

Keramik - van klei tot supergeleider

Keramik, een verzamelnaam voor bepaalde materialen die uit ten minste twee verschillende elementen bestaan, kom je overal tegen - van oude en moderne kunst tot supergeleiders in het natuurkundelaboratorium. Wat is keramik precies, en wat maakt deze klasse van materialen zo bijzonder?



Afbeelding 1. Porseleinen vaas met Delfts blauw glazuur. Foto: [Les Haines](#).

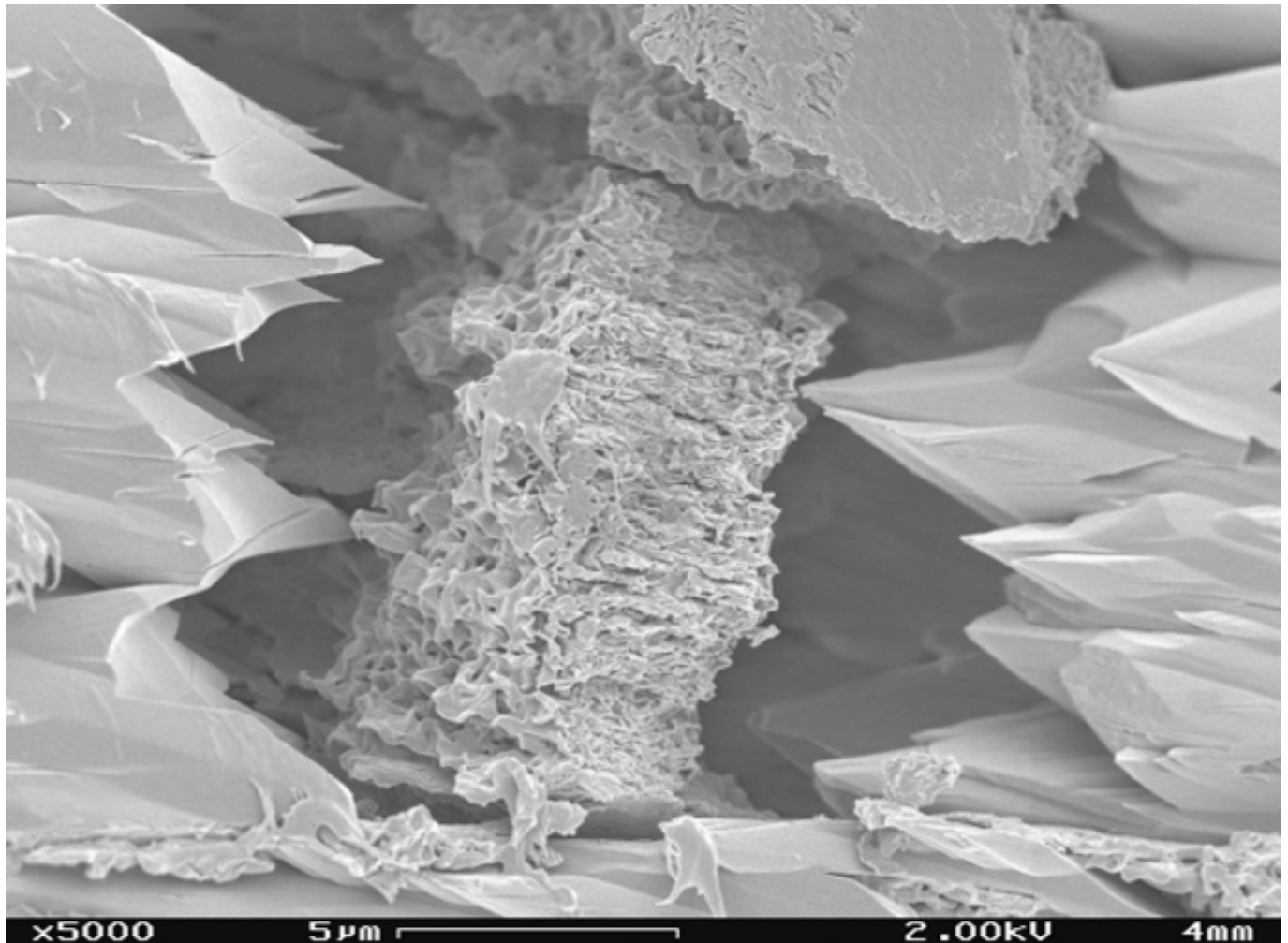
Het vorige artikel dat ik schreef voor de Quantum Universe-website ging over [quantum-licht-kunst](#). Quantumfysica en kunst zijn twee disciplines die ogenschijnlijk weinig met elkaar te maken hebben. Het liet mij denken aan andere raakvlakken tussen het domein van beeldende vorming en de fysica. Daarom duik ik nu nog eens in de kunst, of beter gezegd: de kunde van het beheersen van materialen.

Afgelopen december speelde James Robinson al met klei in zijn artikel [Klei legt uit: de tweede hoofdwet](#). Dat bracht mij ertoe om te kijken naar het proces waarmee materialen zoals glas, porselein en aardewerk worden gevormd. In dat proces schuilt verrassend veel (toegepaste) fysica. Al deze materialen vallen onder de verzamelnaam *keramik*.

Keramische fysica

Het maken van keramik is een traditioneel ambacht, waar klei (een mengsel van materialen) wordt samengevoegd, vervormd, gebakken, en gebruikt. Denk aan de vele vazen, schalen en kommen uit de oudheid. Ook porselein en glas vallen onder keramik.

Klei is een natuurlijk, fijnkorrelig materiaal (met deeltjes kleiner dan 4 micrometer), wat ontstaat door vertering van [veldspaat](#). De fysische stoffeigenschappen worden gekenmerkt door plasticiteit in natte toestand, veroorzaakt door water als smeermiddel tussen de plaatvormige deeltjes. Het materiaal is *thixotroop*: de [viscositeit](#) of stroperigheid neemt in de loop van de tijd af bij een constante [schuifspanning](#). Ook is het vormvast, en wordt klei hard (keramisch) bij drogen en bakken. Na extreme hitte (of druk) vervormt de klei dus tot keramik.



Afbeelding 2. Klei in de bodem. Een rastertunnelmicroscop maakte dit beeld van terrestrische bodem met een fyllosilicaatmineraal uit Koua Bocca, Ivoorkust, West-Afrika. Fyllosilicaten zijn hoofdbestanddelen van klei en spelen een cruciale rol in de bodemvorming en de stabilisatie van organische koolstof. Deze bodem vertoont verrassend genoeg overigens enkele overeenkomsten met de bodem van Mars die door de Phoenix Lander is opgeschept. De afbeelding is ongeveer 23 micrometer breed. Afbeelding: [NASA/JPL-Caltech/University of Arizona](#).

Keramik bestaat uit niet-metaalatomen die een onregelmatig glasachtig of geordend kristallijn rooster vormen, vaak omschreven als een “eindeloos groot molecuul”. Deze roosters ontstaan door verhitting van minimaal twee elementen, soms in combinatie met verhoogde [druk](#). Deze hitte en/of druk veroorzaken een chemische reactie en vervormen de atomaire structuur van de klei. Een vereiste is dat een van deze elementen non-metallisch is. De ander mag zowel [metallisch](#) als non-metallisch zijn. Twee soorten bindingen ontstaan tijdens deze chemische reactie: sterke ionische (elektronen worden overgedragen van een

metaalatoom naar het niet-metaalatoom) en covalente bindingen (de atomen delen één of meerdere elektronenparen). Door deze sterke ionische en covalente bindingen ontstaat een rigide kristallijn of gedeeltelijk glasachtig netwerk. Dit geeft keramiek zijn typische eigenschappen: hoge hardheid, hoge temperatuurstabiliteit en brosheid.

Traditionele en technische keramiek

Tegenwoordig is keramiek het stadium van eenvoudig gebruiksvoorwerp of kunstvoorwerp allang voorbij. Afhankelijk van de microstructuur heeft het materiaal bijzondere magnetische, elektrische, optische of biochemische eigenschappen. Binnen de materiaalkunde wordt daardoor vaak onderscheid gemaakt tussen traditionele keramiek en technische keramiek (*advanced ceramics*). Dit onderscheid helpt om het brede domein van keramische materialen systematisch te beschrijven.

Traditionele keramiek wordt vervaardigd uit natuurlijke grondstoffen zoals klei en aardmineralen. Binnen deze categorie wordt meestal onderscheid gemaakt tussen grofkeramiek, zoals bakstenen en dakpannen, en fijnkeramiek, waaronder aardewerk, porselein en keramische kunstobjecten.

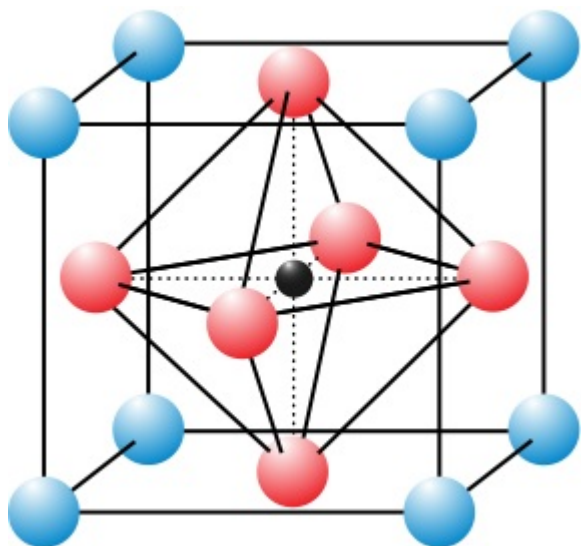
Technische keramiek wordt daarentegen ontwikkeld met specifieke materiaaleigenschappen of functies als doel. Deze materialen worden vaak synthetisch geproduceerd en kunnen sterk variëren in chemische samenstelling en fysische eigenschappen. Binnen deze groep onderscheidt men structurele keramiek, waarbij mechanische eigenschappen zoals sterkte, slijtvastheid en hittebestendigheid centraal staan, en functionele keramiek, waarbij eigenschappen zoals elektrische, magnetische, optische of biochemische functionaliteit bepalend zijn voor de toepassing. Al vroeg in de twintigste eeuw werd hittebestendig keramiek ingezet bij elektriciteitsmasten en centrales. Keramiek werd essentieel voor hoogspanningsisolatoren en elektronische componenten, vanwege de isolerende eigenschappen en hittebestendigheid. Mijn oma heeft nog drie oude kopstukken met schroefdraadbewerking in de tuin staan, die vroeger boven op een elektriciteitsmast bevestigd zaten.



Afbeelding 3. Keramische kopstukken. Drie keramische objecten gebruikt bij elektriciteitsmasten, gefotografeerd bij mijn oma in de schuur. Foto: Ariane Waitz.

Veelzijdig perovskiet

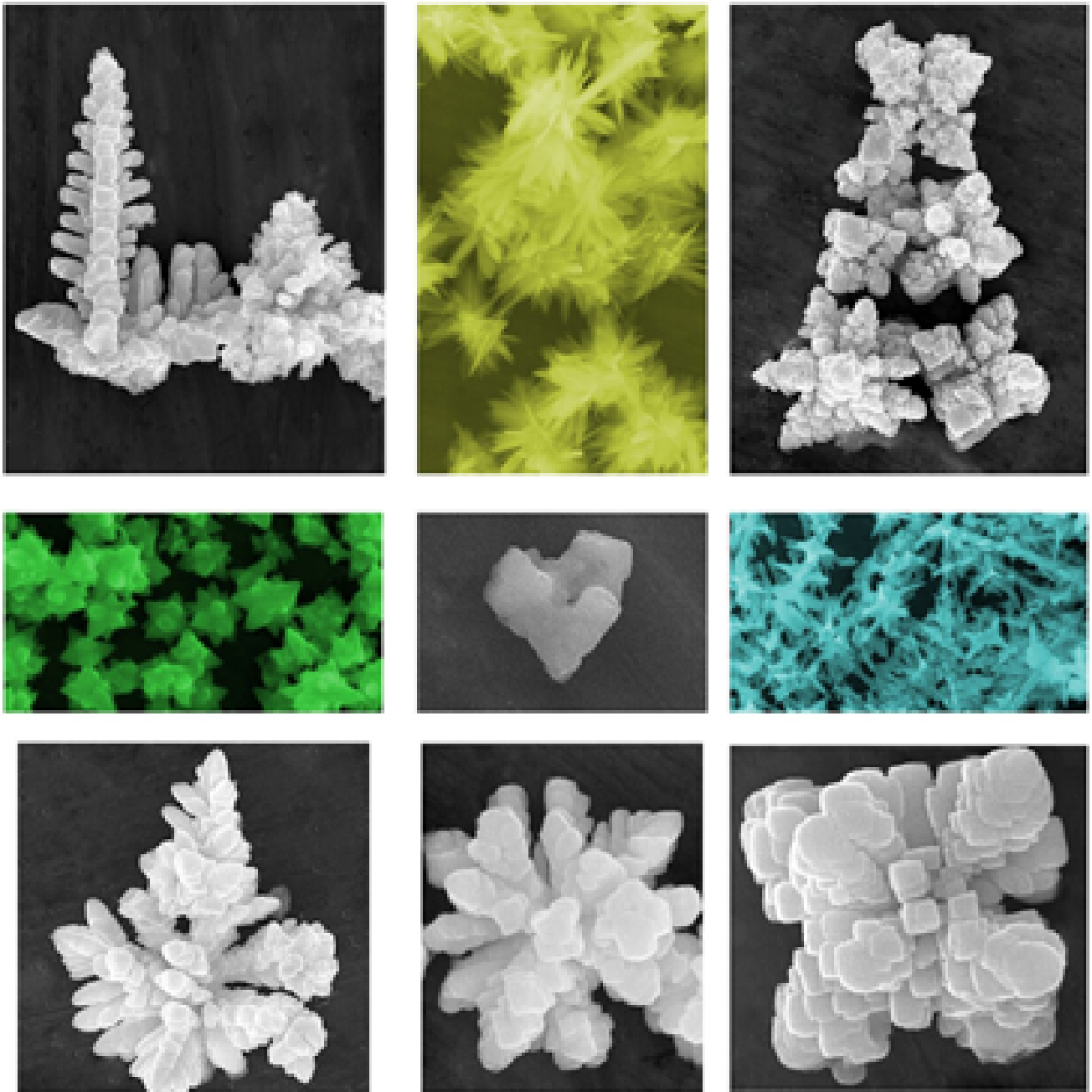
Bij keramische materialen is de microstructuur bepalend voor de toepassing – die kan namelijk bijzondere eigenschappen verschaffen. Een kristalstructuur die bij wetenschappers al decennia sterk in de belangstelling staat, is de perovskietstructuur. [Perovskiet](#) is een calciumtitaniumoxide (CaTiO_3). Stoffen met de algemene chemische formule ABX_3 kunnen een perovskietstructuur aannemen (zie afbeelding). In deze formule stelt A een groot en B een kleiner *kation* voor (een positief geladen ion) en X een *anion* (negatief geladen ion, ontstaan doordat een atoom of molecuul één of meer elektronen heeft opgenomen; meestal zuurstof) dat bindt met beide kationen.



Afbeelding 4. De perovskietstructuur. Afbeelding: Korjus, via [Wikimedia Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perovskite_crystal_structure.png).

De grootte van de verschillende ionen ten opzichte van elkaar, met name de ionstralen, bepalen voor een belangrijk deel hoe stabiel deze zogeheten *tetragonale* kristalstructuur is. Het kleine B-kation kan in het centrum van de uitgerekte kubus twee energetisch stabiele plaatsen innemen. Vervorming van de ideale structuur resulteert in een elektrische [dipool](#), die het perovskietkristal zijn bijzondere elektrische eigenschappen geeft. Andersom geeft een elektrische spanning over het kristal aanleiding tot vervorming. De flexibiliteit van de bindingshoeken in de structuur maken veel verschillende vervormingen mogelijk.

Materiaalkundigen hebben de afgelopen jaren talrijke en steeds complexere synthetische perovskieten ontwikkeld, zoals bariumtitanaat (BaTiO_3), wat een [diëlektrisch](#) keramisch materiaal is (een materiaal met zodanige elektrische eigenschappen dat de polarisatie ervan een overheersende rol speelt ten opzichte van elektrische geleiding en magnetisatie), wat toegepast wordt in [condensatoren](#).



Afbeelding 5. Bariumtitanaat. Beelden van deeltjes BaTiO_3 , gemaakt met behulp van een rastertunnelmicroscoop. De verschillende vormen ontstaan in reactie op de exacte synthese-omstandigheden, type reactie, temperatuur en oplosmiddel. Afbeelding: [M.T. Buscaglia, ICMATE-CNR](#).

Ook loodzirkonaattitanaat wordt ontwikkeld, een materiaal dat een elektrische respons vertoont wanneer er mechanische druk wordt uitgeoefend: mechanische spanning polariseert de kristallen, wat het [piëzo-elektrisch effect](#) wordt genoemd. Door de vervorming krijgt elk molecuul een elektrisch dipoolmoment. Perovskieten pas je toe om materialen

supergeleidende, magnetoresistente, ionisch geleidende of diëlektrische eigenschappen te geven. Keramische materialen die hun eigenschappen ontleen aan de perovskietstructuur worden gebruikt in micro-elektronica, maar ook in zonnecellen, leds, sensoren en lasers en in de toekomst mogelijk in nieuwe vormen van computergeheugen (zogenoemde *memristors*).

Technologische toepassingen



Afbeelding 6. Hitteschildtegels op Space Shuttle Discovery. Foto: Jonathan Cutrer, via [Wikimedia Commons](#).

Een voorbeeld van structurele technische keramiek zijn de hittebestendige tegels die werden gebruikt in de ruimtevaart. Space Shuttles waren aan de onderzijde bedekt met ongeveer 24.000 keramische hitteschild-tegels. Tijdens de terugkeer in de aardatmosfeer kan door luchtwrijving de temperatuur aan de buitenkant van de Shuttle oplopen tot meer dan 1.600 °C. De keramische tegels dienden als thermisch beschermingssysteem en voorkwamen dat de structuur van het ruimtevaartuig door de extreme hitte beschadigd raakte. Zelfs kleine beschadigingen konden echter ernstige gevolgen hebben: het verlies of falen van één tegel kon al leiden tot kritieke schade, zoals tragisch bleek bij de [Columbia-ramp in 2003](#).

Keramische supergeleiders

Keramische [supergeleiders](#) behoren tot de zogeheten koperoxide-supergeleiders (cupraten). Hun kristalstructuur bevat lagen van koper- en zuurstofatomen die een belangrijke rol spelen in het supergeleidingsmechanisme. Wanneer het materiaal tot onder de kritische temperatuur wordt gekoeld, verdwijnen elektrische weerstand en energieverlies volledig, waardoor elektrische stroom kan blijven circuleren.

Deze cupraten geleiden bij relatief hoge temperaturen zonder weerstand. Een bekend voorbeeld is yttrium-barium-koperoxide ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, vaak afgekort tot YBCO). In tegenstelling tot klassieke metallische supergeleiders functioneert dit YBCO bij temperaturen vanaf 92 K (ongeveer -181°C), waardoor het kan worden gekoeld met vloeibare stikstof in plaats van het veel duurdere vloeibare helium. Hoe het kan dat dit YBCO supergeleidt bij deze relatief hoge temperatuur is nog onbekend. Misschien is de oorzaak te vinden in “ondeeltjes”, zoals Jans Henke ooit beschreef: [Weerstandloze geleiding met ondeeltjes](#).



Afbeelding 7. Een yttrium-barium-koperoxide kristal. Foto: Maxim Bilovitskiy, via [Wikimedia Commons](#).

Een belangrijk verschil met metallische supergeleiders is dat deze materialen keramisch en bros zijn. Daardoor zijn ze moeilijk mechanisch te vervormen of tot flexibele draden te verwerken.

Dit probleem kwam ook al voor bij keramik als kunstvorm - daarom zijn kopjes, schalen en vazen vaak voorzien van glazuur. Glazuren is het aanbrengen van een glasachtige laag die na verhitting zorgt voor een waterdichte, beschermende en decoratieve afwerking. Ook *sinteren* wordt gebruikt om traditioneel keramik sterker te maken: een proces waarbij materiaalkorrels in de oven verhit worden tot net onder het smeltpunt, waardoor ze samensmelten tot een dichte, sterke structuur. De productie van keramische supergeleiders gebeurt meestal via dit laatste proces van vaste-stofreacties. Hierbij worden poeders van de juiste metaaloxiden gemengd en vervolgens gecalcineerd en gesinterd bij temperaturen rond 900-950 °C. Tijdens dit proces vormen zich de gewenste kristalstructuren die noodzakelijk zijn voor supergeleiding. Keramische supergeleiders worden zo vaak als dunne films of coatings op flexibele metalen dragers aangebracht, waardoor ze toch bruikbaar worden in kabels of magnetische systemen.

Keramik vormt een bijzondere brug tussen kunst en natuurkunde. Van handgedraaide potten tot ruimtevaarttechnologie: de eigenschappen van keramik worden bepaald door atomaire bindingen, kristalstructuren en thermodynamische processen. Er wordt nu zelfs keramisch 3D-geprint, waardoor nog nauwkeurigere onderdelen gemaakt kunnen worden, zowel voor decoratieve als functionele doeleinden. Zo krijgt dit eeuwenoude materiaal dankzij moderne wetenschap steeds weer nieuwe toepassingen.