



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Environmental sustainability of NdFeB magnet recycling: foresight study on recycling systems and technologies

Nielen S.S. van

Citation

Environmental sustainability of NdFeB magnet recycling: foresight study on recycling systems and technologies. (2024, November 1). *Environmental sustainability of NdFeB magnet recycling: foresight study on recycling systems and technologies.* Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4107092>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4107092>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).



Samenvatting

Milieuvriendelijkheid van de recycling van NdFeB-magneten – Verkennende studie van recyclingprocessen en -systemen

Dit proefschrift onderzoekt het potentieel van de inzet van magneetrecyclingtechnologieën en de gevolgen voor het milieu van deze recycling. De technologieën zijn in ontwikkeling, met als doel een duurzamer alternatief te bieden voor magneten gemaakt van vers gedolven zeldzame aardmetalen (specifiek neodymium-ijzer-boor- of NdFeB-magneten). De markt voor deze magneten is onvoorspelbaar, met volatiele prijzen en een exponentieel groeiende vraag, vooral gedreven door windturbines en elektrische voertuigen. De toenemende consumptie veroorzaakt ook meer afval, en gezien de beperkte mijnbouwcapaciteit is er dringend behoefte aan de ontwikkeling van een recyclingsysteem.

Vanuit milieuperspectief hangt de impact van magneetrecycling af van de beschikbaarheid van gebruikte magneten, de efficiëntie van terugwinnings- en recyclingprocessen en de effectiviteit van het recyclingsysteem als geheel. Omdat de recyclingprocessen een lage marktrijpheid hebben, is het belangrijk om rekening te houden met prestatieverbeteringen tijdens de ontwikkeling ervan. Om de ontwikkeling van milieueffecten na de introductie van recycling op industriële schaal te bestuderen, lijken ‘milieuleercurven’ een mogelijke benadering. Echter ontbreekt het aan een solide methode om de gevolgen van leereffecten voor de milieu-impact te bepalen. We hebben deze aspecten van magneetrecycling onderzocht aan de hand van de volgende onderzoeksvragen.

1. Welke factoren bepalen het succes van het recyclen van technologie-metalen en hun recyclingsystemen?
2. Wat is de hoeveelheid NdFeB-magneetafval in Europa? Welke afvalstromen zijn het meest geschikt voor recycling?
3. Wat zijn de milieueffecten van recyclingprocessen voor NdFeB-magneten op industriële schaal?
4. Hoe beïnvloeden technologische leereffecten de milieu-impact, en hoe kunnen levenscyclusanalyses (LCA-studies) dit effect meenemen?

Zeldzame aardmetalen die worden gebruikt in magneten, maken deel uit van de groep technologie-metalen die meerdere recyclinguitdagingen gemeen hebben. Om de recyclingpercentages te vergroten, is het belangrijk om de knelpunten en aanjagers van de recyclingketens te begrijpen. Daarom analyseerde Hoofdstuk 2 bestaande studies naar recycleerbaarheid en aanverwante literatuur over recycling. Zo werden 113 factoren blootgelegd, die het succes bepalen van het recyclen van technologie-metalen.

Deze factoren vertegenwoordigen meerdere invalshoeken, waaronder het economische, thermodynamische en ontwerp perspectief. Samen beschrijven deze hoe productkenmerken, recyclingtechnologieën en de maatschappelijke context bijdragen aan recycleerbaarheid. Deze bevindingen vormden de basis voor een nieuw raamwerk voor de beoordeling van recycleerbaarheid. Het raamwerk introduceert een reeks indicatoren, gegroepeerd per stap van de recyclingketen: productie, gebruik en inzameling, voorverwerking, metallurgische terugwinning en opnieuw op de markt brengen. Ook overkoepelende factoren worden geanalyseerd. Hoofdstuk 2 presenteert drie voorbeeldstudies, waarin het raamwerk wordt toegepast om de recycleerbaarheid van technologie-metalen in verschillende producten te analyseren en te vergelijken.

Hoofdstuk 3 kwantificeerde de hoeveelheid neodymiumafval in Europese landen met behulp van stofstroomanalyse, en gebruikte het raamwerk uit Hoofdstuk 2 om de recycleerbaarheid van belangrijke afgedankte producten te bepalen. Voor 2019 werd een afvalstroom van 2,8 kt neodymium berekend, voornamelijk bestaande uit NdFeB-magneten. Harde schijven vormen een groot deel van deze afvalstroom en zullen daarom in de komende jaren een aantrekkelijke input zijn voor recyclers. Verder vormen magneten in industriële toepassingen (pompen en robots) en in conventionele auto's groeiende bronnen van secundair neodymium. In de toekomst worden ook oude elektrische automotoren en windturbines belangrijk als bron van neodymium, met redelijk goede recycleerbaarheid. Gezien deze dynamiek van opkomende magneettoepassingen en afvalstromen is flexibiliteit vereist bij de inzameling en voorverwerking van afval. De recycleerbaarheidsanalyse liet enkele knelpunten zien in de recycling van magneten. Door deze knelpunten aan te pakken kan een robuust recyclingsysteem worden opgebouwd, dat de toekomstige groei van de afvalvolumes aankan. Toekomstig onderzoek zou de onzekerheid in de uitkomsten kunnen verkleinen door rapportagefouten in productie- en handelsgegevens aan te pakken. Ook zouden gedetailleerdere gegevens over het marktaandeel van verschillende magneettypen nuttig zijn.

Hoofdstuk 4 onderzocht de milieueffecten van nieuwe technologieën voor het terugwinnen, recyclen en opnieuw produceren van NdFeB-magneten. De focus lag op de directe recycling van NdFeB-legeringen, waarbij het materiaal in poedervorm wordt teruggewonnen in plaats van de afzonderlijke elementen te scheiden. De verwachte prestaties van grootschalige recycling werden gemodelleerd en vergeleken met de productie van primaire magneten. Deze analyse maakte gebruik van ex-ante LCA, en combineerde meetgegevens van proefprocessen, technologische voorspellingen van deskundigen, thermodynamische modellen en apparatuurspecificaties van fabrikanten. Uit de resultaten blijkt dat NdFeB-poeders, teruggewonnen met een proefinstallatie, een lagere impact hebben dan primaire poeders voor bijna alle impactcategorieën. Dit toont het milieuvoordeel aan van de terugwinning van NdFeB. Grootschalige recycling van magneten heeft naar verwachting een ruim 80% lagere impact dan primaire magneetproductie in de meeste geanalyseerde impactcategorieën. We onderzochten ook het effect van vier technologische ontwikkelingen: procesveranderingen, schaalvergroting, interne recycling en optimalisatie. Alle vier de typen dragen bij aan het verbeteren van de prestaties van proefinstallatie naar industriële schaal. Het eindpunt van de toepassingen werd gevalideerd door het te vergelijken met industriële referentieprocessen en een theoretisch optimale configuratie. Effectieve aanpassingen zijn bijvoorbeeld het

verminderen van materiaalverlies tijdens het zeven en het verbeteren van de energie-efficiëntie door apparatuur op te schalen. Verder werden vier productieroutes voor magneten onderzocht: sinteren, extrusie, metaalspuitgieten (MIM) en binden met kunststof. Elke route heeft een eigen milieuprofiel, maar ze kunnen allemaal een vergelijkbaar laag impactniveau bereiken. Extrusie en MIM zijn minder volwassen, wat leidt tot een hogere initiële impact. Elk type magneet heeft unieke eigenschappen, daarom hangt de keuze tussen routes voornamelijk af van de functionele eisen. Toekomstige LCA-studies kunnen rekening houden met schonere elektriciteitsproductie en ontwikkelingen in de toeleveringsketens van primaire magneten.

Hoofdstuk 5 onderzocht het effect van leerprocessen op de milieu-impact van industrieel toegepaste technologieën op fundamenteel niveau. We beschouwden de theoretische grondslagen en het empirische bewijs van technologisch leren. Zo identificeerden we verschillende leermechanismen, waarvan sommige alleen de productiekosten beïnvloeden. Eerdere studies bewijzen vooral de vermindering van de impact die samenhangt met energiegebruik. Een belangrijke observatie is dat de effecten kunnen variëren per impactcategorie, en dat sommige impacts helemaal niet afnemen. Vervolgens hebben we een procedure ontwikkeld voor het beoordelen van leereffecten in ex-ante en toekomstgerichte LCA. Wij stellen dat leren operationele of organisatorische veranderingen met zich meebrengt, die gedreven worden door externe prikkels. Daarom kunnen milieueffecten een leercurve volgen als de oorsprong van de milieu-impact samenvalt met waar de belangrijkste prikkels aangrijpen. We hebben stapsgewijze richtlijnen ontwikkeld om leereffecten en leersnelheden op milieugebied te bepalen, zodat toekomstige studies de impacttrends van industriële technologie in ontwikkeling kunnen modelleren. Op basis van deze procedure verwachten we voor magneetrecycling aanzienlijke leereffecten. Verder benadrukt deze studie de noodzaak om het wetenschappelijke bewijs voor de milieueffecten van technologisch leren te vergroten. Dit is mogelijk door datasets van bestaande technologieën te herinterpreteren om de leersnelheden te bepalen.

Concluderend kan de gemiddelde ecologische voetafdruk van NdFeB-magnetten in Europa worden verminderd door de magneetrecyclingtechnologie te verbeteren en uit te rollen. De uitrol wordt beperkt door de beschikbaarheid van gebruikte magneten. Recycling zou in 2019 maximaal 45% van de NdFeB-vraag kunnen vervullen, en dit maximale aandeel kan in de toekomst afnemen door de langere levensduur van opkomende magneettoepassingen. Toch heeft recycling een groot groeipotentieel aangezien recycling nu nauwelijks plaatsvindt. De milieuvoordelen van recycling ten opzichte van primaire productie zullen aanvankelijk beperkt zijn, maar kunnen aanzienlijk toenemen naarmate de processen verbeteren. Gerecycleerde magneten kunnen uiteindelijk een ruim 80% lagere impact bereiken voor de meeste impactcategorieën, zoals blijkt uit de ex-ante LCA. De analyse van leereffecten geeft aan dat de milieueffecten met ongeveer 20% kunnen afnemen bij elke verdubbeling van de cumulatieve productie van recycling.

De bevindingen bevestigen eerdere onderzoeken die lieten zien dat het recyclen van NdFeB-magnetten bijdraagt aan duurzame ontwikkeling. Recycling vermindert de druk op de productieketen van primaire magneten, en maakt meer grondstoffen beschikbaar voor de productie van emissiearme technologieën zoals elektromotoren. Bovendien hebben recyclingtechnologieën die op grote schaal worden geïmplementeerd een lagere impact op het milieu dan primaire productieprocessen. Recycling op zichzelf

kan niet voldoen aan de grote vraag naar NdFeB-magneten. Echter, door meerdere recyclingtechnologieën te combineren met effectieve afvalinzameling, kan een veel meer circulaire magneetindustrie worden bereikt. Opkomende processen voor magneetre-cycling maken succesvolle en duurzame recyclingsystemen in de toekomst mogelijk. Deze systemen kunnen worden gerealiseerd met circulaire bedrijfsmodellen en richtinggevend beleid, gebaseerd op dit onderzoek.

Dit onderzoek richtte zich op magneetre-cycling in Europa, wat de resultaten minder relevant maakt voor andere regio's in de wereld. Andere landen kunnen verschillen in de vraag naar magneettoepassingen, de maatschappelijke context van recyclingsystemen en de elektriciteitsmix. Afhankelijk van de groeisnelheid van de vraag naar magneten kan het maximale aandeel gerecyclede grondstoffen hoger of lager zijn. Bij het vergelijken van de milieu-impact van primaire en gerecyclede magneten binnen een niet-Europees land zal het voorkeursalternatief waarschijnlijk hetzelfde zijn als in dit onderzoek. Een vergelijking met het wereldwijde gemiddelde van primaire magneten vereist echter een aparte analyse.

Enkele aspecten vereisen verdere aandacht van onderzoekers en recyclers. Het gaat om digitale systemen voor het volgen en detecteren van magneten in producten, samenwerking en afstemming tussen alle partners in de recyclingketen, kansen voor het gelijktijdig terugwinnen van magneten en andere materialen, en methoden om recyclingvriendelijk gedrag te bevorderen. Recyclingbedrijven kunnen inzichten in de verschillende magneettypen en verschillen tussen landen gebruiken om hun recyclingactiviteiten te ontwikkelen. Voor deze bedrijven is het essentieel om ervaring op te doen door recycling toe te passen in een industriële omgeving.