen een overwegende invloed hebben gehad op de belangrijke technische ontwikkelingen. Sinds omstreeks 1950 is er een nieuw tijdperk in de materiaalkunde ontstaan, waarin vele nieuwe materialen zijn ontwikkeld door uit te gaan van bestaande wetenschappelijke principe's. Tot omstreeks 1950 werden de legeringen met speciale eigenschappen, zoals zachte en harde magnetische legeringen, hoge temperatuur legeringen, slijtvaste materialen, vrijwel uitsluitend verkregen door empirisch onderzoek. De fabrikant van wolfram-

draden voor gloeilampen van rond 1950 beschikte weliswaar over een hoge graad van vakmanschap, maar ook de klokkengieter in het oude China was al een redelijk goed vakman. Generaliserend meen ik dat er wetenschappelijk gezien ook niet zoveel verschil is. Dit blijkt bijvoorbeeld als men de kleine toevoeging van een verontreiniging aan het wolfram beschouwt, die ervoor dient om draadbreek door uitzakken van kristallen te verhinderen. Dit is op volkomen toevallige wijze ontstaan en draadbreek wordt op even mystieke wijze beheerst als de fraaie klank van de klok van de Chinese klokkengieter. Immers, in het gedicht, dat in het oude China blijkbaar als fabrikagerecept diende, werd deze opgeroepen door het noodlottige offer van zijn beeldschone dochter.

Niettemin is er in de periode vóór 1950 zeer veel wetenschappelijk werk verricht op metaalkundig gebied dat de basis is geweest voor belangrijke recente materiaalontwikkelingen. Misschien kan ik wel zeggen dat de praktische metaalkunde een te vergaande mate van technische ontwikkeling had bereikt, om nog direct toegankelijk te zijn voor fysisch onderzoek. Daardoor is het ook pas enige jaren geleden mogelijk geworden om de magnetische structuur van een complexe legering als Ticonal te begrijpen.

In de moderne materiaalontwikkelingen heeft verder de vaste-stof fysica een essentiële rol gespeeld. Deze is eerst na de tweede wereldoorlog tot volle bloei gekomen en heeft onder andere geleid tot de ontwikkeling van brandstoffen voor kernenergie, materialen met speciale ferromagnetische en ferroelektrische eigenschappen, en belangrijke halfgeleidende materialen. Van deze laatste groep is de transistor een bekend voorbeeld. De ontwikkeling in de vaste-stof fysica is tot stand gekomen door een nauwe samenwerking tussen fysici en chemici, waarmee het mogelijk is geworden om vele intrinsieke eigenschappen van vaste stoffen, aan de hand van een goed atomair beeld, te begrijpen.

Nu worden de potentiële eigenschappen van een materiaal bepaald door zijn chemische samenstelling of de kristalstructuur. Dit wil zeggen, of een materiaal halfgeleidend, magnetisch, stabiel bij hoge temperaturen of doorzichtig is, hangt in de eerste plaats af van de chemische samenstelling of de kristalstructuur van het metaal, de legering of de verbinding.

Reeds in het begin van de twintiger jaren was het de metaalkundigen duidelijk geworden, dat de werkelijk belangrijke technische eigen-

schappen bepaald worden door de structuur van het materiaal. Hiermee wordt niet de kristalstructuur bedoeld, maar de aggregatietoestand en de verdeling van de fasen die het materiaal opbouwen. Vaak wordt hiervoor de term *mikrostructuur* gebruikt. De studie van de mikrostructuur van metalen en legeringen, en van het verband met hun samenstelling en hun fysische en mechanische eigenschappen wordt metallografie genoemd.

Deze conceptie, dat de technische belangrijke eigenschappen van materialen ook in hoge mate afhangen van de mikrostructuur, geldt algemeen voor de moderne materialen. Het klinkt als een tautologie bij composietmaterialen.

Uitgaande van deze gedachte wordt het in principe mogelijk om materialen te synthetiseren die nauwkeurig voldoen aan de eisen die de toepassing stelt, mits aan twee voorwaarden is voldaan. In de eerste plaats is het nodig dat het verband tussen de gewenste eigenschappen en de daarvoor vereiste mikrostructuur kwantitatief geformuleerd kan worden. En in de tweede plaats is het nodig dat de gewenste structuur inderdaad reproduceerbaar en economisch gerealiseerd kan worden.

Zowel de fysica van de vaste stof, die het verband legt tussen mikrostructuur en eigenschappen, als de fysische metaalkunde, die de studie van het ontstaan van de mikrostructuren omvat, hebben de basis gelegd voor de ontwikkelingen in de moderne materiaaltechnologie. Er is namelijk vooral sinds 1950 een bijzonder grote invloed geweest van vraagstellingen in de verschillende gebieden van technische ontwikkeling op de materiaalontwikkeling zelf. Het meest verrassende is daarbij geweest dat, door het genoemde wetenschappelijke onderzoek, in vele gevallen voldoende basiskennis aanwezig bleek te zijn om met succes aan de vraagstelling te kunnen voldoen. De mogelijkheid om materialen „naar maat” te kunnen leveren betekent natuurlijk een belangrijke vooruitgang. Voor de gebruiker, de electronicus, de werktuigbouwer, de vliegtuigbouwer, de kernfysicus, is dit een ideale situatie: het is dan niet meer nodig zich in de uitwerking van het systeem aan te passen aan de beschikbare materialen. Integendeel, nu kunnen meer en meer „custom-tailored” materialen worden verkregen, die aan de uit het technische probleem voortvloeiende eisen voldoen.

Voor de praktijk heeft deze ontwikkeling uiteraard grote consequenties. Industriën die de essentiële rol van het wetenschappelijk

materiaalonderzoek tijdig hebben ingezien, hebben daardoor een grote voorsprong gekregen. In de lucht- en de ruimtevaart is het normaal geworden om het materiaalonderzoek en de materiaalontwikkeling als een essentieel onderdeel van hun nieuwe projecten te beschouwen. De opbouw van de instituten voor kernenergie getuigt van dezelfde visie. In vele landen is daar echter zóveel mankracht aan ten koste gelegd, dat men er nu met een overcapaciteit aan research zit. Men probeert er nu de verkregen kennis op het gebied van het beheersen van materiaaleigenschappen toe te passen op ruime schaal in de nationale industrie, buiten het specifieke gebied van de kernenergie.

De keramische materialen spelen in de bedoelde materiaalrenaissance mede een essentiële rol. Voor de meeste mensen is keramiek nog synoniem met aardewerk of porselein, produkten met een zeer oude geschiedenis. Keramiek in deze traditionele zin is nog steeds het produkt van een belangrijke industrietak. Ook Nederland heeft keramisch in vele opzichten een goede geschiedenis. Zij leverde, en levert nog, vele produkten die een wereldnaam hebben. De thans bloeiende Association Européenne de Céramique is door Van Thiel de Vries, vlak na de tweede wereldoorlog, opgericht. De Nederlandse Keramische Vereniging heeft, tezamen met haar Engelse zusterorganisatie, de start gegeven voor de Europese bijeenkomsten over de wetenschappelijke achtergronden van de keramiek.

Maar vandaag houdt het begrip keramiek méér in dan de traditionele keramische materialen, die allen klei als grondstof bevatten. De moderne keramische materialen betreffen een zeer groot gebied van anorganische verbindingen en mengverbindingen, waarbij de oxyden de boventoon voeren. Ook grafiet wordt er bij gerekend, evenals een aantal carbides, nitrides, borides, silicides, en andere verbindingen. Er wordt steeds méér gebruik gemaakt van de unieke eigenschappen ervan. Zij zijn zeer hard, hebben een grote weerstand tegen slijtage of erosie, zij hebben een grote sterkte bij hoge temperaturen, zij zijn chemisch inert, en hebben vaak opmerkelijke elektrische en magnetische eigenschappen. Het is een zeer heterogene groep materialen, met een zeer heterogeen toepassingsgebied. De American Ceramic Society heeft serieus getracht een andere benaming te vinden voor keramiek. Het beste dat zij kon vinden was „inorganic, nonmetallic materials”; maar de aanwezigheid van twee ontkenningen in één

benaming leek niet zo gunstig. En dus spreken wij van keramische materialen, die met de traditionele keramische materialen een groot aantal kenmerken gemeenschappelijk hebben.

De meeste keramische produkten worden uit poeders vervaardigd, en de poedertechnologie is altijd het werkgebied van de keramicus geweest. Door het brosse karakter van keramische materialen is slijpen de enige mogelijkheid om de gesinterde produkten te bewerken, hetgeen een kostbare zaak is. Toepassing van het keramisch proces heeft het grote voordeel dat bij de produktie vormgeving mogelijk is. Uitgaande van poedervormige grondstoffen wordt een produkt gevormd, dat circa 50% poriën bevat en nog een lage sterkte heeft. Door het produkt bij hoge temperatuur te verhitten neemt het porievolume af tot minder dan 10% en neemt de sterkte aanzienlijk toe. Bij de vormgeving moet met de krimp, die tijdens het sinterproces optreedt, rekening worden gehouden. In vele gevallen is de toepassing van een keramisch proces ook nodig omdat in een smeltproces, door het hoge smeltpunt van de verbindingen, problemen ontstaan door ontledingsreakties. Een typerend verschil met de traditionele keramiek is misschien wel het feit, dat de esthetische maatstaf als belangrijkste norm, vervangen is door het begrip tolerantie.

De eerste groep van moderne keramische materialen wordt gevormd door de ferrieten, materialen afgeleid van het mineraal magnetiet. De combinatie van goede magnetische en elektrische eigenschappen maakt het mogelijk deze ferrieten bij hoge frequenties te gaan toepassen, waar met metallische magnetische materialen problemen ontstaan. In de ontwikkeling van deze materialen hebben vele onderzoekers in het Natuurkundig Laboratorium van Philips een groot aandeel gehad. Bovendien is het een fraai voorbeeld van samenspel tussen vaste-stof fysici en chemici.

Als tweede groep kwamen de materialen met een hoge diëlektrische constante, waarvan het bariümtitanaat een typisch voorbeeld is.

Een derde groep zijn de kernsplijtstoffen. De ontwikkeling van de kernenergie stelt specifieke eisen voor nauwkeurige beheersing van eigenschappen en samenstelling van materialen, zoals refraktaire uraniumverbindingen, berylliumoxyde, en ook grafiet. Het uraan-dioxyde is onbetwistbaar de kernenergiebrandstof voor nu en voor de naaste toekomst.

Verder is er in de laatste tien jaren een enorme behoefte gekomen

aan kennis van het gedrag en het fabricageproces van een groot aantal anorganische, niet-metallische materialen. Dit geldt voor de elektronische industrie, speciaal voor de ontwikkeling van computers, de lucht- en ruimtevaart, de optische industrie, maar ook voor de meer alledaagse gebieden, zoals de serviesgoedindustrie. In het bijzonder komen hierbij naar voren de zuivere oxyden en een aantal speciale glazen.

Het is nog steeds gebruikelijk polykristallijne materialen, verkregen met een keramisch proces, toe te passen, ook al komt de synthese van eenkristallen in aanmerking. Dit is vaak nodig, omdat de synthese van eenkristallen slechts in enkele gevallen industrieel aantrekkelijk is. Vaak zijn zeer ingewikkelde samenstellingen nodig om precies de gewenste eigenschappen te verkrijgen. Het voordeel van een keramisch proces is dan, dat het in principe veel eenvoudiger en ook economischer is om voldoende homogene produkten op grote schaal te produceren. Maar de keuze van een keramisch proces betekent het introduceren van een aantal mikrostruktuurparameters.

In de traditionale keramische produkten is de vorming van een smeltfase vrijwel steeds essentieel om het sinterproces van de hoogsmeltende hoofdfase bij redelijke temperaturen mogelijk te maken. In de nieuwe keramische produkten, die dus als een klasse van materialen beschouwd kunnen worden en niet zozeer als de produkten van een speciale tak van de industrie, worden smeltfasen in het algemeen als ongunstig beschouwd om tot een beheersing van de fysische eigenschappen te komen.

Voorbeelden van mikrostruktuurparameters zijn: de grootte van de samenstellende kristallieten, hun grootteverdeling, de aanwezigheid van grenzen tussen de kristallieten, de mogelijkheid van kristallografische voorkeursoriëntaties van de kristallieten, zoals in het permanent magnetische bariumhexaferriet, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, en verder de aanwezigheid van een zekere restporositeit.

De porositeit kan op vele manieren aanwezig zijn. De poriën kunnen zéér klein zijn ten opzichte van de kristallieten, maar ook relatief groot. De poriën kunnen uitsluitend op korrelgrenzen aanwezig zijn, ofwel geheel binnen de kristallieten. Een van de meest eenvoudige voorbeelden van de beïnvloeding van een fysische eigenschap door poriën is de verstrooiing van lichtstralen. In aluminiumoxyde, dat een relatief hoge brekingsindex heeft, neemt de lichtdoorlating af tot 0,01% bij een restporositeit van 3%. Zelfs bij 0,3% porositeit is de lichtdoorlating nog maar 10% van die van een volledig dicht materiaal.

In hoeverre deze elementen van de mikrostruktuur van een keramisch materiaal de fysische en mechanische eigenschappen beïnvloeden is een punt van onderzoek van de materiaalwetenschappen. Soms is het verband zeer complex ofwel experimenteel moeilijk toegankelijk. Zeer interessant bij de moderne keramische materialen zijn die gevallen waar de aard van de mikrostruktuur essentieel is om een gewenste fysische eigenschap te bereiken. Bijvoorbeeld de noodzaak voor veel korrelgrenzen, ofwel een textuur van de kristaloriëntaties.

Waarde toeboorders,

Ik wil nu met U enige basiselementen beschouwen die de mikrostructuren van keramische materialen bepalen.

De mikrostruktuur komt tot stand tijdens het sinterproces van een stapeling van kleine poederdeeltjes, al dan niet in een bepaalde vorm samengeperst. Het vrije oppervlak van een stof vertegenwoordigt een extra hoeveelheid energie, de oppervlakte-energie. Het verschil in oppervlakte-energie tussen een poeder en een eenkristal levert de drijvende kracht voor een aantal thermisch geactiveerde processen, waarvan sinteren en korrelgroei de belangrijkste zijn.

Door het sinterproces kunnen de poederdeeltjes in een geperst produkt samengroeien en worden de open ruimten, de poriën, met materiaal gevuld. Daardoor vertoont het produkt een makroskopische krimp. De hoeveelheid energie die voor het sinterproces beschikbaar is, wordt bepaald door het oppervlak van het poeder. Tenminste in hoofdzaak. Omdat deze oppervlakte-energie slechts gering is, niet meer dan circa 1 calorie per gramatoom, betekent dit dat een voldoende hoge *sinterreactiviteit* slechts bereikt wordt bij voldoende kleine deeltjes. In het algemeen ligt de gewenste deeltjesgrootte beneden 1 mikron.

Deze eerste voorwaarde stelt aan de technische uitvoering van het proces direkt al grote eisen, omdat het hanteren van deze fijne poeders in de praktijk grote moeilijkheden levert. Bij het sinterproces moeten de holten tussen de poederdeeltjes, de poriën, met materiaal gevuld worden om stevige en dichte produkten te krijgen. Dit betekent dat voor een goed verloop van het sinteren de pakking van de deeltjes, door verdichting bij het vormgevingsproces, zodanig moet worden, dat een produkt met zo homogeen mogelijk verdeelde

en kleine poriën ontstaat. Door de slechte loopeigenschappen van fijne poeders wordt het vormgevingsproces in niet geringe mate gecompliceerd.

Om de poriën met materiaal te kunnen vullen is materiaaltransport nodig. In zijn eenvoudigste vorm kan het sinterproces vergeleken worden met het samenvloeien van vloeistofdruppels die met elkaar in contact gebracht worden. Bij vloeistofdruppels is dit proces goed te begrijpen, omdat de vloeistofstroming onder invloed van de oppervlaktetenspanning tot stand komt. De enige weerstand voor dit materiaaltransport is de viscositeit van de vloeistof. Maar hoe is dit in een samenstel van poederdeeltjes?

In zijn oorspronkelijke betekenis is het verschijnsel sinteren steeds in samenhang gebracht met het optreden van vloeibare fasen bij verhitten, waardoor het geheel van de poedermassa verstevigd werd. De naam sinteren is hier ook van afgeleid. Het is echter gebleken dat, alhoewel hier vloeibare fasen optreden, het verdichtingsproces niet door makroskopische vloeistofstromingen veroorzaakt wordt. Het proces blijkt eerder te maken te hebben met het oplossen van de vaste fase in deze vloeistoffase, en weer precipiteren. Een belangrijk probleem blijft dan vast te stellen hoe het materiaaltransport plaats vindt in de systemen waar géén vloeibare fasen gevormd worden, met name dus de systemen die kenmerkend zijn voor de moderne keramische producten.

Na vele jaren van fenomenologische studies is in 1945 door de Russische onderzoeker Frenkel de basis gelegd voor een wetenschappelijke benadering van het sinteren van vaste stoffen. Hij gaf een afleiding van de vorming en de groei van het contactoppervlak tussen twee bolvormige deeltjes, onder invloed van de oppervlaktetenspanning, voor een mechanisme van viskeuse vloeï. Een jaar later gaf Pines een uitbreiding aan deze theorie met een analyse van de concentraties van puntfouten in vaste stoffen met verschillend gekromde oppervlakken. In de daarop volgende jaren is er zeer veel vruchtbaar theoretisch en experimenteel werk verricht over de mechanismen die het materiaaltransport bij het sinteren bepalen. Dit werk, begonnen voor metaalpoeders door Kuczynski en gevolgd door vele fraaie onderzoekingen van andere Amerikaanse onderzoekers, zoals Kingery en medewerkers, is gebaseerd op modelexperimenten en uitgevoerd voor verschillende groepen van materialen, metalen, oxyden, glas, en

ionogene verbindingen zoals kaliumchloride. Hierdoor zijn de basismechanismen voor het materiaaltransport goed bekend geworden.

Uit deze onderzoeken is ook gebleken dat het voornaamste mechanisme dat de krimp van kristallijne materialen bij het sinteren verklaren kan, berust op diffusie van de componenten van de verbinding door de bulk van het materiaal. De mogelijkheid dat sinteren bepaald wordt door volumediffusie, en dus puntfouten in het rooster belangrijk zijn, werd dus wel ingezien, maar de juiste interpretatie ervan heeft nog betrekkelijk lang op zich laten wachten. Het was namelijk wél duidelijk waar de materiestroom naar toe moest, maar niet waar deze vandaan kwam. De veronderstelling dat de materie van het buitenoppervlak van het voorwerp naar binnen wordt getransporteerd, bleek niet houdbaar. Het sinteren zou dan trager moeten verlopen dan waargenomen wordt, en bovendien wordt er geen afhankelijkheid van de sintersnelheid van de grootte van het voorwerp gevonden.

Nu was in diezelfde periode de theorie van Nabarro-Herring bekend geworden. Deze theorie geeft een verklaring van de deformatie van een polykristallijn metaal, bij verhoogde temperatuur, onder invloed van een uitwendige druk. Door deze zogenaamde mikrokruip blijken diffusiestromen in de kristallieten te ontstaan, waarbij materiaal wordt getransporteerd van korrelgrenzen die onder druk staan, naar andere die onder trek staan. Deze korrelgrenzen, de grensvlakken tussen naburige kristallieten, spelen in het verloop van het proces een essentiële rol. Een kleine korrelgrootte is zeer gunstig voor dit mechanisme.

Met deze theorie werd het mogelijk het sintergedrag van kristallijne stoffen te begrijpen. Het is de verdienste van Burke geweest om een duidelijk verband te leggen tussen het gedrag van de korrelgrenzen tijdens het sinterproces en het sinterresultaat. Bij de temperaturen waarbij het sinterproces wordt uitgevoerd, kan namelijk ook korrelgroei gaan optreden, waarvoor de grensvlakenergie tussen naburige kristallieten de drijvende kracht levert. Door korrelgroei moet de diffusie dus over grotere afstanden gaan plaatsvinden.

Hoewel normale groeiprocessen, ook korrelvergroving, steeds zó verlopen dat de grote groeien ten koste van de kleine, blijven die processen op beheerste wijze verlopen zolang de groeikansen voor alle kristallieten ongeveer gelijk zijn. Deze regel geldt geheel algemeen

en kan ook een goed uitgangspunt vormen voor een sociaal beleid.

Uit mikroskopische waarnemingen merkte Burke op, dat tijdens het sinterproces een bepaalde vorm van korrelgroei kan optreden, die fataal is voor een verdere verdichting van het materiaal. Het blijkt dat soms enkele kristallen, om redenen die nog niet geheel duidelijk zijn, vrij plotseling kunnen uitgroeien tot betrekkelijk grote afmetingen. Doordat ze tijdens hun groei de poriën in het kristal insluiten, wordt het belangrijke Nabarro-Herring-mechanisme onwerkzaam.

Het hier bedoelde verschijnsel, waarbij enkele kristallen uitgroeien tot afmetingen die veel groter zijn dan de kristallen in de matrix, treedt zeer vaak op in kristallijne materialen en heeft in de literatuur verschillende namen gekregen. Eén van de meeste karakteristieke namen is wel die, welke aansluit bij zijn onbeheerste karakter, namelijk kannibalistische groei.

Er zijn enkele uitzonderingsgevallen waar deze vorm van korrelgroei gewenst is. Belangrijker echter zijn de inzichten van Burke over deze processen, die hebben geleid tot de stelling dat voor een goed verloop van het sinterproces het beheersen van korrelgroei essentieel is. Op grond van zijn inzichten slaagde Coble erin aluminiumoxyde volledig dicht te sinteren door een kleine toevoeging van magnesiumoxyde. Dit betekende een doorbraak in de praktijk van het sinteren.

Het belangrijke technische resultaat van het werk van Coble was de mogelijkheid om het reeds lang bekende aluminiumoxyde nu te gaan gebruiken als lampomhulling voor hoge-temperatuur natriumlampen. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van het hoge smeltpunt, de grote weerstand tegen chemische aantasting en de redelijk grote sterkte bij hoge temperaturen van het aluminiumoxyde. Door het materiaal geheel porievrij te sinteren kan het doorschijnend gemaakt worden voor doorvallend licht. Lampen met dit doorschijnende aluminiumoxyde als omhulling geven een zeer fraai wit licht en een hoog lichtrendement. Het is typerend voor de verdere ontwikkeling van het sinteren van velerlei keramische produkten geworden, dat men de beheersing van het proces is gaan uitdrukken in de transparantie van het verkregen product. In deze gevallen heeft het wetenschappelijk onderzoek dus in letterlijke zin geleid tot doorzicht!

Er is uiteraard in de keramische wereld een rage ontstaan om het effect van toevoegingen op het sinter- en korrelgroeiedrag te gaan bestuderen. In de meeste gevallen met een negatief resultaat, soms

niet toepasbaar door de aanwezige tweede fase. Overigens hadden eigen resultaten met het dichtsinteren van magnetische spinellen al laten zien, dat er andere mogelijkheden waren om tot beheersing van sinterprocessen te komen. Omdat deze materialen ondoorzichtig zijn, althans voor licht in het zichtbare deel van het spectrum, kon dit resultaat niet op de gebruikelijke wijze in de sinterwereld worden gepresenteerd in de standaardterm van transparantie. Naast dit geval zijn er intussen vele andere voorbeelden bekend, waar dichtsinteren mogelijk is geweest zonder dat er een toevoeging nodig was.

Waarschijnlijk moeten deze resultaten als volgt geïnterpreteerd worden. Sinteren en korrelgroei zijn twee processen die tegelijkertijd optreden. Voor een goed sinterresultaat moeten de omstandigheden daarom zó gekozen worden, dat de voorwaarden voor een snel verloopend sinterproces aanwezig zijn. In de eerste plaats dienen zeer fijne poeders, met een hoge sinterreactiviteit, gebruikt te worden. Vervolgens moet het geperste produkt zo homogeen mogelijk zijn, om geen problemen op te roepen door lokale variaties in de sintersnelheid. Tenslotte is het sinteren van kristallijne stoffen een diffusieproces en het is bekend dat daarvoor lege roosterplaatsen, ook wel vakatures genoemd, nodig zijn.

Het is sinds enige jaren duidelijk geworden dat in dit laatste opzicht ionenverbindingen zich kenmerkend onderscheiden van metalen. In metalen is de concentratie van vakatures meestal uitsluitend van de temperatuur afhankelijk en daardoor niet goed onafhankelijk instelbaar. Daarentegen zijn in ionogene kristallen vaak grote afwijkingen van de zogenaamde stoëchiometrische samenstelling mogelijk. De concentraties van de roosterfouten in het kristal worden nu niet alleen door de temperatuur bepaald, maar hangen ook af van de gekozen chemische samenstelling. Uit recente onderzoeken van Reijnen is gebleken dat, omdat voor optimaal sintergedrag zowel kationen als anionen getransporteerd moeten worden, de keuze van de roostervakatures, en de concentratie ervan uiterst belangrijk is. Opmerkelijk is bijvoorbeeld dat de toevoeging van magnesiumoxyde aan aluminiumoxyde de juiste roostervakatures voor goede sinterbaarheid levert!

De grote waarde van de hiervoren geschetste inzichten is, dat voor de praktijk duidelijk regels zijn te geven om een goed sinterresultaat mogelijk te maken. Het is op dit moment nog niet duidelijk vast te stellen of een effect van korrelgroeiremming, door een geschikt

gekozen verontreiniging, op zichzelf voldoende is voor een goed sinterresultaat. In tegenstelling tot het regelen van de stoëchiometrie, is op grond van de beschikbare kennis van korrelgroeiverschijnselen géén duidelijke praktische richtlijn aan te geven om daarmee het sinterresultaat te verbeteren.

Dames en Heren,

Ik heb U in het voorgaande een beeld gegeven van een aantal basisaspecten van het sinterproces, die de uiteindelijke mikrostructuur bepalen. Door de grote verscheidenheid in materialen en toepassingen is er een groot aantal, soms zeer complexe, sinterverschijnselen die hier buiten beschouwing moeten blijven. Zij vormen een boeiend gebied voor de onderzoeker die de mikrostructuren in de materialen wil begrijpen vanuit de optredende processen. Ik wil nu een aantal punten naar voren brengen die kenmerkend zijn voor de technologie van moderne keramische materialen, waarbij materiaalsynthese „naar maat” voorop staat.

In de eerste plaats hebben de inzichten geleid tot een levendige interesse in de ontwikkeling van nieuwe processen voor de synthese van grondstoffen en verbindingen. Het maken van sinterreactieve poeders op klassieke wijze, door mengen, voorstoken en malen, levert slechts beperkte mogelijkheden op. Bovendien is het zo, dat de inzichten over de rol van vakatures alleen maar dan kunnen worden toegepast, als de gekozen chemische samenstelling inderdaad hun aard en concentratie bepaalt. Verontreinigingen kunnen dan zeer storend werken en „p.p.m.” is nu in dit gebied ook een normaal gehanteerd begrip geworden. De ontwikkeling van processen voor de bereiding van grondstoffen, waarbij de zuiverheid bewaard blijft of een zuivering tijdens het proces plaats vindt, en waarin de chemische samenstelling goed kan worden beheerst en ingesteld, is in volle gang. In het gebied van de elektronische materialen is er een grote belangstelling voor de bereiding van verbindingen via sproeidrogen of vriesdrogen van gemengde zouten. In de kernenergie is het sol-gel proces tot ontwikkeling gekomen met unieke mogelijkheden. Al deze processen kunnen leiden tot poeders met grote zuiverheid en hoge sinterreactiviteit.

De poeders die met deze processen worden verkregen, lenen zich

niet altijd voor toepassing in een normaal vormgevingsproces. Vaak is het niet mogelijk om ze tot een gewenste hoge dichtheid te persen. Met het sol-gel proces kunnen uiterst fraaie bolletjes, met afmetingen tussen enkele mikrons en enkele millimeters worden verkregen. Het is echter nog niet goed gelukt de intrinsieke voordelen van dit proces te behouden wanneer men andere vormen wil maken. Daarom is het nodig vormgeving, en wel speciaal de invloed van de karakteristieke kenmerken van de gebruikte poeders op de verdichting, in studie te nemen. Ik zie daarin een van de hoofdlijnen in mijn onderzoektaak.

Van groot belang tenslotte is de ontwikkeling van processen, waarmee mikrostructuren kunnen worden gevormd, die met het normale proces nauwelijks of in het geheel niet, realiseerbaar zijn. Ik denk hierbij aan materialen met een kristallografische textuur van de samenstellende kristallieten, zoals vereist voor optimale eigenschappen van de hexagonale permanent magnetische ferrieten. Andere voorbeelden zijn verbindingen met vluchtige componenten, of verbindingen waarbij men niet vrij is om de chemische samenstelling te kiezen om een goede sinterbaarheid te verkrijgen. Ook wil men vaak materialen met een gering porievolume en toch een zeer kleine kristallietgrootte. Voor vele van deze gevallen hebben processen, waarbij tegelijk hoge temperatuur en hoge druk wordt toegepast, grote betekenis. Door de toegepaste uitwendige druk kan de sintertemperatuur aanzienlijk worden verlaagd en daardoor de korrelgroei sterk onderdrukt. Hierdoor zijn vele materialen met interessante eigenschappen verkregen. Bijvoorbeeld mikrogolfferrieten voor hoog-vermogen toepassingen; magnesiumoxyde met zeer hoge mechanische sterkte; fijnkristallijn aluminiumoxyde voor keramische beitels; het piezoelektrische materiaal kalium-natriumniobaat, dat op normale wijze niet gesinterd kan worden.

Waarde toeboorders,

In het voorgaande heb ik de renaissance in de keramische technologie beschreven: zij is een typisch voorbeeld van de wijze waarop vele nieuwe materialen in de moderne techniek ontstaan en worden gebruikt. Kenmerkend in de verschillende materiaaltechnologieën is het beheersen van fysische en mechanische eigenschappen door het beheersen van mikrostructuren. Voor de synthese van materialen is

het essentieel de processen, die de vorming van deze structuren bepalen, te beheersen. Dit is produkt- en proceskunde beide, waarbij de taak voor de technoloog in de eerste plaats is ervoor te zorgen dat hij, of zij, het industrieel meest geschikte proces weet aan te geven om in een materiaal de gewenste mikrostructuur te verkrijgen.

Ik wil hier graag mijn gedachten naar voren brengen over de opleiding van scheikundig ingenieurs, gezien vanuit de materiaaltechnologie. Ik kom hier op een moeilijk terrein, al was het alleen maar op grond van het feit, dat hierbij begrippen gehanteerd worden die niet exact geformuleerd zijn. Zelf ben ik in Delft opgeleid tot scheikundig ingenieur of technoloog. Ik heb mijzelf altijd als technoloog beschouwd, uitgaande van een definitie van technologie die blijkbaar sterk aan het veranderen is, namelijk: „technologie is de toepassing van wetenschappelijke methoden en kennis op praktische of industriële problemen, ter bevrediging van onze materiële behoeften en wensen. Het resultaat is nieuwe processen en nieuwe produkten”.

Het is een essentieel kenmerk in de technologie van materialen, dat de problemen vanuit minstens twee disciplines geformuleerd worden. Als de opleiding voor scheikundig ingenieur er niet bewust naar streeft, in een richting te gaan, waarbij het verband met problemen in andere disciplines gezocht wordt, dan zullen deze disciplines zélf hun materiaalontwikkeling ter hand gaan nemen. Omdat dit een grote versnippering met zich meebrengt over de verschillende vakgebieden, lijkt mij dit niet gunstig. Bovendien wijst dit op een onjuist inzicht in materiaalbeheersing. Waar het op aankomt is materiaalkunde, niet op materialenkennis, en daarin heeft chemie een wezenlijke taak. De materiaalkunde vraagt ook niet om een eigen specialistische opleiding. Integendeel, het streven zou eerder moeten zijn naar een ingenieursopleiding die zo breed mogelijk aan de basis is. Hierdoor wordt het mogelijk dat de personen in de verschillende disciplines elkaars terrein leren kennen en waarderen en dat zij met elkaar kunnen samenwerken.

Ik wil verder opmerken dat de scheikundig ingenieur niet voor één bepaalde tak van de industrie, de chemische industrie, dient te worden opgeleid. Het is tegenwoordig niet ongewoon verbazing te zien bij een toehoorder, ook zelfs bij vakgenoten, als ik vertel als scheikundige bij een elektronische industrie te werken. Maar het is toch ook niet ongewoon dat een fysicus of een elektrotechnicus in een

chemische industrie werkt? In de innovatiecyclus van een bedrijf als Philips speelt de chemie zelfs zo'n belangrijke rol, dat ca. 30% van de wetenschappelijke medewerkers in het Natuurkundig Laboratorium scheikundigen zijn.

Ik meen dat er een fout beeld van de chemie gebracht wordt. Zij wordt teveel vereenzelvigd met chemische produkten, met iets wat „verontreinigt”, met een industrie die nodig is om economische motieven, maar verder alleen maar gevaarlijke stoffen maakt. Fysica en biochemie winnen de sympathie van het publiek door op duidelijke wijze naar voren te brengen, wat hun resultaat voor de gemeenschap betekent. Het is van groot belang om goede doelstellingen naar voren te brengen, anders dan alleen maar het economische belang. Waarom dan niet van eigenschappen spreken, in plaats van voor het publiek onbegrijpelijke verbindingen?

Ik weet mij gesteund door George S. Hammond van het Californian Institute of Technology, die kort geleden een duidelijke waarschuwing liet horen over de onzekere toekomst van de chemie. Hij noemt het droeve voorbeeld van de auto: „a marvel for engineers and a shame for chemists”. Men heeft er géén begrip van hoeveel chemie in een dergelijk produkt gestopt is, om het maar populair te zeggen.

Een ander probleem bij de technologie van materialen, zeker ook de keramische, ligt in het feit dat in vele gevallen stukgoederen worden gefabriceerd en géén bulkgoederen. Optimalisatie wordt in de eerste plaats gevonden in de eigenschappen. De economische optimalisatie kan pas gevonden worden in het grotere systeem waarin deze materialen een functie verrichten.

In de opleiding voor scheikundig ingenieur zijn deze aspecten van materiaaltechnologie wat op de achtergrond geraakt, en is de opleiding meer en meer gericht op de procesindustrie. Nu wordt procesindustrie tegenwoordig vaak gedefinieerd op een wijze die wèl typerend is voor de puur chemische industrie, maar niet voor de gehele procesindustrie. Hiermee bedoel ik dan een omschrijving als: „zij werkt in grote produktie-eenheden, met een continue materiestroom, levert uitgangprodukten voor volgende industrieën”. Het lijkt mij juist dit te noemen de „chemische procesindustrie”, als onderdeel van de gehele procesindustrie. Deze is de industrie waar materie veranderd wordt van chemische samenstelling en/of fysische toestand. Zij maakt óók verbruiksprodukten, zoals voedingsmiddelen, pharmaceutica, en, wat collega Van de Berg uit Delft mij eens noemde, de „fysicaliën”

zoals de elektrotechnische industrie ze gebruikt. Zij is duidelijk te onderscheiden van de mechanische industrie, die vormen maakt.

De reden voor de overwegende aandacht voor de chemische procesindustrie ligt in het volgende. De fysische technologie heeft het mogelijk gemaakt de technische uitvoering van chemische processen op industriële schaal een wetenschappelijke basis te geven. De resultaten worden vooral gevonden daar, waar bulkgoederen gehanteerd worden, zoals typisch is voor de chemische procesindustrie. Door de sterke groei van deze industrietak heeft dit grote betekenis.

Ik meen echter dat de fysische aanpak van processen een veel breder toepassingsgebied geeft dan uitsluitend voor bulkgoederen. Vanuit de fysische technologie moet het mogelijk zijn om aansluiting te vinden óók bij de gebieden die stukgoederen produceren. In deze industrieën worden een groot aantal mechanische bewerkingen uitgevoerd, zoals mengen, malen, vormgeving, terwijl toch het proceskundig karakter voorop staat. Misschien is het mogelijk om bij Rietema aan te sluiten, en te spreken van „process engineering”, als een breder vakgebied dan „chemical process engineering”. In dit laatste geval worden uitsluitend bulkgoederen gehanteerd.

De beheersing van materialen moeten wij, naar mijn oordeel, op twee zuilen laten rusten. Dat zijn de fysische chemie, die de basis vormt voor de beheersing van de optredende reacties, en de fysische technologie, die de basisgegevens voor de uitvoering op technische schaal verschaft. In de Afdeling der Scheikundige Technologie wordt in beide groepen een goede basis gevonden voor de materiaaltechnologie. Het is ook dáárom dat mijn opdracht, de technologie van anorganische systemen, stoelt zowel op de afdeling voor fysische chemie als die voor fysische technologie. Ik hoop daarmee een bijdrage te kunnen leveren aan een gezonde verdere ontwikkeling van dit interessante gebied, waarin wij in Nederland een vooraanstaande rol in de wereld kunnen spelen.

Thans, bij de aanvaarding van mijn ambt, wil ik in de eerste plaats *Hare Majesteit de Koningin* eerbiedig danken voor mijn benoeming tot buitengewoon hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Mijne Heren Curatoren,

Voor het vertrouwen, dat U in mij hebt gesteld door mij voor te dragen voor de leerstoel van de technologie van anorganische systemen, ben ik U zeer erkentelijk. Ik verzeker U, dat ik mij volledig zal inzetten om Uw vertrouwen niet te beschamen.

Mijne Heren leden van de Senaat,

Ik reken het mij tot een grote eer om in Uw midden te worden opgenomen. Ik hoop in de toekomst velen van U beter te leren kennen, om een vruchtbaar contact tot stand te brengen. Het interdisciplinaire karakter van de materiaalkunde vraagt daarom.

Heren Hoogleraren en Lectoren, Dames en Heren leden van de Staf van de Afdeling der Scheikundige Technologie,

Speciaal ben ik getroffen door de serieuze wijze waarop de belangrijke zaken die in het onderwijs aan de orde zijn, door U allen worden aangepakt. De vriendschappelijke sfeer die bij U leeft maakt een open en eerlijke discussie mogelijk. Ik beschouw het daarom als een groot voorrecht in Uw team te mogen worden opgenomen. Ofschoon mijn aandeel nog slechts bescheiden kon zijn, hoop ik in de toekomst ook een bijdrage te kunnen leveren aan een goede opbouw van de Afdeling.

Waarde Rieck en Rietema,

Ik prijs mij gelukkig U reeds gedurende vele jaren te kennen. Ik verheug mij met U te mogen samenwerken, om de materiaaltechnologie een goede plaats te geven in de opleiding voor scheikundig ingenieur.

Hooggeleerde Korvezee, Hooggeleerde Burgers,

Ik wil U op deze plaats mijn dank betuigen voor hetgeen U gedaan hebt voor mij persoonlijk en voor mijn wetenschappelijke ontwikkeling. Het werk in Uw laboratorium heeft op mijn loopbaan een beslissende invloed gehad. Ik geloof niet dat ik een betere leerschool had kunnen vinden.

De Raad van Bestuur der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken en de Directie van het Natuurkundig Laboratorium ben ik dankbaar voor hun toestemming om het ambt van buitengewoon hoogleraar te mogen bekleden naast mijn bestaande werkzaamheden. Ik ben ervan over-

tuigd, dat mijn werkzaamheden aan de Technische Hogeschool een stimulans zullen zijn voor mijn werk op het Natuurkundig Laboratorium.

Waarde Rathenau,

U ben ik wel in bijzondere mate dankbaar voor de start die U mij gegeven heeft, nu 18 jaren geleden. De stimulerende wijze waarop U leiding gaf, zowel door het meegeven van de basisconcepties nodig voor goed experimenteel werk, als door het tonen van dankbaarheid voor verkregen resultaten, deden mij in het begin wel eens denken inderdaad in een paradijsachtige omgeving te werken. Speciaal in de laatste jaren heb ik, met U, kunnen ervaren dat het allerm minst een paradijs is, maar dat resultaten slechts verkregen worden door hardnekkig volhouden van moeizaam onderzoek, in met uiterste zorg gekozen programma's. Dat U ook nu steeds weer Uw dankbaarheid voor verkregen resultaten zo duidelijk toont, is voor ons allen een grote steun.

Dames en Heren Collega's en Medewerkers van het Natuurkundig Laboratorium, en van de Ontwikkelingslaboratoria van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken.

De functie die ik thans aanvaard is het resultaat van het vormingswerk dat U gedurende vele jaren hebt verricht. Met de kennis die ik daarbij heb opgedaan hoop ik nu anderen enthousiast te kunnen maken voor ons vakgebied.

In het bijzonder, wil ik U, *Meerkamp van Embden* en *Haaijman*, mijn erkentelijkheid betuigen voor de wijze waarop U mij gesteund hebt, om het gebied van de materiaaltechnologie verder uit te bouwen.

Dames en Heren Studenten,

Wat wij hier vanmiddag meemaken, is de voortzetting van een traditie die, naar mijn mening, géén vooruitgang op wezenlijke punten in de weg staat. Misschien had ik mij eerder in mijn verhaal al tot U kunnen richten. Maar tradities doorbreken alléén maar om het anders te willen doen, heeft geen zin. Er zijn belangrijker problemen. Zo heb ik in mijn verhaal gewezen op een probleem in de ingenieursopleidingen, dat nog niet serieus genoeg in discussie is. Namelijk of de huidige indeling in de verschillende specialisaties wel zo gewenst is. Moet een ingenieur inderdaad een specialist zijn, wiens kennis een halfwaardetijd heeft van 10 jaren? Of moet een ingenieur

een onbeschreven blad zijn, maar met een brede basisopleiding?

In discussies over deze problemen reken ik op Uw medewerking, waarbij het tevens mijn taak zal zijn U enthousiast te maken voor het gebied van de materiaaltechnologie. Ik ben te allen tijde bereid, voor zover het in mijn vermogen ligt, met U van gedachten te wisselen over deze problematiek.

Ik dank U voor Uw aandacht.