



Delft University of Technology

Afgedankte elektronische componenten scheiden

van Beek, Max

Publication date
2023

Document Version
Final published version

Published in
Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde

Citation (APA)

van Beek, M. (2023). Afgedankte elektronische componenten scheiden. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 89(8), 14-17. Article 5.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Afgedankte elektronische componenten scheiden

Elektronica is een snel groeiende stroom van complex afval in Nederland. De huidige technieken zijn echter niet in staat om dit type afval, bekend als afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA), te behandelen tot het niveau van ruwe materialen dat onze duurzaamheidsdoelen vereisen. Als stap op weg naar dit doel bespreken we hier drie vernieuwende mechanische scheidingsmethodes en de daaraan onderliggende natuurkundige principes, zoals scheiding op basis van frictie, magnetisme en drijfvermogen in een magnetische vloeistof. Deze maken het mogelijk om verschillende types elektronische componenten van afgedankte printplaten effectief te scheiden, wat het uiteindelijk mogelijk moet maken om de kritieke metalen beter terug te winnen via energie-efficiënte metallurgische routes.

Een wasmachine die automatisch het gewicht van de was herkent, de voederbak van de kat met een webcam of een nieuwe telefoon om het jaar. Geavanceerde elektronica zijn in een continue opmars in onze dagelijkse levens. Deze elektrische trein der progressie stoomt vooruit, maar niets is voor eeuwig. Dit roept ook automatisch de vraag op wat er moet gebeuren met de printplaten in al die apparaten aan het eind van hun leven.

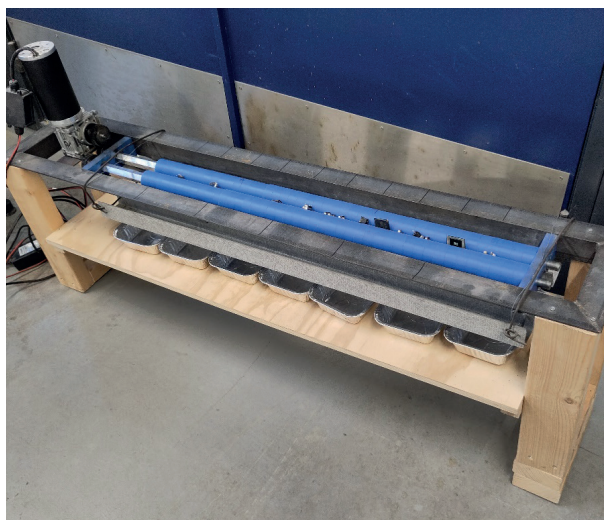
Op dit moment zijn er twee routes om printplaten uit afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) te verwerken. De simpelste is rechtstreekse verwerking door middel van pyrometallurgische extractie. Om de metalen te smelten en herwinnen wordt de gehele printplaat, inclusief elektronische componenten, verhit tot 1500 °C. Maar in dit proces worden vaak alleen koper en edele metalen teruggewonnen, terwijl de plastics worden verbrand en de andere metalen eindigen in de slak als niet terugwinbaar afval. Het tweede pad verbetert de efficiëntie via een aantal voorbereidingen. Eerst worden de

printplaten versnipperd tot stukjes homogene materialen, zoals koperdraad, polyetheen of ijzer. Vervolgens wordt dit mengsel gesorteerd op onderscheidende eigenschappen zoals grootte (zeven), ferromagnetisme, elektrische geleiding (wervelstroomscheiding of elektrostatische scheiding) of dichtheid (scheiding op drijfvermogen). Deze extra stappen verhogen de concentraties van de metalen en dus hun herwinbaarheid in de vervolgstappen, maar hebben ook hun beperkingen. Allereerst, het versnipperen van de printplaat tot beneden 1 mm is een energie-intensief proces en kan gevaarlijk fijnstof produceren. Bovendien zullen in de toekomst zelfs nog kleinere snippers vereist zijn door de constante miniaturisatie van elektronica, wat de energievereisten sterk zal opdrijven. Ten tweede komt het ook vaak voor dat de versnipperde deeltjes verstrikt – denk aan dunne draadjes – of verkleefd raken door bijvoorbeeld vocht. Dit belemmert accurate en complete scheiding met als gevolg vervuiling in het eindproduct. Ten slotte is het versnipperen ook niet selectief, wat resulteert in de vernie-

tiging van de componenten op de printplaten. Dit maakt het lastig om kritieke materialen, zoals zeldzame aardmetalen, te herwinnen aangezien deze alleen in specifieke componenten voorkomen en dus verdund worden door de rest van de printplaat. Daarom streeft de Resources & Recyclinggroep van de TU Delft ernaar om een derde route te creëren in samenwerking met de Metals Production, Refining and Recyclinggroep van de TU Delft, TNO en hogeschool Saxion, als onderdeel van het Circular Circuitsproject van NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek). In dit innovatieprogramma ligt de focus op de componenten van de printplaten uit AEEA en de zeldzame en strategische (aard)metalen die zich daarin bevinden. Door gebruik te maken van vernieuwende mechanische scheidingsmethodes blijkt het mogelijk te zijn om specifieke componenten te concentreren. Dit maakt het mogelijk om energie-efficiënter te werk te gaan, maar vooral ook om meer soorten materialen te herwinnen uit de complexe elektronische afvalstroom.



Figuur 1. Scheiden van de verschillende componenten naar type.



Figuur 2. Een simpele rollensorteerder.

Rollensorteerder

De eerste van deze vernieuwende methodes is de rollensorteerder, ontwikkeld begin 20^e eeuw, die momenteel vooral wordt toegepast in de voedsel-industrie. Twee cilinders worden in tegengestelde richting gedraaid met een smalle tussenruimte die toeneemt over de lengte van de rollers. Door de elektronische componenten een voor een tussen de rollers te plaatsen, startend bij de kleinste tussenruimte, is het mogelijk om ze te scheiden op basis van hun kleinste afmeting. Dunne objecten zoals computerchips vallen eerder door de opening dan bijvoorbeeld een kubische usb-poort. Deze methode is zowel accuraat als consistent, omdat de componenten zichzelf correct oriënteren tussen de rollers in tegenstelling tot de willekeurige oriëntatie die plaatsvindt bij normaal zeven.

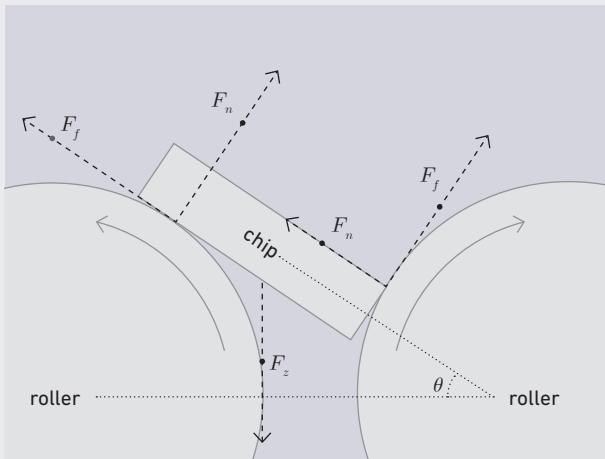
Het proces van scheiding kent twee fasen: het oriënteren van de deeltjes tussen de rollers en het daaropvolgende vallen. Deze laatste fase stap is het simpelst en wordt vooral bepaald door de verhouding tussen de dikte van de componenten en de grootte van de opening. De oriëntatie daarentegen levert een interessant fysisch probleem op met betrekking tot de normaalkracht, frictie en zwaartekracht, zoals weergegeven in figuur 3. Het is immers niet gegarandeerd dat een elektronische component, bijvoorbeeld

een chip, een neerwaartse verticale kracht of het correcte draaimoment ondervindt op de rollers. De resultaten van de volgende berekeningen zijn genormaliseerd naar zwaartekracht. Frictie is een belangrijke kracht die aangrijpt op het raakvlak tussen de rollers en de chip. Zoals te zien is in figuur 4 kan de grootte van de frictie (f) sterk bepalend zijn voor de krachtenbalans en hier specifiek voor de netto verticale kracht. Als deze laatste negatief is zal de chip een neerwaartse kracht ondervinden die het dieper tussen de rollers laat belanden, terwijl een positieve waarde betekent dat de chip zich juist uit de rollers beweegt en dus niet gesorteerd kan worden. Bij een kleine hoek met de horizontaal (θ), tot ongeveer 45 graden, is de invloed van de frictie minimaal en is er sprake van een sterke neerwaartse kracht. Maar zodra de chip dieper tussen de rollers ligt kan de verticale kracht positief worden als de frictie groot genoeg is. Deze sterke invloed van de frictie kan verklaard worden door de schuinere frictie-raaklijnen, en dus grotere verticale krachtcomponenten, wanneer de chip dieper ligt. Het is daarom dus van groot belang om de rollers van een zo frictieloos mogelijk materiaal te maken, om zo het correct oriënteren van de elektronische componenten te bevorderen. De lengte van de chip heeft ook invloed op het oriëntatiegedrag tus-

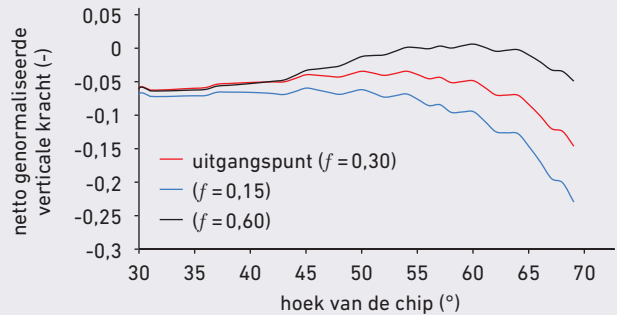
sen de rollers. Als een chip groter is zal deze ook verder uitsteken over de linker roller in figuur 3 en daarmee ook het zwaartepunt. Figuur 5 toont het krachtmoment op de chip voor drie verschillende ratio's (S) van chip lengte en rollerstraal. Zolang het moment negatief is zal het deeltje kloksgewijs draaien en zich verder tussen de rollers oriënteren, terwijl een positief moment betekent dat het zichzelf tegen de klok in uit de rollers trekt. Dit laatste is het geval voor een lange chip ($S = 1,50$) die een positief moment krijgt bij een hoek (θ) van 42° . Dit komt overeen met observaties in de praktijk waar grote chips zich niet stabiel plaatsen tussen de rollers maar in plaats daarvan instabiel heen en weer bewegen op een van de rollers, wat sortering onmogelijk maakt. Dit kan voorkomen worden door de rollers groot genoeg te maken en zo de S -ratio voldoende klein te maken.

Ferromagnetische scheiding

Een andere eigenschap waarop gescheiden kan worden is het volume en de vorm van ferromagnetisch materiaal in de componenten. Sommige componenten bevatten ijzer of nikkel, bijvoorbeeld als onderdeel van spoeltjes. De aanwezigheid van deze magnetische materialen maken deze types componenten scheidbaar van bijvoorbeeld chips die niet magnetisch zijn. Op basis van magneetscheiding



Figuur 3. De krachten op de chip in de rollensorteerder: zwaarte-kracht (F_z), frictie (F_f) en normaalkracht (F_n).



Figuur 4. De netto genormaliseerde verticale kracht op een computerchip bij drie frictieconstantes.

kan heel efficiënt een binaire scheiding gerealiseerd worden. Deze methode vormt de basis voor een nieuwe scheidingstechniek.

In conventionele toepassingen van magnetische afvalscheiding zijn de te scheiden objecten willekeurig van samenstelling, zoals bij het sorteren van staalschroot. Dit in tegenstelling tot elektronische componenten die volgens zeer nauwkeurige specificaties zijn ontworpen en daarmee dus zeer consistent zijn qua opbouw en samenstelling. Dit maakt het mogelijk om een nieuwe scheidingsmethode te ontwikkelen voor de verschillende types componenten waarbij drie of meer soorten kunnen worden geconcentreerd in een enkele procesgang. Dit wordt bereikt door een lange en brede magneet te gebruiken met een uniform magnetisch veld over zijn gehele lengte. Deze wordt onder een hoek geplaatst ten opzichte van de horizontaal in een lopende band die gevoerd wordt door een andere band van onderen (zie figuur 7). Door de schuine oriëntatie van de magneet neemt de afstand tot de componenten op de band lineair toe over de lengte van de machine en neemt de heersende veldsterkte bij benadering kwadratisch af. Componenten met een relatief kleine hoeveelheid ferromagnetisch metaal, zoals condensatoren, zullen dus als eerste van de scheider vallen, terwijl een ijzeren schroefje tot het einde van de lopende band blijft hangen.

Magnetische dichtheidsscheiding

Magnetisme kan ook gebruikt worden om een meervoudige scheiding te maken van niet-magnetische componenten op dichtheid door onderdompeling in een magnetiseerbare vloeistof. Deze magnetische dichtheidsscheider (MDS) is een geavanceerde vorm van zink-drijfscheiding in een conventionele vloeistof. Hier wordt echter een zogenoemde ferrovloei-stof gebruikt, een suspensie in water van ijzeroxide nanodeeltjes. Om componenten te kunnen scheiden met een dichtheid hoger dan die van water wordt een magneet met een uniform veld onder de vloeistof geplaatst. Deze produceert bij goede benadering een veld dat exponentieel afneemt met de hoogte in de vloeistof. Het veld induceert een netto magnetisch dipoolmoment in macroscopische volumes nanodeeltjes waardoor een opwaartse verticale kracht aangrijpt op de vloeistof. Deze kracht telt op bij de zwaartekracht waardoor de vloeistof schijnbaar een hogere dichtheid heeft afhankelijk van de afstand tot de magneet.

De effectieve dichtheid van de vloeistof $\rho_{\text{effectief}}$ op een bepaalde hoogte boven de magneet (z) wordt beschreven door de vergelijking

$$\rho_{\text{effectief}} = \rho_{\text{vloeistof}} + \frac{2\pi MB_0}{gw} e^{-2\pi z/w}.$$

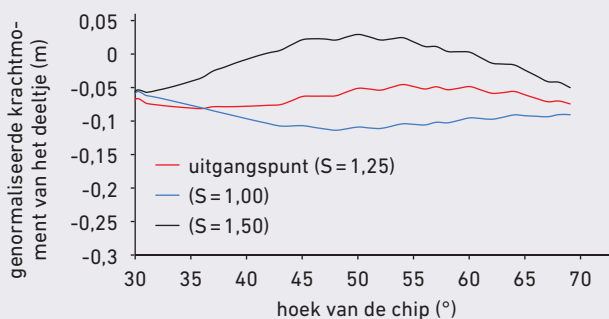
Hier is $\rho_{\text{vloeistof}}$ de fysische dichtheid

van de vloeistof, dus in afwezigheid van een magnetisch veld, M de magnetisatie van de vloeistof, die afhangt van de concentratie van suspensie, B_0 de magnetische fluxdichtheid op het bovenoppervlak van de magneet, g de valversnelling en w is een ontwerp-parameter gerelateerd aan de opbouw van de magneet.

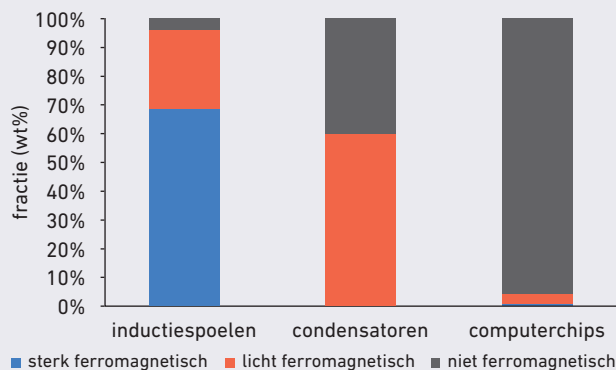
Deze scheidingsmethode kan effectief toegepast worden dankzij de grote verschillen in materiaalkeuze van verschillende elektronische componenten. Zo zijn er simpele aluminium koellichamen en plastic connectoren, maar ook complexe componenten zoals computerchips en condensatoren. Ook al tonen deze complexe componenten veel variatie in hun materialen, het blijkt toch dat ze een vrij precieze maar verschillende gemiddelde dichtheid kunnen hebben, zoals 3600 kg/m³ voor computerchips en 1700 kg/m³ voor condensatoren. Daardoor zullen ze op voorspelbare hoogtes (z) in de magnetische vloeistof zweven en efficiënt geconcentreerd kunnen worden.

Conclusie

Drie nieuwe methodes zijn besproken om elektronische componenten van printplaten efficiënt van elkaar te scheiden en te concentreren. Dit is gelukt door bekende scheidingsprincipes toe te passen op deze specifieke afvalstroom en vervolgens te optima-



Figuur 5. Het genormaliseerde krachtmoment op de chip voor verschillende lengte-radiusverhoudingen.



Figuur 6. De gewichtsfracties van sterk, licht en niet ferromagnetische componenten voor inductiespoelen, condensatoren en computerchips.

liseren met behulp van de achterliggende fysische principes. De rollensorteerder is in staat componenten accuraat op minimale afmeting (dikte) te scheiden waarbij onder andere rekening gehouden moet worden met de frictie. De ferromagnetische scheider kan componenten scheiden op basis van hun ferromagnetische inhoud. En de magnetische dichtheidscheider kan niet-ferromagnetische componenten scheiden op basis van hun dichtheid.

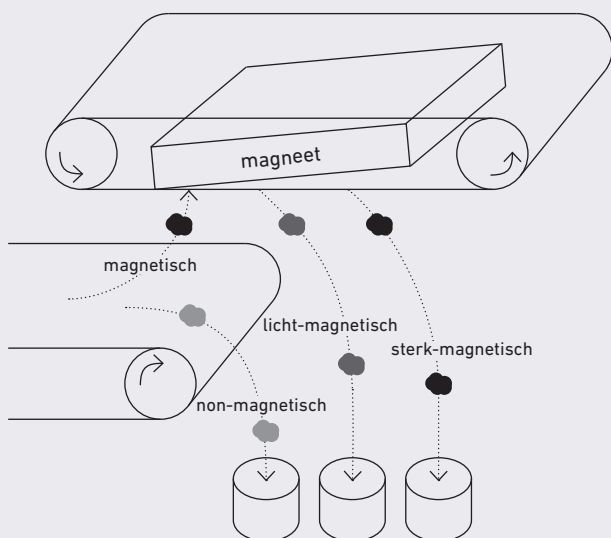
De laboratoriumresultaten zijn veelbelovend en kunnen worden toegepast in combinatie met andere afvalverwerkingsmethodes, zoals demontage, computervisie en hydro-metallurgie, om uiteindelijk tot een totaaloplossing te komen voor het elektronisch afval.

Max van Beek startte begin 2023 met zijn promotieonderzoek bij Resources & Recycling aan de TU Delft. Hij richt zich op vernieuwende methodes om elek-

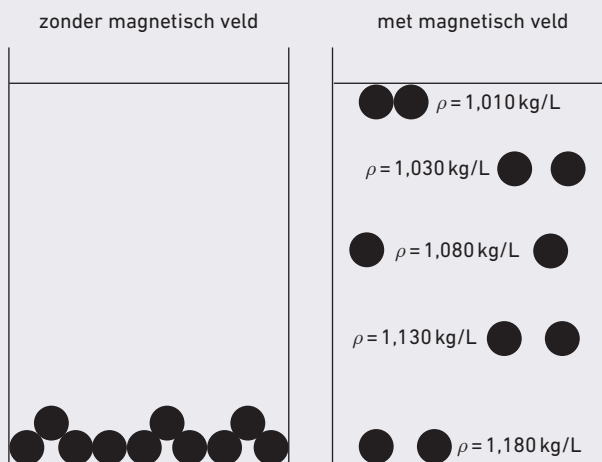
tronische componenten van afgedankte printplaten te verwijderen uit AEEA en te sorteren, als eerste stap naar een duurzamere verwerking van elektronisch afval binnen Nederland.

REFERENTIES

1. M.C. van Beek, The golden age of wasted TVs: Regaining precious metals and critical raw materials from low and medium grade PCBs within the EU, including a technical case study for FDP TVs and monitors, Master Thesis, TU Delft and Leiden University (2022).
2. J.R.A. Koning, E. Bakker, P. Rem, Sorting of vegetable seeds by magnetic density separation in comparison with liquid density separation, *Seed Science and Technology* **39**, (2011) 10.15258/sst.2011.39.3.06.



Figuur 7. Schematische tekening van de continue magnetische scheiding.



Figuur 8. Een magneet onder de vloeistof verhoogt de effectieve dichtheid waardoor materialen (zwarte bollen) zwaarder dan water gaan drijven.