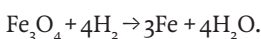




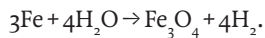
# Energie van groene waterstof in ijzerbolletjes

**Team SOLID is een groep studenten die een technologie ontwikkelt om waterstof veilig, efficiënt en duurzaam in te zetten in de energietransitie. Door ijzer te oxideren en reduceren kan de machine van Team SOLID de energie van waterstof opslaan om voor groene processen gebruikt te worden.**

**W**aterstof is een energiedrager van de toekomst. Het zal dienen als energieopslag, brandstof en grondstof voor chemische processen. De Europese Unie streeft ernaar om het gebruik van groene waterstof in Europa te verhogen van minder dan 1 procent van de totale Europese energieconsumptie in 2022 naar tien procent in 2050. Europese producenten kunnen niet aan deze vraag voldoen, dus er wordt verwacht dat al in 2030 ongeveer vijftig procent van de Europese vraag naar groene waterstof geïmporteerd zal worden. Dit staat gelijk aan zo'n tien miljoen ton groene waterstof [1,2]. Op dit moment wordt er ook al waterstof geïmporteerd. Omdat waterstof in gasvorm erg veel ruimte in beslag neemt, gebeurt deze import onder hoge druk, in vloeibare vorm of in de vorm van andere moleculen, zoals ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Deze vormen hebben een aantal grote nadelen: gasvormige waterstof wordt onder een druk van tot wel 700 bar opgeslagen en om het vloeibaar te maken moet de waterstof gekoeld worden tot onder de  $-250^\circ\text{C}$ . Ammoniak heeft deze nadelen niet, maar is een giftig goedje dat met grote zorg getransporteerd moet worden. Daar komt bij dat het veel energie kost om ammoniak te maken en te 'kraken' (afbreken tot waterstof). Je kunt de energie van waterstof ook opslaan in kleine ijzerballetjes. Dat is wat studententeam SOLID van de TU Eindhoven voor ogen heeft met zijn Iron-Based Hydrogen Storage-technologie (IRHYS). De technologie werkt als volgt: de energie van waterstof ( $\text{H}_2$ ) wordt opgeslagen via een reductiereactie met ijzeroxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), oftewel roest. Doordat de zuurstofatomen overspringen van het ijzeroxide naar de waterstof, ontstaan ijzer (Fe) en water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) via de volgende reactie:

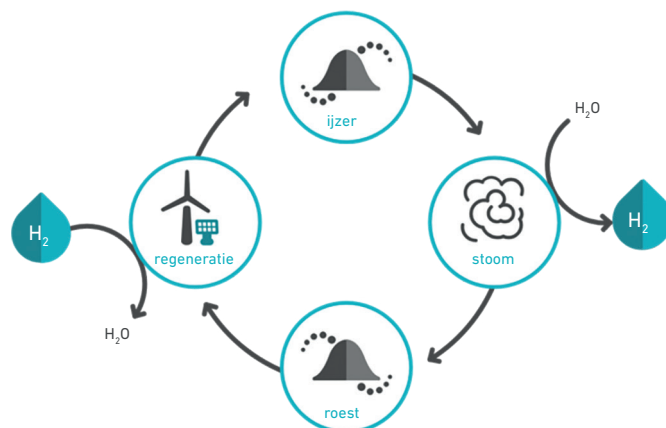


Het ontstane ijzer dient als opslagmiddel dat onder atmosferische condities opgeslagen of vervoerd kan worden. Het water kan op locatie gebruikt worden voor andere doeleinden. Om vervolgens waterstof te kunnen leveren, is alleen water (stoom) nodig. Door het ijzer in contact te brengen met de stoom, springen de zuurstofatomen door middel van een oxidatiereactie weer terug naar het ijzer, waarna waterstof en ijzeroxide overblijven:



Zo ontstaat een cyclus waarin ijzer als een duurzame energiedrager fungeert. Uiteindelijk wordt alleen ijzer opgeslagen en getransporteerd, wat veiliger, goedkoper én energiedichter per volume-eenheid is dan waterstof. Het ijzer kan in de open buitenlucht opgeslagen worden, maar om zo veel mogelijk energie uit het ijzer te halen en hittevorming tegen te gaan wordt oxidatie met zuurstof of water in de lucht voorkomen door het in een gesloten ruimte in een atmosfeer van pure stikstof op te slaan. Zo wordt gereduceerd ijzer op dit moment

bijvoorbeeld verscheept onder zo'n stikstofdeken. Bovendien is ijzer erg goedkoop en is de transportinfrastructuur al goed ontwikkeld, aangezien het het hoofdbestanddeel (97%) is van staal, een van de meest gebruikte bouwmaterialen op aarde. Door als energiedrager te fungeren kan ijzer helpen een lokale energieonbalans op te vangen van uur tot uur, maar ook van land tot land. In landen met veel zonne-uren zoals Spanje wordt veel groene elektriciteit geproduceerd met zonne-energie, terwijl er in Nederland veel vraag is naar deze elektriciteit. Er is geen infrastructuur om alle gevraagde elektriciteit direct naar Nederland te sturen via kabels, dus kan er in Spanje bijvoorbeeld via elektrolyse groene waterstof geproduceerd worden, wat in een reductiemachine omgevormd kan worden naar ijzer. Het ijzer kan vervolgens naar Nederland verscheept worden zodat het hier met behulp van een oxidatiemachine in een kwestie van uren weer omgezet kan worden naar groene waterstof. Het waterstof kan dan gebruikt worden voor chemische processen of om elektriciteit mee te maken. Het idee is dat elektriciteit lokaal geproduceerd wordt (bijvoor-



Linkerpagina: de Steam-Iron Reactor 1, een *proof of concept*-reactor waarmee Team SOLID de energie van waterstof opslaat in ijzer. Deze pagina: de IRHYS-cyclus om de energie van waterstof op te slaan in ijzer.



Het studententeam van 2024-2025.

beeld bij een grootverbruiker), zodat die elektriciteit niet vanuit de centrale hoeft te komen. Dit ontlast het netwerk.

### De reacties in de praktijk

De hele reactie is cyclisch en de ijzerpellets kunnen meerdere malen gebruikt worden. Na ongeveer tien keer zijn zij zo erg verpoederd dat ze opnieuw omgesmolten moeten worden. Beide reacties vinden plaats in een reactor onder een lage druk van minder dan tien bar en worden versneld door ze plaats te laten vinden bij een temperatuur van enkele honderden graden Celsius. Uit de reactor vloeit vervolgens een gasmengsel van waterstof en stoom, wat gekoeld wordt om via condensatie waterdamp van waterstof te scheiden. Zo blijft waterstof van hoge kwaliteit over. Afhankelijk van het type reactie kan óf het water óf de waterstof teruggebracht worden in de reactor om verder te reageren met de ijzerpellets. Via een warmtewisselaar wordt restwarmte opgevangen om de instroomgassen te verwarmen. Zo wordt de efficiëntie van het systeem verhoogd, met een theoretische maximale energie-efficiëntie van vijftig procent. Dit betekent dat de helft van de oorspronkelijke waterstof weer teruggewonnen kan worden. Dit is vergelijkbaar met vloeibare waterstof en komt dicht bij

de giftige waterstofdrager ammonia, waar ongeveer zestig procent van de energie overblijft.

### Waar komt het ijzer vandaan?

Staal is tegenwoordig veruit het meest gebruikte metaal op de wereld. Ijzer is hiervan het hoofdbestanddeel. Voor de productie van staal zijn hoogwaardige ijzerbolletjes nodig met gespecificeerde afmetingen en eigenschappen. Als de bolletjes iets te groot of te klein zijn, te veel onzuiverheden hebben of geen juiste porositeit hebben, blijven ze over als afvalstof. Tijdens transport vergruizen sommige bolletjes ook, wat betekent dat er ijzerpoeder overblijft. Al deze afvalstoffen kunnen gebruikt worden als waterstofdrager. Voor de staalindustrie zijn ze minder interessant omdat vanwege de hoge kwaliteitseisen het opwerken naar de juiste eigenschappen vaak te bewerkelijk is. Een andere bron is het ijzer dat overblijft van grondwaterwinning, wat potentieel ook gebruikt kan worden als waterstofdrager. Omdat ijzer een hoge massa heeft is het niet geschikt als energiedrager voor massa-kritische systemen, zoals vliegtuigen. Voor stationaire energieopslag of transport via rails of waterwegen is het juist wel een geschikte energiedrager, vanwege de hoge dichtheid.

### Toekomstvisie van SOLID

Team SOLID is een jaarlijks veranderend studententeam met als doel het toegankelijk maken van duurzame energiebronnen voor iedereen, op elk moment. Deze multidisciplinaire groep van dertig studenten werkt al sinds 2018 vrijwillig en zelfstandig aan duurzame energieoplossingen op basis van ijzer. Elk academisch jaar verandert de samenstelling van het team, met oude leden die het team verlaten en nieuwe leden die het team versterken, om zo een frisse blik te werpen op de IRHYS-technologie. Zelf heb ik net als drie anderen mijn studie een jaar lang stopgezet om fulltime te werken en een groep van 25 studenten te begeleiden bij de ontwikkeling van de technologie. Na de onthulling van de demonstratiereactor Steam-Iron Reactor 1 in 2022 is het team begonnen met experimenten om de efficiëntie van het systeem in kaart te brengen en onderzoek te doen naar manieren om de efficiëntie te verhogen. Er wordt gekeken naar het veranderen van de reactieomstandigheden, de eigenschappen van de ijzerbolletjes en geavanceerde waterstof-scheidingstechnieken. Tegelijkertijd werkt het team aan een haalbaarheidsstudie en is de ontwikkeling gestart van een opgeschaalde 2,5 MW-reactor die in 2028 gedemonstreerd zal worden in een relevante testomgeving. Met deze stap zal het team de technologie op de kaart zetten, om zo de waterstofbatterij toegankelijk te maken voor iedereen.

#### REFERENTIES

- 1 DS Aether CT, Press Release - DUKSAN AETHERCT to launch large-capacity Type 4 hydrogen transportation and storage container next year (2024, 9 30). Opgehaald van [www.dsaetherct.com/eng/customer01.html?act=view&no=1139&lang=en](http://www.dsaetherct.com/eng/customer01.html?act=view&no=1139&lang=en).
- 2 European Commission, Hydrogen (2024). Opgehaald van European Commission: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en).
- 3 Z. H.-Y. Oscar Serpell, Ammonia's Role in a Net-Zero Hydrogen Economy (2023, 3 17). Opgehaald van Kleinman Center for Energy Policy: [https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/ammonias-role-in-a-net-zero-hydrogen-economy/#:~:text=This%20process%20can%20be%20close,liquid%20hydrogen%20\(Rohland%20et%20al.](https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/ammonias-role-in-a-net-zero-hydrogen-economy/#:~:text=This%20process%20can%20be%20close,liquid%20hydrogen%20(Rohland%20et%20al.)