



“Kennis van Duurzaamheid”

GREEN KNIGHTS PUBLICATIES

www.greenknights.info

*Onafhankelijk en vrij
toegankelijk
onderzoek over:*

*Duurzame
technologie,
toepassingen en
concepten*

“Waterstof: stand van zaken en perspectief voor 2030”



JUNI 2019

A. H. GALAMA

Colofon

Rapportage: "Waterstof: stand van zaken en perspectief voor 2030"

Auteur: A. H. Galama (Phd, MSc)

Datum online: 09-06-2019

Datum versie: 09-06-2019

Afbeelding omslag: *Spaceshuttle met waterstoftank, www.noosphereventures.com*

Kernwoorden: *Waterstof, duurzame energie, energie opslag, waterstof productie technologieën, biomassa.*

Korte omschrijving: Waterstof is geen energiebron maar een energie drager. Op dit moment wordt meer dan 95% van het waterstof geproduceerd uit fossiele brandstoffen het overige deel wordt geproduceerd met energie uit fossiele brandstoffen. Dit betekent dat de energie in waterstof op dit moment niet van duurzame oorsprong is. Er zijn meerdere technologieën beschikbaar om op duurzame wijze waterstof te produceren. Hiervoor is duurzame opgewekte energie en/of biomassa nodig. Beide zijn in Nederland in onvoldoende mate aanwezig om genoeg waterstof te produceren om aan de huidige energievraag te voldoen. Het energetisch rendement om waterstof te produceren, op te slaan en weer om te zetten in bruikbare energie is op dit moment nog te laag voor grootschalige toepassing. De kostprijs voor duurzaam geproduceerd waterstof is (fors) hoger dan voor niet duurzaam geproduceerd waterstof. Op basis van dit onderzoek lijkt het niet waarschijnlijk dat waterstof in de komende tien jaar een grote rol gaat spelen om de transitie naar een duurzame energie gedreven economie te bevorderen. Voor lange termijn opslag van duurzame energie kan waterstof in de toekomst allicht een aantrekkelijke optie zijn. Andere toepassingen van duurzaam geproduceerd waterstof kunnen plaats hebben in de transportsector en in de industrie.

Copyright: © 2019 *Greenknights.info*, Niets uit dit rapport mag worden verveelvoudigd, door middel van druk, fotokopieën, geautomatiseerde gegevensbestanden of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van *Greenknights.info*

Disclaimer: Greenknights.info besteedt veel aandacht aan het controleren van gebruikte informatie. Toch kan het zijn dat informatie verouderd of incorrect is. Aan de informatie op Greenknights.info kunnen dan ook geen rechten worden ontleend. Greenknights.info is niet aansprakelijk voor informatie op internetpagina's van derden waarnaar op deze site wordt verwezen. Ook is d Greenknights.info niet aansprakelijk voor de gevolgen van het gebruik van de aangeboden informatie op deze website.

Inhoudsopgave

Colofon.....	2
Uitgebreide samenvatting.....	4
1 Introductie.....	11
2 Energie in waterstof.....	12
3 Waterstofproductie methoden.....	17
3.1 Huidige waterstofproductie methoden.....	17
3.2 Duurzame waterstofproductie methoden en grondstoffen.....	17
3.3 Thermochemische waterstofproductie.....	19
3.3.1 Thermochemische technologieën.....	19
3.3.2 Energetisch rendement thermochemische technologieën.....	21
3.4 Biologische waterstofproductie.....	22
3.4.1 Biologische technologieën.....	23
3.4.2 Energetisch rendement biologische technologieën.....	24
3.5 Elektrochemische waterstofproductie.....	26
3.5.1 Elektrochemische technologieën.....	27
3.5.2 Energetisch rendement elektrochemische technologieën.....	27
4 Kostprijs van Waterstof.....	29
4.1 Kostprijs industriële waterstofproductie.....	29
4.2 Kostprijs thermochemische waterstofproductie.....	29
4.3 Kostprijs biologische waterstofproductie.....	30
4.4 Kostprijs elektrochemische waterstofproductie.....	30
5 Perspectief voor Waterstof.....	33
5.1 Waterstof uit biomassa.....	33
5.2 Waterstof uit water.....	34
5.3 Perspectief voor Waterstof.....	34
6 Conclusie.....	37
Dankbetuiging.....	38
Afkortingen en symbolen.....	39
Bibliografie.....	40

Uitgebreide samenvatting

Waterstof is het meest voorkomende en simpelste element in het heelal. Waterstof dat als energiedrager gebruikt kan worden is een molecuul van twee waterstofatomen. Dit komt op aarde nagenoeg niet voor en zal dus moeten worden geproduceerd uit grondstoffen die waterstofatomen bevatten. De meest voorkomende waterstofverbinding op aarde is die tussen twee waterstofatomen en een zuurstofatoom: water. Een andere grondstof voor waterstof is biomassa.

Duurzaam energie opgewekt uit zon en wind levert geen constante energiestroom op en het aanbod van energie komt vaak niet overeen met de vraag naar energie. Om dit verschil tussen aanbod en vraag in de tijd op te kunnen vangen is energieopslag nodig. Waterstof is een van de opties om energie op te slaan in de vorm van een brandstof. Waterstof geldt al jaren als brandstof van de toekomst, toch is er nog bijna niemand die in een waterstofauto rijdt of die energie opslaat in waterstof. In dit rapport wordt uitgelegd hoe energie in waterstof kan worden opgeslagen. Ook worden de technologische stand van zaken en de mogelijkheden voor de nabije toekomst belicht. Een schatting van de kostprijs en praktische toepasbaarheid leiden tot een toekomstperspectief voor waterstof.

Energie in waterstof

Op fundamenteel vlak kan waterstof terug worden gebracht tot een verzameling energievelden, weergegeven als deeltjes met massa. Deze deeltjes hebben onderlinge interacties, door verandering van deze interacties door een chemische reactie wordt de hoeveelheid energie in een molecuul beïnvloed. Op elementair niveau gaat het om minime verschillen in energie, op niveau van kilogrammen, tonnen en kubieke meters gaat het om een hoeveelheid energie die nuttig gebruikt kan worden. Het maken van waterstof kost energie, het maken van water uit waterstof en zuurstof levert energie op. De Gibbs vrije energie die vrijkomt uit de chemische reactie van waterstof met zuurstof is 237,2 kJ/mol H_2 . Door de entropie verandering komt er nog eens 48,6 kJ bij, dit brengt de totale (bovenste) verbrandingswaarde voor waterstof op 285,8 kJ/mol H_2 , omgerekend 39,4 kWh/kg H_2 . In een cilinder van een verbrandingsmotor wordt door een vonkje een mengsel van zuurstof en waterstof tot ontploffing gebracht. Deze ontploffing duwt de zuigerstang omhoog, waardoor warmte-energie omgezet wordt in bewegingsenergie. In een vervolgstap kan beweging in elektriciteit worden omgezet. Bij de omzetting van energie vindt altijd energieverlies plaats, dit is energie die wordt afgegeven aan de omgeving en niet nuttig gebruikt wordt. Deze verliezen worden weergegeven door het rendement of efficiëntie. Verbrandingsmotoren staan bekend om een laag energetisch rendement, 30% is voor veel toepassingen het maximum. Daarnaast komt bij de verbranding van waterstof met lucht, naast water ook stikstofdioxide vrij.

Een alternatief voor het gebruiken van een verbrandingsmotor is de brandstofcel. Hierin vindt geen verbranding plaats maar worden de elektronen die betrokken zijn bij de chemische reactie om waterstof en zuurstof in water om te zetten via een extern

circuit getransporteerd. Deze (elektronen) stroom kan gebruikt worden om arbeid te verrichten. Er bestaan een scala aan brandstofcellen, de meeste nog in ontwikkeling. Door specifiek onderzoek en ontwikkeling in nanotechnologie en materiaalwetenschappen worden brandstofcellen steeds efficiënter en goedkoper. Typisch rendement van de beste brandstofcellen is op dit moment rond de 60%.

Waterstofproductie methoden

Momenteel wordt meer dan 95% van alle waterstof op aarde gemaakt door 'stoomhervorming' van fossiele brandstoffen. De hoeveelheid waterstof dat gemaakt wordt uit water is ca. 4%, dit gebeurt met elektrolyse en stomelektrolyse. Waterstof wordt nu voornamelijk als een grondstof in de chemische industrie gebruikt en niet voor energieopslag. Om een omslag naar duurzame energie te maken zal waterstof met een duurzame methode moeten worden gemaakt. Duurzame bronnen voor waterstof zijn water en biomassa. Technisch gezien is het al mogelijk om met duurzame energie waterstof te produceren uit water of biomassa. De meeste technieken zijn echter alleen op laboratoriumschaal toegepast en zijn nog niet rijp voor toepassing in de praktijk. Een groot struikelblok voor deze technologieën blijkt een hoge kostprijs en een laag energetisch rendement in vergelijking met stoomhervorming van aardgas.

Waterstof uit biomassa

Er vindt nog geen grootschalige waterstofproductie uit biomassa plaats. Van de thermochemische processen om waterstof uit biomassa te genereren worden vooral vergassing en pyrolyse van biomassa of een combinatie van deze technieken onderzocht en ontwikkeld. In een onderzoeksinstallatie is met vergassing een maximaal energetisch rendement van 50% gehaald. De grootste vergassingsinstallatie is ingericht om methaan te produceren (tot 20 MW/uur CH₄). Tijdens het vergassingsproces ontstaat echter meer waterstof dan methaan. Dit waterstof wordt vervolgens omgezet in methaan. Als wordt aangenomen dat na de vergassing alle methaan en ethyleen met een rendement van 85% kunnen worden omgezet in waterstof dan komt de energetische efficiëntie van de reactor voor waterstofproductie uit op ongeveer 60%. Bij verdere opschaling kan het rendement worden vergroot door o.a. het inperken van thermische verliezen.

In biologische waterstofproductieprocessen wordt waterstof geproduceerd met bacteriën, algen of cyanobacteriën. Deze micro-organismen hebben specifieke groeiomstandigheden nodig om optimaal te presteren. Donkere fermentatie is op dit moment de meest rendabele en ontwikkelde biologische waterstofproductie methode. Fermentatie, of vergisting, is het proces waarbij biologisch materiaal door micro-organismen onder zuurstofloze omstandigheden wordt omgezet. Dit werkt vooral goed bij biomassa met een hoog gehalte aan simpele suikers. Doordat er bij vergisting veel vetzuren ontstaan en in de praktijk niet alle substraat wordt benut, of omzettingen niet volledig zijn, is het huidige maximale energetisch rendement van donkere fermentatie ca. 10-15%. Voor fermentatie van biomassa met een hoog eiwit, vet of

cellulose gehalte is een rendement van minder dan 1% niet ongebruikelijk. In vervolgstappen kan een deel van de geproduceerde vetzuren ook worden omgezet in waterstof, het omzettingsrendement blijft echter lager dan voor thermochemische processen. Het energieverbruik van de thermochemische processen hangt sterk af van de hoeveelheid vocht in biomassa. Bevat biomassa veel vocht dan zal er veel energie moeten worden gestoken in het verdampen hiervan. Biologische processen kunnen met name worden gebruikt voor biomassa met een hoog vochtgehalte dat hierdoor ongeschikt is voor thermochemische behandeling. Een voorbeeld is voedselafval, dat een vochtgehalte heeft van rond de 80%, of afvalwater. De biologische waterstofproductieprocessen zijn nog niet ver genoeg ontwikkeld om op commerciële schaal te worden toegepast. Het lijkt dan ook niet waarschijnlijk dat in de komende tien jaar op industriële schaal waterstof geproduceerd gaat worden via de biologische route.

Bij waterstofproductie uit biomassa, hetzij via de thermochemische of via de biologische route, ontstaat een verscheidenheid aan producten. Deze bijproducten, zoals methaan, bio-olie en vetzuren bevatten ook energie en kunnen ook als energiedrager worden gebruikt. Het 'echte' energetische rendement zal daarom hoger zijn dan het rendement dat voor waterstofproductie alleen wordt bepaald. Het is waarschijnlijk dat waterstofproductie uit biomassa geen opzichzelfstaand proces zal zijn maar onderdeel van een productieproces van verschillende bioproducten en biobrandstoffen. Een gevolg van het ontstaan van verschillende gassen, is dat waterstof hiervan gescheiden moet worden wat een negatieve invloed heeft op de procesefficiëntie.

Waterstof uit water

Elektrolyse is het proces waarbij, onder invloed van een elektrische stroom, water in waterstof en zuurstof wordt gesplitst (waterontleding). Dit kost minimaal 39,4 kWh/kg H₂, maar door verliezen in de elektrolyse apparatuur is de benodigde hoeveelheid energie groter. Om de waterontledingsreactie gemakkelijker te laten verlopen, en het benodigde extra energieverbruik te beperken, wordt een katalysator gebruikt. In de meeste gevallen is dit een platina elektrode met een medekatalyst. Elektrolyse wordt al zo'n honderd jaar gebruikt en wordt toegepast voor waterstofproductie op grote schaal. Watersplitsing is in vergelijking met stoomreforming van aardgas een dure methode omdat de efficiëntie van grootschalige elektrolyse enkel rond de 50% ligt en hierdoor veel elektriciteit, een dure vorm van energie, nodig is. Bovendien zijn de benodigde elektroden en membranen (op dit moment nog) duur. Waterontleding van waterdamp kost minder energie dan waterontleding van water, bij een temperatuur van 2500°C zal water ontleden zonder elektrische stroom. Stoomelektrolyse vindt bij hoge temperatuur en druk plaats, hierdoor is minder elektriciteit nodig en kan een groter deel van de reactie met goedkopere (rest) warmte-energie worden uitgevoerd. Op dit moment is een typische temperatuur voor (hoge temperatuur) stoomelektrolyse tussen de 600-1000°C. Met stoomelektrolyse kan op basis van praktijktests een rendement tussen de 76-81% worden gehaald. Langdurige tests op grotere schaal van stoomelektrolyse moeten uitwijzen of deze technologie al klaar is voor de markt.

Kostprijs van Waterstof

In het algemeen zal waterstof uit een energetisch efficiënt schema goedkoper zijn dan wanneer inefficiënte productietechnieken worden gebruikt. Maar ook kostprijs, onderhoud en levensduur van materialen en de productie schaal kunnen een behoorlijke invloed hebben op de prijs van waterstof. Doordat niet overal ter wereld dezelfde duurzame energiebronnen op eenzelfde schaal voorhanden zijn, kunnen op verschillende locaties andere technologieën tot de voordeligste waterstof leiden. Ook zal transport en opslag van waterstof of van energie invloed hebben op de uiteindelijke waterstofprijs. Omdat van de waterstofproductiemethoden op basis van duurzame grondstoffen enkel elektrolyse op industriële / commerciële schaal wordt toegepast zijn prijzen moeilijk te vergelijken. Wel is er een goede inschatting van de productiekosten voor waterstofproductie op industriële schaal door omvorming van fossiele brandstoffen: 0,7–1,90 €/kg H₂. Dit zijn de kale productiekosten zonder compressie, opslag en distributiekosten. Deze bijkomend kosten zullen ook voor duurzaam geproduceerde waterstof moeten worden gemaakt. Zonder CO₂ heffingen op energie uit fossiele brandstoffen, zal de productieprijs van duurzaam opgewekte waterstof niet hoger mogen zijn dan de prijs voor waterstof uit fossiele brandstoffen.

Energie uit biomassa is op dit moment relatief goedkoop. In sommige gevallen kan zelfs geld worden gevraagd om biologisch 'afval' te verwerken. Vergassing van biomassa voor de productie van waterstof wordt nu op kleinere schaal toegepast in de praktijk. De kostprijs voor het geproduceerde waterstof is hierbij tenminste 6 €/kg H₂ (biomassakosten van 60 €/ton). Uit een modelstudie komt naar voren dat een productieprijs van rond de 3 €/kg H₂ (kosten biomassa ~40 €/ton) in de praktijk haalbaar moet zijn. Dit komt aardig in de buurt van de kosten voor waterstofproductie uit fossiele brandstoffen, maar is duidelijk nog niet concurrerend en niet bewezen in de praktijk.

Donkere fermentatie vergt veel minder energie input dan bv. biomassa vergassing. Een pilot project van gecombineerde waterstof en biogas productie middels donkere fermentatie van maiszetmeel en voedselafval resulteerde in een kostprijs van respectievelijk 12,2 en 1,6 €/kg H₂. Dit maakt duidelijk dat met donkere fermentatie 'goed geprijsde' waterstof kan worden gemaakt maar dat het type biomassa en de kostprijs hiervan een grote invloed hebben. In de genoemde studie was de prijs van maiszetmeel ~38–113 €/ton, terwijl het voedselafval 3–19 €/ton opleverde. De genoemde kostprijs van waterstof kan waarschijnlijk worden teruggedrongen wanneer productie van verschillende biomassa gebaseerde producten gecombineerd kan worden in een 'bioraffinering'. Naast waterstof kunnen ook: biobrandstoffen, vetzuren, methaan, chemicaliën of 'biobased' materialen worden gemaakt. Het concept van bioraffinering staat nog in de kinderschoenen en er zal nog een enorme ontwikkeling gemaakt moeten worden voordat dit in de praktijk, op enige schaal van betekenis, toegepast gaat worden. Het succes van een bioraffinering zal erg afhankelijk zijn van het type biomassa dat aangeleverd wordt.

Voor de productie van waterstof uit water is veel energie nodig, voornamelijk in de vorm van elektriciteit. Omdat 1) elektriciteit in een groot deel van de wereld

voornamelijk uit fossiele brandstoffen wordt gewonnen; 2) het rendement van vergassing van fossiele brandstoffen voor waterstofproductie hoger is dan het rendement van elektrolyse van water; en 3) een elektrolyse installatie hogere kosten met zich meebrengt dan een vergassingsinstallatie mag het geen verrassing zijn dat waterstof uit water (fors) duurder is dan waterstof uit fossiele brandstoffen. Voor een installatie met een verbruik van 50 miljoen kWh/jaar zal in Nederland de elektriciteitsprijs (inclusief toeslagen) ca. 0,075 €/kWh zijn. Met de bovenste verbrandingswarmte van waterstof (39,4 kWh/kg) en een omzettingsrendement van elektriciteit naar waterstof van 50% kan worden berekend dat de elektriciteitskosten voor elektrolyse ca. 5,9 €/kg H₂ zijn. De energiekosten beslaan ongeveer 75% van de waterstofproductiekosten met elektrolyse. De kale waterstofproductie zal dus ongeveer 7,9 €/kg H₂ zijn, of vertaald naar een energieprijs 0,20 €/kWh. De energieprijs is dus zonder compressie en transport en zonder omzetting van waterstof weer in elektriciteit al ca. 3 maal zo hoog als de elektriciteitsprijs. Uitgaande van een omzetting van 50% van de energie in waterstof naar elektriciteit, betekent dit dat elektriciteit uit waterstofopslag minimaal 6 keer meer zal kosten als stroom van het huidige net. Het is de verwachting dat in 2030 de kosten voor waterstof via elektrolyse gedaald zullen zijn, maar dit hangt erg af van de energieprijs. Stoom elektrolyse is momenteel nog geen industriële technologie maar er zijn twee belangrijke redenen waarom deze technologie na 2030 tot lagere waterstof productiekosten kan leiden dan via elektrolyse: 1) warmte is goedkoper dan elektriciteit en 2) elektrolyse verloopt efficiënter bij hogere temperatuur. De verwachting is dat in 2030 de totale productie kosten, exclusief compressie en transport, 5,3–7 €/kg H₂ kunnen zijn.

Op gedecentraliseerde, kleinere schaal zal waterstofproductie duurder zijn. Voordeel is dat er minder transport en/of infrastructuur nodig is. In een Europese studie (2018) van een kleinschalige elektrolyse installatie worden de totale minimale productie kosten geraamd op ca. 13 €/kg H₂, of te wel ca. € 0.40/kWh H₂. Deze prijs komt redelijk overeen met de kosten van gecentraliseerde productie na bezorging via trucks en trailers.

Perspectief van Waterstof

De markt voor Groninger aardgas bedraagt ca. 490 TWh/jaar. Dit komt overeen met de energie-inhoud van ca. 107 miljoen ton biomassa. Bij de aanname dat het rendement voor waterstofproductie uit biomassa met vergassing op grote schaal 70% is (meest positieve scenario), dan is er dus minimaal $107/0,7 \approx 153$ miljoen ton biomassa nodig om het aardgas te vervangen. Volgens een rapport van de rijksoverheid is er in 2030 voor Nederland 7-45 miljoen ton droge biomassa beschikbaar voor energieopwekking, compostering en productie van chemicaliën en materialen. Er kan dus gerust geconcludeerd worden dat er onvoldoende biomassa beschikbaar zal zijn om te voorzien in de energiebehoefte van Nederland, waaraan nu met aardgas wordt voldaan. Verder is de verwachting dat de vraag naar biomassa ook in andere productiesectoren zal toenemen. Daarmee is niet gezegd dat de technologie voor waterstofproductie uit biomassa niet verder hoeft te worden ontwikkeld omdat het

zeker een bijdrage aan de energiebehoefte kan leveren en ook een belangrijk onderdeel van bioraffinering kan vormen. Door de toenemende vraag naar biomassa kan de geprojecteerde kostprijs van waterstof uit biomassa wel eens hoger uitvallen dan geschat op basis van technologische verbeteringen. Om tot de eerder genoemde 70% efficiëntie te komen is er nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig. Hierdoor zal waterstof uit biomassa in ieder geval in de komende tien jaar geen grote rol vervullen op de energiemarkt.

De kosten van waterstof dat geproduceerd is met elektrolyse zijn hoog en het energetisch rendement is nog relatief laag (40-67%). In 2030 kan dit rendement voor stoom elektrolyse opgelopen zijn tot boven de 80%. Een open vraag is nog hoe lang het duurt voordat waterstof voor een concurrerende prijs kan worden gemaakt. Niet voor 2030 is de verwachting op basis van de laatste onderzoeken en waarschijnlijk ook niet voor 2035. Maar al was het mogelijk om reeds vandaag al voor een gunstig tarief waterstof uit water te produceren en te gebruiken als energiedrager, dan nog zal energie uit dit waterstof het aardgas, de olie, kolen en kerncentrales niet kunnen vervangen. Dit omdat in Nederland eenvoudigweg niet voldoende duurzame elektriciteit opgewekt wordt om een grote hoeveelheid waterstof te produceren. Volgens het CBS was 6,6% van de gebruikte energie in 2017 van duurzame oorsprong. Ongeveer 60% van deze energie komt trouwens uit biomassa, zonne-energie en windenergie zijn goed voor ~32%. Een deel van deze 6,6% kan gelijk via het net gebruikt worden door de consument een ander deel is alleen voor lokaal gebruik geschikt. Weer een ander deel zal voor langere of kortere tijd moeten worden opgeslagen, dit deel omvat de energie die gebruikt kan worden voor waterstofproductie.

Doordat waterstof slechts een opslagmedium is voor energie is het niet het antwoord op de duurzame energieschaarste. In vergelijking met het rendement van batterijen en condensatoren (95%, korte termijn) is het rendement van energieopslag in waterstof nog laag: 30–43%. En als waterstof onder druk of in vloeibare vorm wordt bewaard is dit rendement nog tot een derde lager. Hierdoor is korte termijn opslag van energie in waterstof niet wenselijk omdat het tot kostbare verliezen van duurzame energie zal leiden. Verder geldt dat bij een lagere energieopslagefficiëntie, een groter areaal aan bv. zonnepanelen / collectoren of windmolens nodig is om voldoende energie te produceren, dit betekent een grotere impact op de omgeving en milieu. Door de relatief hoge specifieke energiedichtheid (kWh/kg) kan waterstof interessant zijn voor niet aan het energienet gekoppelde toepassingen zoals verkeer en vervoer. Vooral daar waar veel energie nodig is en (huidige) batterijen te weinig capaciteit of te veel gewicht hebben en er weinig tijd is voor opladen liggen kansen voor waterstof. Indirect kan waterstof, in combinatie met CO₂, als grondstof dienen voor duurzaam geproduceerde kerosine voor vliegtuigen. Daarnaast zal waterstof een belangrijke rol kunnen spelen in industrieën waar hoge temperaturen nodig zijn en waterstof zal ook nog steeds als grondstof in de chemische industrie dienen.

Doordat energieopslag in waterstof geen last heeft van zelfontlading, zoals bij batterijen en condensatoren, kan de energie 'oneindig' lang bewaard blijven. Seizoensgebonden energieopslag is een vraagstuk dat nog grotendeels open ligt en

waar waterstof uitkomst kan bieden. Vooral als de efficiëntie (elektrisch – waterstof – elektrisch) van omkeerbare brandstofcellen verder verhoogd kan worden. In experimenteel werk is een stabiele 'round trip' efficiëntie van 75% gehaald, dat is veelbelovend voor de toekomst, maar op dit moment nog niet toepasbaar op commerciële schaal. Het lokaal produceren van waterstof kan daarnaast een interessante optie zijn om het elektriciteitsnet te ontlasten.

Conclusie

Met het in perspectief plaatsen van de potentie van waterstof als de energiedrager wordt het pijnlijk duidelijk dat we qua energieverbruik op veel te grote voet leven en dat de schoen behoorlijk wringt. Als energiedrager bevat waterstof relatief veel energie, maar er moet nog veel meer energie in worden gestoken om het te produceren. Deze energie is in duurzame vorm simpelweg niet beschikbaar in Nederland. Besparing van energie is daarom een belangrijk deel van de oplossing voor het energievraagstuk die: 1) voor kostenverlaging zorgt, 2) geen broeikasgassen produceert, 3) de milieudruk van de mens vermindert, en 4) vandaag al kan worden ingezet. Door bewustwording van de grote energetische voetafdruk van alle producten, activiteiten en gemakken die de mens dienen kan een omslag in denken en hopelijk doen worden gemaakt. Met of zonder waterstof.

1 Introductie

Waterstof, u heeft er ongetwijfeld over gehoord en u bent er ook vast en zeker mee in aanraking gekomen. Sterker nog we bestaan voor 10% uit waterstofatomen (op basis van gewicht). Het waterstofatoom (scheikundig deeltje met symbool H) is het meest voorkomende en simpelste element in het heelal. Op aarde is waterstof veelal gebonden aan bv. zuurstof (O)- of koolstofatomen (C). De meestvoorkomende waterstofverbinding op aarde is die tussen twee waterstofatomen en een zuurstofatoom: H₂O (water). Omdat ongebonden waterstof niet voorradig is op aarde zal het eerst moeten worden gemaakt voordat het als brandstof gebruikt kan worden. Om deze reden wordt waterstof vaak een energiedrager genoemd. Strikt genomen zijn fossiele brandstoffen ook energiedragers, het is zonne-energie opgevangen en opgeslagen door planten en algen, honderden miljoenen jaren geleden.

De zon en wind zijn waarschijnlijk de meest bekend voorbeelden van duurzame energiebronnen. Om van deze bronnen elektriciteit te maken worden bv. zonnepanelen en windmolens gebruikt. Als het donker is en windstil wordt er geen elektriciteit geproduceerd. Gedurende een heldere zomerdag met een flinke bries, wordt er juist veel meer stroom geproduceerd dan gebruikt en dan het elektriciteitsnet kan verwerken. Deze energiebronnen kunnen dus niet ten alle tijde worden gebruikt zonder energie tijdelijk op te slaan. Energie opslaan kan o.a. in accu's, in de vorm van warmte, als hoge druk, als potentiële bewegingsenergie (bv. oppompen van water in stuwweren) of in chemische stoffen. Waterstof is een manier om energie in chemicaliën op te slaan. Andere voorbeelden zijn het maken van glucose (suiker) door planten en bomen, of door energie te gebruiken om een chemisch potentiaalverschil te creëren door zout water te scheiden in zoet en 'dubbelzout'. Op dit moment is energieopslag minder van belang omdat kolen- of gascentrales ten alle tijde energie kunnen leveren. Echter, in de (nabije) toekomst zal de mogelijk voor energie opslag cruciaal zijn voor het goed functioneren van het energienet.

Centrale vragen die in deze rapportage behandeld worden: 1) Hoe kan een waterstofmolecuul ons van energie voorzien? 2) Wat is de huidige staat van de waterstofproductietechnologie? 3) Welke technologische ontwikkelingen in waterstofproductie zijn te verwachten in de nabije toekomst? 4) Kan er genoeg waterstof geproduceerd worden om onafhankelijk te worden van fossiele brandstoffen? 5) Zal de energieprijis hierdoor stijgen?

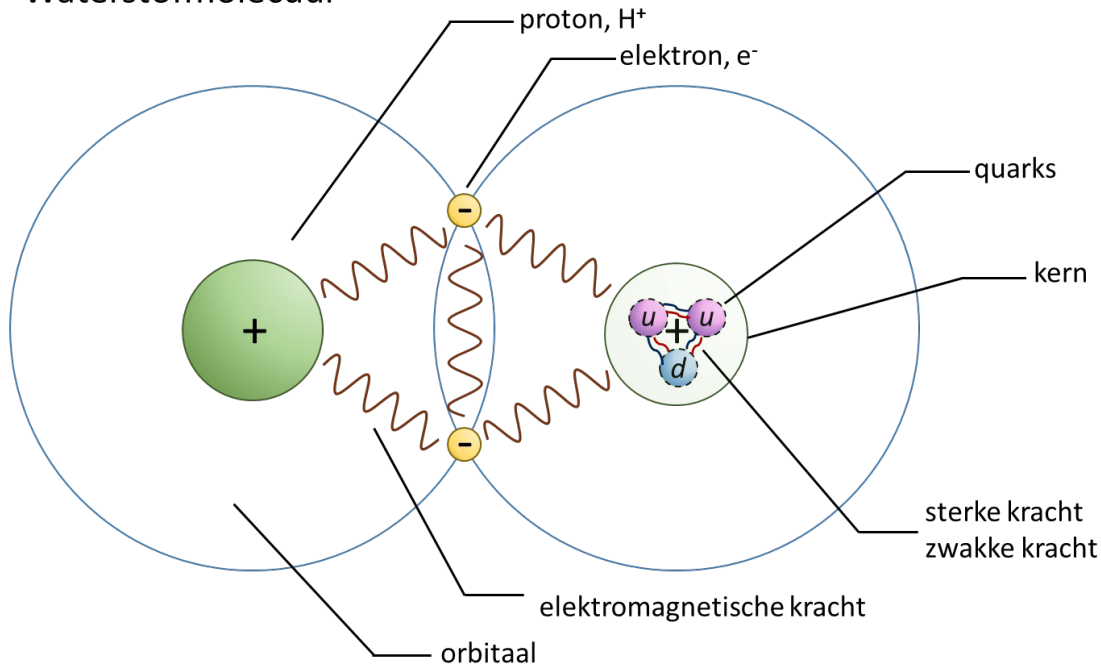
2 Energie in waterstof

Deze paragraaf gaat in op de fundamentele kant van energie in waterstof. Het is geen alledaagse materie maar u hoeft geen natuurkundige of scheikundige te zijn om de kern te kunnen begrijpen. Zolang u zich niet laat afschrikken door scheikundige namen en formules, zult u een eind komen.

Omdat waterstofatomen gemakkelijk bindingen aangaan, ook met andere waterstofatomen, komt waterstof gewoonlijk niet voor als H maar als een verbinding van twee H atomen: H-H, of kortweg H₂. Zo'n verbinding van atomen wordt een molecuul genoemd, in dit geval een waterstofmolecuul. Het waterstofmolecuul wordt ook waterstof genoemd en is onder normale omstandigheden een gas, dit is het waterstof waar dit rapport over gaat. Hoog in de atmosfeer komt H₂ in lage concentraties voor, maar ook dit gas gaat gemakkelijk chemische reacties aan met andere atomen en moleculen waardoor H₂ op aarde eigenlijk niet voorkomt.

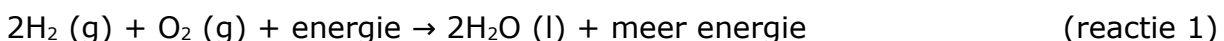
Een waterstofmolecuul bestaat dus uit waterstofatomen, deze kunnen weer worden opgedeeld in een atoomkern en een elektronenwolk. In de elektronenwolk van waterstof bevindt zich 1 'elektron', een elementair (d.w.z. niet verder op te splitsen) deeltje, met een elementaire lading van -1. In de atoomkern van waterstof bevindt zich een 'proton'. Een deeltje met elementaire lading van +1. Er zijn ook waterstofatomen met daarnaast nog 1 (deuterium) of 2 (tritium) neutrale deeltjes (neutronen) in de kern, deze komen op aarde echter bijna niet voor (< 0,02%). Het proton in de waterstof kern is ongeveer 1836 keer zwaarder dan het elektron en kan verder worden opgesplitst in nog kleinere eenheden: 'quarks'. Deze quarks, zijn net als elektronen elementaire deeltjes en kunnen niet verder worden opgesplitst. Quarks worden bijgehouden door de zogenaamde 'sterke' en 'zwakke' kracht, welke samen met de elektromagnetische kracht en de zwaartekracht de vier fundamentele krachten of interacties van de natuurkunde vormen. De zwaartekracht speelt in de deeltjesfysica geen rol omdat deze kracht op de minieme schaal van de bouwstenen van atomen meer dan een quadriljoen (1 met 24 nullen) keer zwakker is dan de zwakste van de andere drie krachten. De sterke kracht en de zwakke kracht zijn alleen actief binnen de kern van het atoom. De elektromagnetische kracht zorgt o.a. voor de aantrekking tussen het negatief geladen elektron en de positief geladen atoomkern. Door de interacties van de elementaire deeltjes heeft het atoom een bepaalde hoeveelheid energie en dus een bepaalde massa. De relatie tussen energie en massa wordt beschreven in een (bekende) vergelijking van Einstein: $E = m \cdot c^2$, of te wel energie (E) is gelijk aan de massa (m) maal de lichtsnelheid (c) in het kwadraat. In de natuur probeert een systeem zich altijd zo te organiseren dat het zo weinig mogelijk energie bevat, dit wordt in de kwantummechanica de grondstaat of de laagste staat van energie genoemd.

Waterstofmolecuul



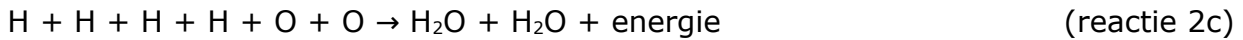
Afbeelding 1: Schematische weergave van een waterstofmolecuul met in groen de atoomkern, het zogenaamde proton, dat weer uit twee 'up' quarks (in paars) en een 'down' quark (in blauw) bestaat. De elektronen zijn weergegeven in geel. De relevante fundamentele krachten zijn geschetst als golfbewegingen tussen de deeltjes: tussen quarks de sterke en zwakke krachten, tussen elektronen en protonen de elektromagnetische kracht.

Elektronen bewegen continu, het is dus niet te zeggen waar een elektron zich op welk moment bevindt. Met wiskunde kan echter wel het gebied waarin een elektron zich hoogstwaarschijnlijk bevindt worden berekend, dit gebied staat bekend als een orbitaal. Als orbitalen van verschillende atomen overlappen, is er interactie (elektromagnetische kracht) tussen de elektronen onderling, en tussen beide elektronen met beide kernen. Wanneer de elektronen en atoomkernen zo georganiseerd kunnen worden dat de energietoestand van de samenvoeging (het molecuul) lager is dan van de twee individuele deeltjes dan vindt er een binding plaats. Het verschil in energie wordt hierbij afgegeven aan de omgeving. Moleculen kunnen vervolgens weer reageren met andere atomen of moleculen. Deze reacties worden bestudeerd in de Scheikunde. Waterstof (H_2) reageren met zuurstof (O_2) tot water (H_2O), deze reactie verloopt niet spontaan er is een klein beetje energie nodig (vonkje) om de reactie op gang te brengen:



Het getal twee staat voor twee 'mol'. Een mol is net als een dozijn een getal aanduiding. Het is echter niet aan te raden een mol eieren te kopen, in een mol gaan er namelijk $6,02214 \times 10^{23}$, ook wel: 0,602214 quadriljard. Het moge duidelijk zijn dat een mol een enorm groot aantal is. En die ontelbare kleine verschuivingen in energietoestanden van atomen en moleculen samen kunnen voor een hoeveelheid energie zorgen waar wij iets mee kunnen. Er is echter een vonkje nodig om de reactie te later

verlopen omdat er van de twee mol waterstof en de mol zuurstof bestaande bindingen moeten worden verbroken alvorens ze kunnen reageren tot twee mol water. Dus de eigenlijke reacties zijn:



Reactie 2a kost ~ 872 kJ en reactie 2b kost 498 kJ, dit is veel meer energie dan in een statisch vonkje dat een waterstof en zuurstof mengsel kan doen laten ontploffen. Dit komt omdat niet voor alle quadrijard deeltjes de energie hoeft te worden ingevoerd om de kettingreactie opgang te brengen. De energie die vrijkomt bij reactie 2c is ~ 1845 kJ. Het verschil tussen reacties a + b met c is: $(1845 - 498 - 872)/2 = 238$ kJ/mol H_2 , dit is de zogenaamde Gibbs vrije energie (ΔG , J). De theoretische waarde hiervan voor reactie 1 bedraagt 237,2 kJ/mol H_2^1 , deze energie verandering is de energie die nuttig gebruikt kan worden in een elektrisch systeem (reversibele energie). Wanneer waterstof volledig verbrand wordt komt er echter 285,8 kJ/mol H_2 vrij, het verschil van 48,6 kJ is de zogenaamde niet reversibele energie en is gelijk aan de temperatuur (T , K) maal de verandering in 'entropie' (ΔS , J/K)¹. De totale energie verandering, ook wel 'enthalpie' verandering (ΔH , J) wordt gegeven als:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (\text{vergelijking 1})$$

Onder de juiste omstandigheden kan een vonkje met een energie van minder dan 0,004 mJ aan energie al een ontploffing van een waterstof en zuurstof mengsel veroorzaken². Een ontploffing ontstaat doordat supersnel zoveel energie in de vorm van warmte vrijkomt, waardoor de lucht ogenblikkelijk uitzet en een drukgolf veroorzaakt. In een brandstofmotor zal deze explosie in een cilinder plaatsvinden en een zuigerstang omhoog duwen zodat de vrijgekomen energie in beweging kan worden omgezet. Bij de omzetting van energie vindt (altijd) energieverlies plaats. Niet dat energie verloren gaat, maar het komt vrij als warmte door bv. wrijving en wordt afgegeven aan de omgeving. Deze energie is niet bruikbaar om een motor aan te drijven en wordt dus niet 'nuttig' gebruikt. Als de motor gebruikt wordt om stroom op te wekken (aggregaat) dan zal er nogmaals een omzettingsverlies plaatsvinden: bewegingsenergie naar elektriciteit. Deze elektriciteit is wisselspanning, en als een omvormer wordt gebruikt om gelijkspanning te maken vindt er opnieuw een energieverlies plaats. Het rendement, of efficiëntie (symbool η), van de energie-omzetting is gedefinieerd als de energie die nuttig gebruikt wordt gedeeld door het totaal van de energie dat in het systeem gaat:

$$\eta = E_{\text{uit, nuttig}} / E_{\text{in}} \cdot 100\% \quad (\text{vergelijking 2})$$

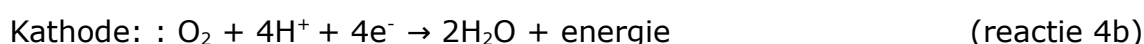
Het maximale rendement van een brandstofmotor (η_{motor}) met zuigers en cilinders is ongeveer 30%. In een aggregaat kan bewegingsenergie omgezet worden in elektrische energie met een rendement ($\eta_{\text{aggregaat}}$) van ca. 90-95%. Hierdoor blijft er van de oorspronkelijke reactie energie $0,30 \cdot 0,925 \approx 28\%$ over. Door de hitte die

vrijkomt zal het zuurstof uit lucht ook reageren met stikstof (N₂), dus tenzij er pure zuurstof gebruikt wordt, zullen ook stikstofoxiden (NO_x) worden geproduceerd:



Het blijkt dat bij verbranding van waterstof ongeveer net zoveel NO_x geproduceerd wordt dan bij verbranding van benzine³, maar door de 'vlamsnelheid' van waterstof is een hogere NO_x uitstoot waarschijnlijker. Dieselmotoren hebben een nog hogere NO_x uitstoot. NO_x speelt een rol in smogvorming, ozon vorming en zure regen. NO_x heeft een koelend effect op de atmosfeer⁴ en is dus geen broeikasgas (N₂O is dat wel).

Het lage rendement en de uitstoot van stikstofoxiden maken het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor onaantrekkelijk. Een alternatief is het gebruiken van brandstofcellen, deze hebben een hoger rendement en omdat er geen verbranding plaatsvindt komt er echt alleen maar water vrij. Er zijn een heel scala aan brandstofcellen, de meeste nog steeds in ontwikkeling. Door specifiek onderzoek en ontwikkeling in nanotechnologie en materiaalwetenschappen worden brandstofcellen steeds efficiënter in het omzetten van waterstof in elektriciteit. Typisch rendement van de beste brandstofcellen is op dit moment rond de 60%. Het hoogst behaalde rendement is voor nu 62%⁵, ongeveer het dubbele van een brandstofmotor. Een brandstofcel bestaat uit twee compartimenten gescheiden door een selectief membraan of een 'halfdoorlatend' elektrolyt (zie Afbeelding 2). In het ene compartiment bevindt zich een positief geladen elektrode (anode) en in het andere compartiment een negatief geladen elektrode (kathode). Bij de anode wordt waterstof ingevoerd en bij de kathode zuurstof. Door een katalysator, bv. een platinacoating op de anode, wordt H₂ gesplitst in twee protonen (2H⁺) en twee elektronen (2e⁻). De elektronen stromen via de anode en een externe verbinding naar de kathode: er loopt een stroom. Aan de kathode worden deze elektronen opgenomen door O₂, hierdoor ontstaan zuurstof ionen (O²⁻). De scheiding tussen de compartimenten heeft door zijn chemische samenstelling van zichzelf een negatieve lading en kan hierdoor bijna uitsluitend positief geladen deeltjes doorlaten. De H⁺ ionen worden door de negatief geladen kathode aangetrokken en door de positief geladen anode afgestoten. Onder invloed van dit elektrische potentiaalverschil, zullen de protonen door de halfdoorlatende scheiding bewegen. In de kathode kamer zullen de protonen reageren met zuurstof tot water. De volgende half reacties vinden dus plaats:

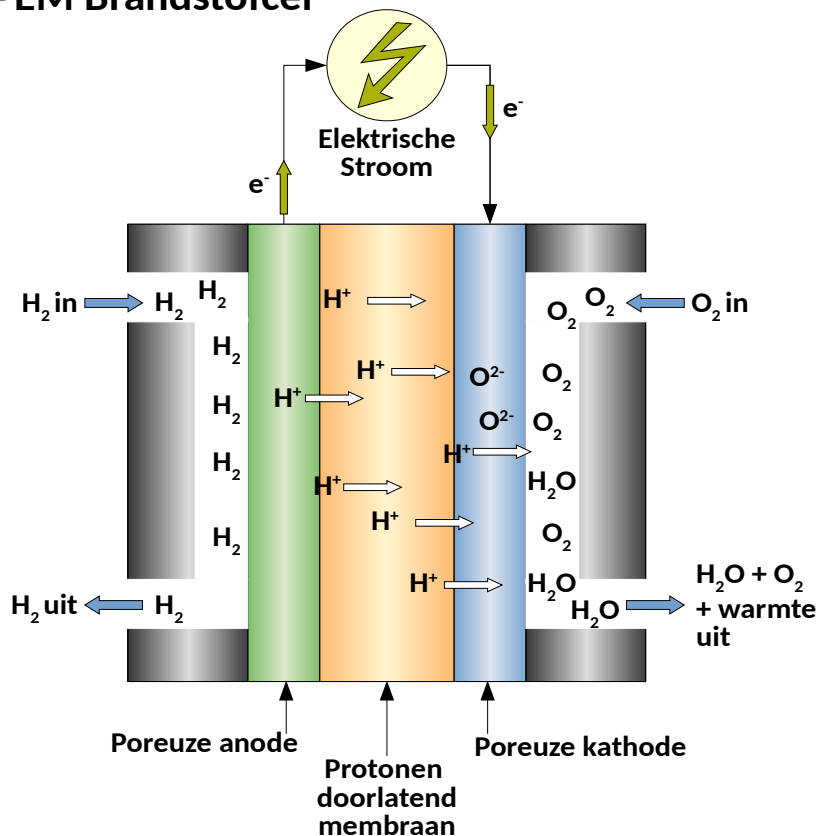


De slimheid van de brandstofcel is dat de elektronen die bij de chemische (reductie / oxidatie) reactie betrokken zijn door een extern circuit stromen en zo gebruikt kunnen worden voor 'werk'. In een brandstofcel kan de reversibele energie van reactie 1 gebruikt worden om een spanningsverschil over de elektroden te genereren. Het maximale voltage dat opgewekt kan worden (V_{max} , V) is te berekenen met:

$$V_{\text{max}} = \Delta G / n * F \quad (\text{vergelijking 3})$$

In deze vergelijking is n het aantal elektronen dat betrokken is in de reactie (2 mol) en F is de constante van Faraday (96485,332 C/mol). Met de eerder genoemde Gibbs vrije energie als 237,2 kJ/mol, volgt uit vergelijking 3 dat $V_{\max} \approx 1,23$ V. Naast de maximaal 237,2 kJ/mol elektrische energie komt er in een brandstofcel ook nog 48,6 kJ aan warmte vrij. Deze energie, als deze energie als verloren wordt beschouwd is het maximale rendement van een brandstofcel dus 83% ($237,2/(237,2+48,6) \cdot 100\%$). Hoe minder efficiënt de brandstofcel, hoe meer warmte en hoe minder elektriciteit geproduceerd wordt. Deze warmte-energie kan deels worden teruggewonnen en nuttig gebruikt om het rendement omhoog te brengen. Het rendement van een brandstofcel is in de praktijk dichterbij 50% dan bij 83%, er zal in zo'n cel dus 142,9 kJ/mol H_2 aan elektriciteit worden gemaakt, dit levert een voltage op van 0,74 V (vergelijking 3). Om het opgewekte voltage verder omhoog te brengen, worden meerdere brandstofcellen gestapeld en in serie verbonden. Om de stroomsterkte (A) te vergroten kunnen verscheidene van deze 'brandstofcel-stapels' parallel worden gekoppeld.

PEM Brandstofcel



Afbeelding 2: Schematische weergave van een PEM Brandstofcel. Waterstof (H_2) wordt ingevoerd en aan de positief geladen anode gesplitst in protonen (H^+) en elektronen (e^-). De protonen bewegen door het membraan naar de negatief geladen kathode, de elektronen stromen door een extern circuit. Aan de kathode wordt zuurstof (O_2) ingevoerd dat onder invloed van de elektronenstroom gesplitst wordt in zuurstofatomen (O^{2-}) die reageren met de protonen tot water (H_2O). Er wordt een overmaat aan zuurstof en waterstof ingevoerd.

3 Waterstofproductie methoden

3.1 Huidige waterstofproductie methoden

Momenteel wordt meer dan 95% van alle waterstof op aarde gemaakt door 'stoomhervorming' van aardgas (~48%) en vergassing van steenkool (~18%) of olie (~30%)⁶⁻⁸. De hoeveelheid waterstof dat gemaakt wordt uit water is rond de 4%, dit gebeurt met elektrolyse en stomelektrolyse. In Nederland wordt ca. 90% van het waterstof gemaakt door stoomhervorming van aardgas. In dit proces reageren 1 deel methaan (CH₄) en 2 delen stoom (H₂O) bij hoge temperatuur (700-1100 °C) tot 4 delen waterstof en 1 deel koolstofdioxide (CO₂):



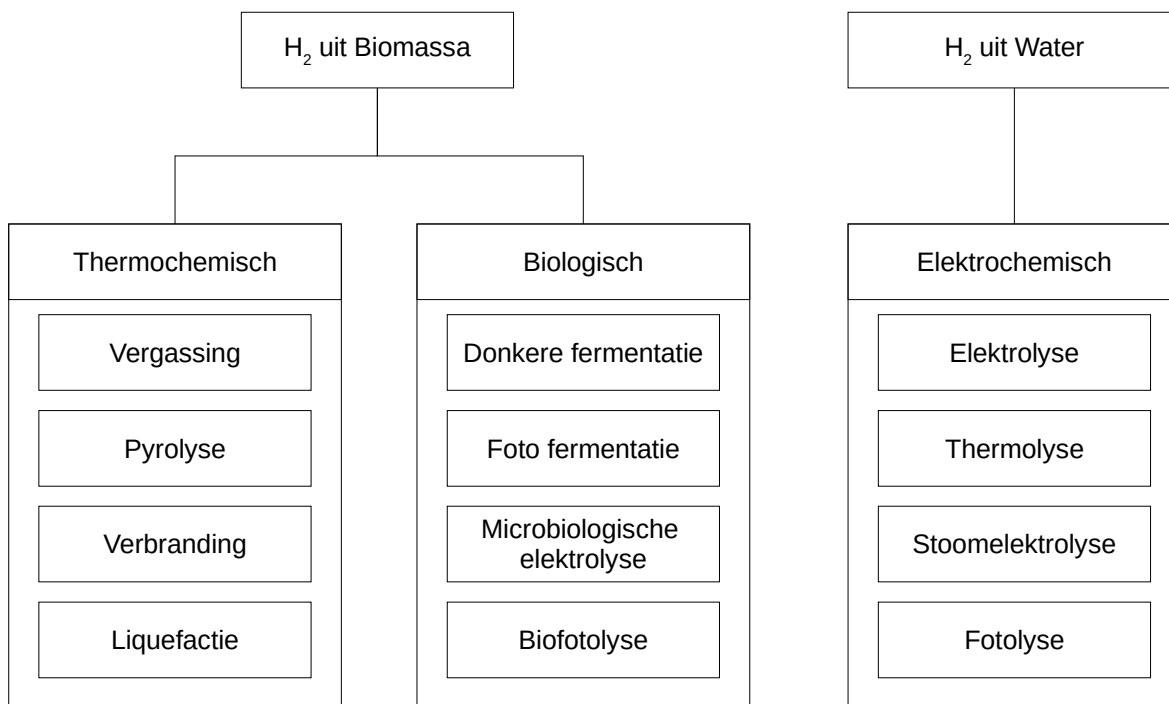
Ook steenkool en bruinkool worden gebruikt voor waterstofproductie. Dit gaat via zogenaamde vergassingsreacties^{9,10} waarin kool gedeeltelijk wordt verbrand en het ontstane CO₂ verder reageert met de onverbrande kool (C) tot koolstofmonoxide (CO). Vervolgens wordt CO met stoom weer omgezet in waterstof en koolstofdioxide. De verhouding van de reactieproducten varieert per proces en de samenstelling van de brandstof. Bij vergassing komt per hoeveelheid H₂ meer CO / CO₂ dan bij de productie uit aardgas.

Het energetische rendement van stoomhervorming van aardgas is ~80%⁷. Zou u het waterstof uit deze reactie gebruiken voor energieproductie, dan bent u dus al ~20% van de energie 'kwijt'. Op dit moment wordt waterstof dan ook niet geproduceerd als een energiedrager maar voornamelijk als een 'chemische grondstof'. Het meeste waterstof wordt gebruikt voor de productie van ammoniak (grotendeels voor kunstmestproductie) en in kraakprocessen in olieraffinaderijen.

3.2 Duurzame waterstofproductie methoden en grondstoffen

Waterstof dat geproduceerd wordt uit fossiele brandstoffen is geen alternatief is voor fossiele brandstoffen. Om een omslag naar duurzame energie te maken zal waterstof met een duurzame methode en uit duurzame grondstoffen moeten worden gemaakt. Zoals eerder genoemd is waterstof volop aanwezig in water, maar ook biomassa bevat relatief veel waterstof. Afbeelding 3 laat zien hoe waterstof geproduceerd kan worden uit biomassa of water via verschillende routes: thermochemisch, biologisch of elektrochemisch.

De energie uit biomassa is zonne-energie opgeslagen in biochemische verbindingen, ook wel organisch materiaal genoemd. Deze verbindingen worden gemaakt tijdens de fotosynthese: het proces waarbij zonne-energie en anorganisch materiaal omgezet wordt in koolhydraten. Dit gebeurt door planten, algen en bacteriën. Om energie uit biomassa gemakkelijker te kunnen gebruiken wordt biomassa omgezet in bv. biogas, ethanol, biodiesel of waterstof.



Afbeelding 3: Verschillende waterstofproductieprocessen op basis van biomassa en water

Een aantrekkelijke eigenschap van waterstof is dat verbrandingswarmte (onderwaarde in MJ/kg) voor waterstof (120) hoger is dan voor biogas (50), ethanol (28), of biodiesel (37). Waterstof is echter erg licht (0,08988 g/l) en hierdoor is de hoeveelheid energie per volume-eenheid klein, duizenden keren kleiner dan voor diesel. Dit komt duidelijk naar voren in Tabel 1, waarin de zogenaamde specifieke (energie per gewicht) en volumetrische (energie per volume) energiewaarden voor verschillende energieopslagmanieren is weergegeven (data uit ¹¹).

Door waterstof onder hoge druk te plaatsen wordt de energiedichtheid veel hoger, het vloeibaar maken van waterstof helpt nog meer. In vloeibare vorm is de volumetrische energiedichtheid van waterstof noch maar 5 keer kleiner dan van diesel. Het vloeibaar maken van waterstof gebeurt bij -252.8°C (kookpunt). Ter vergelijking dit is voor aardgas is bij -162°C. Het produceren en vloeibaar maken van waterstof voor energieopslag op kleine schaal (bv. thuis) is hierdoor wat lastig. Op industriële schaal gebeurt het al jaren, zo gebruikt bv. NASA kerosine en vloeibare waterstof voor raketaandrijving, ook bij de maanlanding in 1967. Voordelige eigenschappen van waterstof zijn o.a. dat er geen mijnen nodig zijn voor waterstof, het is overall aanwezig, het is relatief eenvoudig om te zetten in elektriciteit en bij gebruik komen geen broeikasgassen vrij. Deze voordelen gelden trouwens voor meer energieopslagmogelijkheden. Een kanttekening die bij Tabel 1 gemaakt dient te worden is dat het onder 700 bar druk brengen van waterstof ongeveer 3 kWh/kg kost. Voor het vloeibaar maken van waterstof is dit 11-15 kWh/kg¹², dat is meer dan een derde deel van de energie per kg. De opslag methode zal hierdoor grote gevolgen hebben voor het energetische rendement.

Tabel 1: Energieopslagtechnologieën met specifieke en volumetrische energie dichtheid.

Energieopslagtechnologie	Energie (kWh/kg)	Energie (kWh/l)
Waterdam, 400 m hoog	0,0011	0,0011
Samengeperste lucht, 350 bar	0,14	0,012
Lithium-ion batterij	0,19	0,56
Benzine	13	9
Diesel	13	10
Vloeibaar aardgas, -162°C	15	6,1
Waterstof	33	0,0027
Waterstof, 700 bar	33	1,6
Vloeibaar waterstof, -253°C	33	2

Technisch gezien is het mogelijk om met duurzame energie waterstof te produceren uit duurzame grondstoffen. De meeste technieken zijn echter alleen op laboratoriumschaal toegepast en zijn nog niet rijp voor toepassing in de praktijk. Een groot struikelblok voor deze technologieën blijkt een hoge kostprijs en een laag energetisch rendement in vergelijking met stoomhervorming van aardgas. Als energiedrager zal waterstof qua kostprijs moeten concurreren met o.a. biogas, biodiesel, ethanol en batterijen. In de volgende paragrafen wordt een technologische beschrijving en huidige stand van zaken van de technieken uit Afbeelding 3 gegeven.

3.3 Thermochemische waterstofproductie

Biomassa bestaat uit lange chemische verbindingen van grotendeels koolstof, zuurstof en waterstof. Om waterstof vrij te maken zullen de chemische bindingen in deze ketens moeten worden verbroken, dit kost energie. In de thermochemische waterstofproductieprocessen wordt deze energie in de vorm van warmte aan de biomassa toegevoegd waardoor waterstof, CO₂ en andere kleinere moleculen ontstaan. Omdat biologisch materiaal ook bv. stikstof, fosfaat en zwavel bevat, ontstaat er een verscheidenheid aan producten, waardoor scheiding en zuivering van het waterstofgas nodig is. De CO₂ die vrijkomt uit biomassa, bevindt zich in de zogenaamde korte koolstofkringloop (biomassa ↔ lucht) en leidt niet tot extra CO₂ in de atmosfeer, zolang de groei van biomassa tenminste even groot is als de hoeveelheid gebruikte biomassa (biomassabalans).

3.3.1 Thermochemische technologieën

Zoals Afbeelding 3 laat zien omvat de thermochemische waterstofproductieroute: 'vergassing', 'pyrolyse', verbranding en 'liquefactie' van biomassa. De vergassing en pyrolyse processen worden ook toegepast in waterstofproductie uit fossiele brandstoffen. Biomassa **pyrolyse** is het door hitte (400 – 800°C) uiteenvallen van

biomassa onder zuurstofloze condities. Hierbij ontstaan condenseerbare gassen (na afkoeling bio-olie), niet condenseerbare gassen (o.a. CO₂, CO, H₂, CH₄) en biokool. Pyrolyse wordt voornamelijk voor de productie van bio-olie (ook wel pyrolyse-olie) en biokool gebruikt. Voor effectieve waterstof productie zijn verdere hervormingen van producten nodig ('reforming').

Tijdens biomassa **vergassing** vindt er gedeeltelijke oxidatie (reactie met zuurstof) van de biomassa plaats en de temperatuur is gewoonlijk wat hoger dan bij pyrolyse (>800°C). Bij dit proces wordt biomassa volledig omgezet in syngas, vergelijkbaar met de niet condenseerbare gassen van de pyrolyse reactie. De samenstelling van het gas verandert naar gelang er lucht, zuurstof of stoom wordt gebruikt voor de gedeeltelijke oxidatie. Met gebruik van katalysatoren kan de waterstofproductie middels pyrolyse en vergassing verder worden bevorderd^{13,14}. Bij **verbranding** (volledige oxidatie) van biomassa wordt geen waterstof geproduceerd maar de vrijkomende warmte-energie kan gebruikt worden voor waterstofproductie. Verbranding op zichzelf is geen efficiënte manier om waterstof te maken en meer een laatste mogelijkheid om biomassa te gebruiken in waterstofproductie. Deze methode zal in dit rapport niet verder worden behandeld. Biomassa kan veel water bevatten, in de drie bovenstaande technieken zal het verdampen van water tijdens het verhitten van biomassa leiden tot een hoger energieverbruik. Hierdoor zijn pyrolyse, vergassing en verbranding geschikt voor relatief droge biomassa.

Smelten is de faseovergang van een vaste stof naar een vloeistof. **Liquefactie** is een bredere beschouwing van het vloeibaar worden van een materiaal. Grond dat nat wordt kan een vloeibare massa vormen, de zandkorrels zijn echter niet gesmolten. Hydrothermische (of directe) liquefactie (HTL) van biomassa is het onder invloed van druk (~40 – 220 bar¹⁵) en temperatuur (~250 – 375°C¹⁵) vloeibaar maken van biomassa. Moleculen van lange koolstofketens worden tijdens dit proces omgezet in een suspensie van kortere koolstofketens en CO₂. Deze vloeibare massa wordt ook bio-olie genoemd (Engels: 'biocrude'). Onderin de temperatuurband vindt er vooral productie van biokool plaats, bij hogere temperatuur ontstaat er ook syngas, door vergassing van biomassa. De bio-olie die bij HTL geproduceerd wordt bevat o.a. zuren, alcoholen, ketonen en phenolen¹⁵ en heeft een hogere energetische waarde dan pyrolyse-olie. Door het gebruik van een katalysator kan productie van bepaalde stoffen verder worden gestimuleerd. Naast CO₂, CO, CH₄ kan ook H₂ gas vrijkomen bij HTL van biomassa. Het gehalte H₂ is over het algemeen echter minder dan een paar procent van het geproduceerde gas¹⁶. Bio-olie kan door verdere omvorming (bv. vergassing of fotokatalytische hervorming) gedeeltelijk omgezet worden in H₂^{15,16}. HTL is zonder vervolg stap geschikter voor het maken van vetzuren en biobrandstoffen dan voor waterstof. Waterstof kan als bijproduct worden geproduceerd, maar dit zal niet leiden tot waterstof productie op grote schaal. De reden dat deze techniek toch gebruikt kan worden is dat biomassa met hoog vochtgehalte kan worden gebruikt. Dit maak wel dat liquefactie een energie-intensief proces is en daarom in principe niet geschikt voor productie van een energiedrager, omdat dit resulteert in een erg laag energetisch rendement.

3.3.2 Energetisch rendement thermochemische technologieën

Op dit moment vind nog geen grootschalige waterstofproductie uit biomassa plaats. Van de thermochemische processen om waterstof uit biomassa te genereren worden vooral vergassing en pyrolyse of een combinatie van deze technieken onderzocht en ontwikkeld. Liquefactie lijkt minder veelbelovend voor waterstofproductie op grote schaal, alhoewel waterstof als een bijproduct kan worden geproduceerd. Verbranding van biomassa kan worden gebruikt als onderdeel van pyrolyse en vergassing om bv. geproduceerd biokool om te zetten in warmte die gebruikt kan worden om biomassa te verwarmen en een deel van het vocht te verdampen. Deze combinatie kan het energetische rendement van pyrolyse of vergassing verhogen en de afvalstroom verkleinen.

Het rendement van waterstof uit biomassa is te bepalen met vergelijking 1. De ingaande energie is de som van alle energie die gebruikt wordt in het waterstofproductieproces en de hoeveelheid energie die aanwezig is in biomassa. Deze laatste wordt bepaald door de onderste verbrandingswarmte (OVW, kWh/kg) van biomassa te vermenigvuldigen met de massa (m , kg) (vergelijking 4). Deze OVW is de netto vrijkomende energie en is het verschil tussen de bovenste verbrandingswarmte (BVW) en de verdampingswarmte (condensatiewarmte). De BVW is de energie die vrijkomt bij volledige verbranding van een materiaal en de energie die vrijkomt bij de condensatie van waterdamp tot water van standaard temperatuur. Als waterdamp niet condenseert binnen het beschouwde systeem, dan kan deze zogenaamde latente energie, niet worden gebruikt binnen het systeem en wordt om die reden buiten beschouwing gelaten. Omdat in brandstofmotoren ontstane waterdamp niet gecondenseerd wordt tot water kan de OVW worden gebruikt als waarde voor ingaande energie. Het rendement op basis van de OVW is altijd hoger dan op basis van de BVW en als de 'verloren' verdampingswarmte toch (deels) nuttig gebruikt wordt kan het rendement groter dan 100% zijn. De energie die geproduceerd wordt in de vorm van waterstof kan worden berekend via de OVW van waterstof maal de massa van het geproduceerde waterstof (vergelijking 5).

$$E_{\text{in}} = E_{\text{proces}} + \text{OVW}_{\text{biomassa}} * m_{\text{biomassa}} \quad (\text{vergelijking 4})$$

$$E_{\text{uit, nuttig}} = \text{OVW}_{\text{H}_2} * m_{\text{H}_2} \quad (\text{vergelijking 5})$$

In een kleinschalige (tot 0.6 MW/ uur H₂) demonstratie en onderzoeksinstallatie in Italië wordt met vergassing van biomassa naar waterstof een maximaal energetisch rendement van ca. 43-50% gehaald¹⁷⁻¹⁹. De grootste biomassa vergassingsinstallatie is een demonstratie en onderzoeksinstallatie in Zweden die biogas maakt (tot 20 MW/ uur CH₄)^{20,21}. Deze installatie richt zich op het produceren van biogas, maar tijdens het vergassingsproces ontstaat echter meer waterstof dan methaan. In een vervolgstap, 'methanisering', wordt o.a. waterstof omgezet in methaan. Als wordt aangenomen dat na de vergassing alle methaan en ethyleen kunnen worden omgezet in waterstof met een rendement van 85% dan komt de energetische efficiëntie van de reactor voor waterstofproductie uit op ongeveer 60%. Bij verdere opschaling kan dit rendement worden vergroot door o.a. het inperken van thermische verliezen²¹.

Een kanttekening bij de energetische efficiëntie van waterstofproductie uit biomassa is dat er bijproducten kunnen ontstaan die ook energie bevatten (bv. bio-olie) en als energiedrager kunnen worden gebruikt. Het 'echte' energetische rendement zal daarom hoger zijn dan het rendement dat voor waterstof alleen wordt bepaald. Een ander gevolg van het ontstaan van meerdere gassen, is dat waterstofgas gescheiden moet worden. Dit is mogelijk met bv. adsorptie, distillatie of membraan technologieën, maar heeft een negatieve invloed op de procesefficiëntie en op de kosten van waterstof.

Er zijn publicaties die hoge waterstofproducties per kg biomassa rapporteren door toevoeging van meer stoom of methaan tijdens het vergassingsproces. Dit volgt echter uit het waterstofgehalte van waterdamp of methaan en niet uit efficiëntere benutting van waterstof in biomassa. Voor een goede vergelijking dient de waterstof opbrengst daarom gerelateerd te worden aan de hoeveelheid waterstof in de biomassa of aan de droge biomassa. Om bovenstaande reden zal het rendement van stoomhervorming van biomassa lager zijn dan wanneer aardgas wordt gebruikt. Het aandeel waterstof in biomassa (bv: 6,5 m%¹⁷) is namelijk een stuk kleiner is dan in aardgas (ca. 25 m%). Veel energie wordt dus in vorming van andere reactieproducten gestoken. Het is daarom heel goed denkbaar dat waterstofproductie uit biomassa geen opzichzelfstaand proces zal zijn maar onderdeel van een productieproces van verschillende bioproducten en biobrandstoffen.

3.4 Biologische waterstofproductie

De biologische waterstofproductie wordt in Afbeelding 3 onderverdeeld in: 'donkere fermentatie', 'fotofermentatie', 'microbiologische elektrolyse' en 'biofotolyse'. In de natuur produceren verschillende typen bacteriën, algen en cyanobacteriën (blauwalgen) waterstof²². Het hangt echter van de omstandigheden af of micro-organismen kunnen floreren en of er waterstof wordt geproduceerd. Bepaalde typen 'fermenteerders' gedijen alleen onder zuurstofloze omstandigheden, terwijl andere typen ook met zuurstof kunnen overleven. Sommige typen micro-organismen hebben licht nodig terwijl andere de voorkeur geven aan donker. Verder zijn micro-organismen gevoelig voor temperatuur, zuurtegraad en aanwezigheid van toxische stoffen. Hiernaast zijn ook de (hydraulische) verblijftijd van biomassa in een bioreactor en de concentratie van waterstof in de omgeving (partiële waterstofdruk) van invloed op de waterstofproductie. Onder verschillende procescondities zullen uit identiek substraat (naam van voedingsbron voor micro-organismen) verschillende producten worden gemaakt.

Fermentatie staat ook bekend als vergisting en is het proces waarbij biologisch materiaal door micro-organismen onder zuurstofloze omstandigheden wordt omgezet. Voor een snelle en meer volledige vergisting van biomassa is het nodig om 'ruwe' biomassa eerst om te zetten in hapklare suikers. Over het algemeen kan fermentatie bij heersende temperatuur plaatsvinden, al verloopt fermentatie beter rond de 40°C²².

Vergisting van biomassa kan worden opgedeeld in drie fasen²³: 1) enzymatische hydrolyse, 2) zuurproductie en 3) gasproductie. Tijdens de hydrolyse worden

koolhydraten, eiwitten en vetten (grote moleculen) omgezet in suikers, aminozuren, vetzuren en glycerol (kleine moleculen). In de tweede fase ('Acidogenesis' en 'Acetogenesis') worden de kleinere moleculen opgenomen en (stapsgewijs) vergist tot acetaat, koolstofdioxide, waterstof, ammonia/ammonium en waterstof sulfide. In de derde fase worden acetaat, koolstofdioxide en waterstof omgezet in methaan, water en CO₂ ('Methanogenesis'):

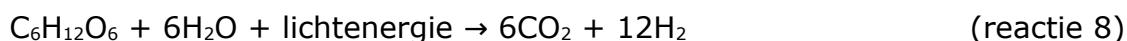


Biologische processen kunnen met name worden gebruikt voor biomassa met een hoog vochtgehalte dat hierdoor ongeschikt is om via de thermochemische route om te zetten in waterstof. Een voorbeeld is voedselafval, dat een vochtgehalte heeft van rond de 80%²³. Omdat de grote hoeveelheid voedselafval wereldwijd voor problemen zorgt, lijkt fermentatie een goed manier om dit afval te verwerken en energie en nutriënten in deze biomassa terug te winnen.

3.4.1 Biologische technologieën

Donkere fermentatie verloopt in het donker omdat de micro-organismen die hierin een rol spelen geen zonlicht nodig hebben als energiebron. De H₂ opbrengst per kg biomassa substraat is gewoonlijk laag omdat er veel andere fermentatieproducten ontstaan zoals (vet)zuren, methaan, water en CO₂²². Verder wordt tijdens donkere fermentatie ook een deel van het geproduceerde H₂ weer gebruikt door bacteriën om organische zuren en methaan te maken. Deze geproduceerde zuren kunnen na scheiding in een vervolgstap weer worden omgezet naar H₂ of CH₄. Dit kan bv. in een fotobioreactor (voor H₂ productie) of in een traditionele vergistingsinstallatie (voor CH₄ productie).

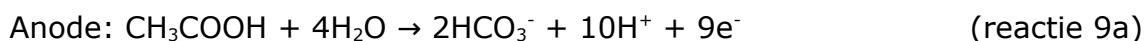
Fotofermentatie is de omzetting van organisch materiaal (bv. glucose) en water naar o.a. H₂ en CO₂ door bepaalde bacteriën die licht als energiebron kunnen gebruiken. Deze omzetting is onderdeel van het fotosynthese systeem van deze organismen en kan worden weergegeven als:



Het proces van fotofermentatie is trager dan voor donkere fermentatie, maar met fotofermentatie is theoretisch een hogere H₂ opbrengst mogelijk²².

In **microbiologische elektrolyse cellen** (MEC) wordt biologisch materiaal afgebroken door micro-organismen die hierbij protonen en elektronen vrijmaken. Om uit de protonen H₂ te maken, moet de redoxpotentiaal van deze reactie (-0,414 V) worden overkomen. Micro-organismen in de elektrolyse cel genereren een potentiaalverschil van ca. -0,279 V. Niet genoeg om waterstof te produceren, maar door een extern opgelegd spanningsverschil toe te voegen wordt een kathodepotentiaal bereikt die groter is dan de redoxpotentiaal; waterstof wordt gemaakt. De benodigde extern opgelegde potentiaal is minimaal 0,414-0,279 = 0,135 V, in de praktijk is echter 0,2-1 V²⁴ nodig, doordat er verliezen optreden. Dit opgelegde spanningsverschil is lager dan

het theoretisch minimale potentiaalverschil dat gebruikt wordt in elektrische elektrolyse cellen (1,23 V, normale condities). Afbraak van organisch materiaal (bv acetaat) vindt plaats aan de anode en aan de kathode wordt waterstof geproduceerd:



Net als bij brandstofcellen worden elektronen via een extern circuit verplaatst en is er een selectief membraan of elektrolyt dat protonen doorlaat.

Biofotolyse werkt op het grensvlak van biologische en waterontledingsprocessen. Verschillende groen en blauwalgensorten kunnen de waterontledingsreactie katalyseren als onderdeel van hun fotosynthesereacties. Licht, opgenomen door pigmenten, vormt de energiebron en water de bron voor H_2 en O_2 . Directe biofotolyse kan alleen plaatsvinden in het licht onder (bijna) zuurstofloze omstandigheden²⁵. De algen gebruiken 'hydrogenase' (een enzym) om elektron transport te faciliteren in het proces om protonen te reduceren tot waterstof. Hydrogenase werkt alleen bij een O_2 concentratie onder de 0,1%⁷. Omdat O_2 simultaan wordt gemaakt met H_2 , moet O_2 worden verwijderd om de reactie door te laten gaan.

Indirecte biofotolyse komt voor bij bepaalde soorten (groen en blauw) algen en vindt plaats in verschillende stappen. Eerst wordt gedurende de dag met fotosynthese energie opgeslagen in koolhydraten. In het donker worden de eerder geproduceerde suikers gefermenteerd waarbij via verschillende (redox) reacties waterstof ontstaat, voor het elektron transport wordt wederom hydrogenase gebruikt^{7,25,26}. Deze reactie vindt echter alleen plaats bij een tekort aan zwavel en er wordt netto zuurstof verbruikt door de algen, waardoor zuurstofloze omstandigheden ontstaan²⁶. Dit laatste heeft als voordeel dat waterstofproductie in een nagenoeg zuurstofloze omgeving plaatsvindt, waardoor hydrogenase niet gedeactiveerd wordt. Daarnaast ontstaat er geen explosief gasmengsel maar een H_2/CO_2 mengsel dat gemakkelijker te scheiden is dan H_2/O_2 .

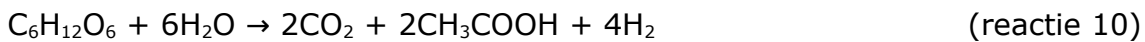
3.4.2 Energetisch rendement biologische technologieën

De genoemde biologische processen voor waterstofproductie zijn allemaal nog niet ver genoeg ontwikkeld om op commerciële schaal te worden toegepast, dit heeft o.a. te maken met het rendement. Er zijn vele factoren die het rendement van een biologische systeem bepalen. Naast het reactor ontwerp en de groeiomstandigheden zijn ook voorbehandeling, verblijftijd en het type biomassa van grote invloed. Het lijkt niet waarschijnlijk dat in de komende tien jaar waterstof geproduceerd wordt op industriële schaal via de biologische routes.

Voor biologische processen kan in principe de BVW van biomassa voor de berekening van ingaande energie, omdat water niet hoeft te worden verdampt zoals bij de thermolytische processen. Bij publicaties van biologische processen is het echter gebruikelijker om een waterstofopbrengst te geven; bv. als mol H_2/gVS . Waar gVS staat voor gram 'vluchtige stof' (volatile solids), dit is de organische fractie van

biomassa. Onder laboratoriumcondities waarbij een specifiek substraat wordt gebruikt (bv: glucose), wordt de opbrengst in de regel per gram of mol substraat gegeven.

Van de biologische waterstofproductie routes, is donkere fermentatie op dit moment het meest rendabel en ontwikkeld. De hoogste waterstofopbrengsten worden gehaald in fermentatie van biomassa met een hoog gehalte aan simpele suikers (bv. glucose)^{27,28}. Theoretisch kan er uit 1 mol glucose 12 mol waterstof worden gewonnen (zie reactie 8). Maar bij donkere fermentatie is waterstof een bijproduct en ontstaan vooral vetzuren^{23,27,28}, zoals acetaat:



Hierdoor ontstaat er geen 12, maar maximaal 4 mol H₂/mol glucose²⁹. Doordat in de praktijk niet alle substraat wordt benut en omzettingen niet volledig zijn is het huidige maximale energetisch rendement van donkere fermentatie ca. 10-15% (2-3 mol H₂/mol glucose). Voor fermentatie van stromen met een hoog eiwit, vet of cellulose gehalte is het rendement echter (fors) lager; minder dan 1% is niet ongebruikelijk. Om meer energie uit biomassa beschikbaar te maken kan een vervolgstap worden toegevoegd waarin, na scheiding van waterstof, de vetzuren worden omgezet naar acetaat en vervolgens naar methaan²⁸. Uit methaan kan weer waterstof worden geproduceerd via stoomhervorming. Of het methaan kan met waterstof worden gemengd tot 'hythaan' dat ook als brandstof gebruikt kan worden.

Met fotofermentatie kan er theoretisch een hoger omzettingsrendement van substraat naar waterstof worden gehaald dan bij donkere fermentatie. Fotofermentatie kan gebruikt worden als zelfstandige technologie of in combinatie met bv. donkere fermentatie waarbij waterstof wordt geproduceerd uit de reststroom (digestaat) van donkere fermentatie. In het laboratorium is bij omzetting van simpele suikers naar waterstof een omzetting van bijna 50% van de waterstofatomen uit substraat naar waterstof gas gehaald³⁰. Lage productiehoeveelheden per reactorvolume, moeilijk te beheersen groeiomstandigheden (temperatuur, zuurgraad en afwezigheid van zuurstof), lichtverdeling, een lange benodigde verblijfsduur van het substraat in de reactoren en een (resultierend) laag praktisch omzettingsrendement maken dat fotofermentatie tot op heden nog een 'potentiële' techniek blijft in plaats van een praktisch toegepaste technologie.

Bij fotofermentatie wordt door micro-organismen lichtenergie omgezet in chemische energie. Het deel van de lichtenergie dat nuttig gebruikt wordt is afhankelijk van de lichtsterkte. Bij een lage lichtintensiteit wordt maximaal ~10% van de energie gebruikt, in de volle zon is dit ~1%. Het is aangetoond dat door genetische manipulatie het omzettingsrendement van lichtenergie naar biomassa met 20-50% verhoogd kan worden³¹. Dit is nog ver van dagelijkse realiteit en de gemaakte winst is absoluut gezien niet heel groot. Door deze lage 'foton-efficiëntie' zijn er hele grote reactoren nodig, met goede lichtverdeling, om waterstof op enige schaal te produceren.

De noodzaak voor grote reactoren geldt ook voor biofotolyse processen. Zoals genoemd komt bij directe biofotolyse zuurstof vrij waardoor hydrogenase, het enzym

dat de waterstofproductiereactie laat verlopen, niet meer werkt en de productie stopt. De omzetting van zonne-energie in waterstof is hierdoor meestal minder dan 1,5% en als het geproduceerd zuurstof gelijk verwijderd kan worden maximaal 3-10%²⁶. Door deze proces-karakteristieken is biofotolyse heel moeilijk praktisch toepasbaar te maken op grote schaal. Indirecte biofotolyse vindt plaats onder omstandigheden waarbij zuurstof verbruikt wordt en er een tekort aan zwavel is. Echter ook indirecte biofotolyse heeft een heel laag energetisch rendement en de juiste omstandigheden voor waterstofproductie kunnen maar kort in stand worden gehouden²⁶. Er zijn op onderzoeksschaal nog vele hordes te nemen^{26,32,33} voordat waterstof via biofotolyse toegepast kan worden in de praktijk.

Voor waterstofproductie met MECs speelt licht(verspreiding) geen rol, waardoor troebelere stromen met een hoge concentratie aan organische stof gebruikt kunnen worden (bv. afvalwater). Op dit moment is de waterstofproductie in MECs nog fors lager dan bij donkere fermentatie³⁴. De technologie is echter nog relatief jong (2005) en kan gebruikt worden voor afvalwaterstromen en ook als technologie om het digestaat van donkere fermentatie reactoren verder om te zetten in waterstof. Hoge kosten van materialen³⁵, matige reactiesnelheid, productie van onzuivere waterstof en een laag totaal rendement zorgt ervoor dat MECs nog niet kunnen concurreren met bestaande waterstofproductietechnologieën. Kortom: de MEC technologie is op dit moment (2019), nog niet vergenoeg ontwikkeld voor praktische toepassingen^{34,35}.

3.5 Elektrochemische waterstofproductie

Het opsplitsen van water in waterstof en zuurstof (waterontleding) kost energie en zoals eerder genoemd moet er een spanningsverschil van minimaal 1,23 V aanwezig zijn om de reactie te laten verlopen (omgekeerde reactie 1). Maar daarnaast moet er ook warmte energie worden toegevoegd, in elektrolyse cellen wordt deze warmte toegevoegd doordat de cel en elektroden een weerstand hebben, waardoor warmte vrijkomt. Net als een gloeispiraal hitte afgeeft wanneer er een elektrische stroom doorheen loopt.



Door de elektrische en ionische weerstanden in de elektrolyse cellen is de benodigde energie input, en dus het benodigde spanningsverschil, dat nodig is om reactie 11 te laten verlopen groter dan 1,23 V. Het spanningsverschil (V) wordt gegeven door de wet van Ohm:

$$V = I \cdot R \quad (\text{vergelijking 6})$$

Waar I de stroomsterkte in ampère (A) is en R de weerstand in Ohm (Ω). Het energieverbruik is gelijk aan de stroomsterkte maal de spanning en de tijd, ofwel de stroomsterkte in het kwadraat maal de weerstand en tijd (t):

$$E = I \cdot V \cdot t \quad (\text{vergelijking 7a})$$

$$E = I^2 \cdot R \cdot t \quad (\text{vergelijking 7b})$$

Hieruit volgt dat het energieverbruik evenredig met de weerstand zal toenemen. Om het voltage zo laag mogelijk te houden wordt de weerstand in de cel geminimaliseerd en worden katalysatoren gebruikt om de waterontledingsreactie bij een lagere spanning te laten verlopen. In de meeste gevallen wordt een platina elektrode gebruikt met een medekatalyst zoals titaniumoxide. Maar omdat platina een schaars en duur metaal is, worden op dit moment een heel scala aan katalysatoren op basis van veel voorkomende metalen zoals nikkel, ijzer, koper, cobalt of mangaancomplexen onderzocht³⁶.

3.5.1 Elektrochemische technologieën

Water ontleding met elektriciteit wordt **elektrolyse** genoemd. Dit kan met verschillende typen elektrolyse cellen, ieder met voor en nadelen¹¹. Elektrolyse wordt al zo'n honderd jaar gebruikt en wordt toegepast voor waterstofproductie op grote schaal. Watersplitsing is in vergelijking met stoomreforming van aardgas een dure methode omdat de efficiëntie van grootschalige elektrolyse enkel rond de 40-60%⁷ ligt en dus veel elektriciteit kost, wat een dure vorm van energie is. Bovendien zijn de benodigde elektroden en membranen (op dit moment) duur.

Water kan ook ontleed worden door de temperatuur te verhogen, dit proces wordt **thermolyse** genoemd. Hiervoor moet de temperatuur tot boven de 2500°C worden gebracht, al kan het proces via thermochemische tussenreacties ook bij lagere temperaturen (~500°C) plaatsvinden⁶. Voordeel is dat deze lagere temperatuur binnen het bereik ligt van zonnecollectoren waarbij zonlicht geconcentreerd wordt³⁷.

Een tussenvorm van thermolyse en elektrolyse is **stoomelektrolyse**. Met zonne-energie kan warmte (zonnecollector) of elektriciteit (fotovoltaïsche paneel, in de volksmond: zonnepaneel) worden opgewekt. Omdat elektrolyse van stoom minder energie kost dan elektrolyse met water³⁸ is stoomelektrolyse energetisch gezien efficiënter dan elektrolyse. Een ander voordeel is dat een kWh warmte energie veel goedkoper is dan een kWh elektrische energie. Bij te hoge temperaturen wordt hitte management ingewikkelder waardoor het kostenvoordeel verdwijnt. Op dit moment is een typische temperatuur voor (hoge temperatuur) stoomelektrolyse tussen de 600-1000°C.

In **fotolyse**, ook wel fotokatalytische waterontleding, wordt energie uit zichtbaar licht geabsorbeerd met een elektrode van een fotokatalytisch materiaal. Hierdoor wordt een elektrische stroom opgang gebracht en kan een potentiaalverschil tussen twee elektroden worden opgewekt. Als het potentiaalverschil groot genoeg is kan net als bij gewone elektrolyse de waterontleding plaatsvinden. Het basisontwerp van een fotolysecel lijkt dan ook veel op een 'gewone' elektrolysecel³⁹. In geavanceerdere ontwerpen worden elektroden gebruikt die beide een fotokatalytische werking hebben.

3.5.2 Energetisch rendement elektrochemische technologieën

Elektrolyse met alkalische elektrolysecellen wordt al decennia op relatief grote (MW) schaal toegepast en elektrolyse is dan ook de meest volwassen technologie uit Afbeelding 3. Desalniettemin vindt er nog vol op ontwikkeling plaats op het gebied van

cel ontwerp en materiaalgebruik. Naast alkalische elektrolyse wordt ook polymeer elektrolyt membraan (PEM) elektrolyse steeds meer op MW toegepast⁴⁰. Deze technologie zit tussen demonstratie en commerciële schaal in. De energetische efficiëntie, op basis van de OVW van H₂, van deze elektrolyse technieken is ca. 40 – 67%^{7,40,41}. Voor 'Solid oxide elektrolyse' (SOE), een stoom elektrolyse techniek die vooral nog op laboratoriumschaal wordt toegepast, kan het energie verbruik van elektrolyse mogelijk met wel ~45% worden terug gedrongen⁴¹. Het rendement is hierdoor hoger, en gerapporteerd tussen de 70 en >120% (o.b.v. de OVW van H₂)^{40,41}. Een rendement boven de 100% is hier mogelijk door input van restwarmte, die vervolgens niet wordt meegeteld als input energie en doordat de verdampingswarmte nuttig gebruikt wordt. Een realistischer rendement, op basis van praktijktests ligt tussen de 76 – 81%⁴⁰. Langdurige tests op grotere schaal van SOE moeten uitwijzen of de technologie al klaar is voor de markt.

Fotolyse is met een omzettingsrendement van zonne-energie naar waterstof van minder dan 1%³⁹, nog niet rendabel genoeg om gebruikt te worden voor waterstofproductie op commerciële schaal. De verwachting is dat een efficiëntie van tenminste 10% nodig is, in een reactor die meer dan 10 jaar mee gaat om waterstof voor 2-4 \$/kg te kunnen produceren³⁹. Ontwikkeling van kennis, betere, goedkope, stabiele en efficiënte fotokatalysatoren en een beter reactor ontwerp zijn nodig om de omzetting van zonne-energie naar waterstof te verhogen. In het laboratorium is met gebruik van een speciale katalytische verf al een rendement van 7,1% behaald, maar deze ontwikkeling is nog in het experimentele fase. Het gebruik van fotolyse voor commerciële doeleinden is in de nabije toekomst niet te verwachten.

4 Kostprijs van Waterstof

Vanuit energie oogpunt is het gezamenlijke energetisch rendement van duurzame energie opwekking en distributie, waterstofproductie, waterstofopslag en distributie, en waterstofgebruik bepalend welke technologie de 'beste' is. De consument zal in het algemeen echter de energieprijzen laten bepalen welke technologie de 'beste' is. In het algemeen zal waterstof uit een energetisch efficiënt schema goedkoper zijn dan wanneer inefficiënte technieken worden gebruikt. Maar ook o.a. kostprijs, onderhoud en levensduur van materialen kunnen een grote invloed hebben op de prijs van waterstof. Als een dubbele investering nodig is om het rendement met 10% te verhogen zal dit in de meeste gevallen niet leiden tot lagere productiekosten. Verder zullen in het algemeen de productiekosten dalen naarmate de schaal van het productieproces toeneemt. Doordat niet overal ter wereld dezelfde duurzame energiebronnen op eenzelfde schaal voorhanden zijn kunnen op verschillende locaties andere technologieën tot de voordeligste waterstof leiden. Ook zal transport en opslag van waterstof of energie van invloed zijn op de uiteindelijke waterstofprijs. In deze paragraaf zijn globale kosten gegeven om een beeld te schetsen van de kosten voor waterstofproductie via verschillende routes. Omdat van de beschreven alternatieve waterstofproductiemethoden enkel elektrolyse op industriële/commerciële schaal wordt toegepast zijn prijzen moeilijk te vergelijken.

4.1 Kostprijs industriële waterstofproductie

De kosten voor industriële waterstof opwekking door aardgas omvorming werden op basis van de aardgasprijs in 2016 geschat op 0,8–1,5 \$/kg²³, andere schattingen van waterstofproductie met fossiele brandstoffen lopen uiteen van: 0,93–1,22 \$/kg⁴²; 1,34–2,10 \$/kg⁷; 2,17 \$/kg⁴³. Dit zijn de kale productiekosten zonder compressie, opslag en distributiekosten. Deze laatstgenoemde kosten kunnen per regio verschillen doordat hergebruik van bestaande infrastructuur soms mogelijk is, de hoeveelheid gebruikers per oppervlakte verschilt, de bodemgeschiktheid voor gasleidingen etc. Deze kosten zullen echter ook voor duurzaam geproduceerde waterstof gemaakt moeten worden, al kunnen die natuurlijk wel anders uitpakken door de productieschaal. Uitgaande van 1,14 \$/€, betekent resulteren de eerder genoemde prijzen in een kale productieprijzen van 0,7–1,90 €/kg H₂. Zonder CO₂ heffingen op energie uit fossiele brandstoffen zal dit de productieprijzen zijn die duurzaam opgewekte waterstof op dit moment zal mogen kosten, voordat het gros van de consumenten overstapt.

4.2 Kostprijs thermochemische waterstofproductie

Energie uit biomassa is op dit moment relatief goedkoop. In sommige gevallen kan zelfs geld worden gevraagd om biologisch 'afval' te verwerken. Vergassing van biomassa voor de productie van waterstof wordt nu al op kleinere schaal toegepast. Volgens een recente studies is de kostprijs voor waterstofproductie uit vergassing van bv. notendoppen 6–9,7 €/kg. Hierbij wordt uitgegaan van een productie van 400 kg H₂/dag, $\eta = 41\%$, kosten biomassa 60 €/ton⁴⁴. Een model voor rubberhout vergassing

op kleine schaal (~300-850 kg H₂/dag) laat zien dat een productieprijs van 2,4–3,4 €/kg H₂ (kosten biomassa ~40 €/ton) mogelijk is⁴⁵. Dit komt aardig in de buurt van de kosten voor waterstofproductie uit fossiele brandstoffen, maar is duidelijk nog niet concurrerend en de laagste kostenraming is een schatting en niet in de praktijk bewezen.

4.3 Kostprijs biologische waterstofproductie

Van de biologische processen is donkere fermentatie de meest gevorderde technologie. Donkere fermentatie vergt veel minder energie input dan bv. biomassa vergassing. Er is echter een groter reactorvolume nodig om tot gelijke waterstofproductie te komen en dit zal kosten met zich mee brengen. Een pilot project van gecombineerde waterstof en biogas productie middels donkere fermentatie van maiszetmeel en voedselafval resulteerde in een kostprijs van respectievelijk 12,2 €/kg H₂ en 1,6 €/kg H₂ (2010: 1,33 \$/€)⁴⁶. Dit maakt duidelijk dat met donkere fermentatie 'goed geprijsde' waterstof kan worden gemaakt maar dat het type biomassa erg belangrijk is. De prijs van maiszetmeel (~38–113 €/ton) in vergelijking met voedselafval (men kreeg 3–19 €/ton) had een groot aandeel in het verschil in de productiekosten.

In het algemeen geldt dat het omzettingsrendement van biomassa naar waterstof relatief laag is. Door het combineren van verschillende producten kunnen waterstofkosten mogelijk worden beperkt. Naast waterstof kunnen bv. ook: biobrandstof uit vetzuren, methaan, chemicaliën of 'biobased' materialen worden gemaakt. Een mogelijk vervolgstap van donkere fermentatie is dat vetzuren gebruiken worden om algenbiomassa te kweken²⁷. De integratie van processen om verschillende biomassa gebaseerde producten te maken staat ook bekend als bioraffinering. Het concept van bioraffinering staat nog in de kinderschoenen en er zal nog een enorme ontwikkeling gemaakt moeten worden voordat dit in de praktijk, op enige schaal van betekenis, toegepast gaat worden. Het succes van een bioraffinering zal erg afhankelijk zijn van het type biomassa dat aangeleverd wordt.

Door het gebruik van bv. zonnecellen en condensatoren in combinatie met MECs en de integratie van MECs met andere technologieën komt economisch rendabele toepassing van MECs dichterbij. Maar naar verwachting zal microbiële waterstofproductie niet met deze technologie plaatsvinden voor 2030.

4.4 Kostprijs elektrochemische waterstofproductie

Voor de productie van waterstof is water en energie nodig, ook elektrische energie. En omdat 1) elektriciteit in een groot deel van de wereld voornamelijk uit fossiele brandstoffen wordt gewonnen; 2) het rendement van vergassing van fossiele brandstoffen voor waterstofproductie hoger is dan het rendement van elektrolyse van water; en 3) een elektrolyse installatie hogere kosten met zich meebrengt dan een vergassingsinstallatie wordt het gelijk duidelijk dat waterstof uit water (fors) duurder gaat zijn dan waterstof uit fossiele brandstoffen. Voor Nederlandse grootverbruikers is de energieprijs ca. 0,07 €/kWh (zonder toeslagen). In Nederland gelden de volgende

energiebelastingen (inclusief opslag duurzame energie toeslag en exclusief btw belasting):

Tabel 2: Elektriciteitsverbruik en belastingen op energie in Nederland (2019).

Verbruik van elektriciteit	Belasting 2019
0 – 10.000 kWh/jaar	0,11753 €/kWh
10.001 – 50.000 kWh/jaar	0,08117 €/kWh
50.001 – 10.000.000 kWh/jaar	0,02161 €/kWh
>10.000.000 kWh / jaar (zakelijk)	0,00088 €/kWh

Alleen kleine verbruikers betalen echt energiebelasting in Nederland. Door belastingen wordt de energieprijs van een installatie met een verbruik van bv. 50 miljoen kWh/jaar, dus nog met ~ 0.0051 €/kWh verhoogt. Dit resulteert in een elektriciteitsprijs van ca. 0,075 €/kWh. De elektriciteitskosten om waterstof te produceren kunnen worden berekend met de BVW van waterstof (39,4 kWh/kg) en met een aanname dat het gemiddelde omzettingsrendement van elektriciteit naar waterstof ca. 50% is: $39,4/0,5 \cdot 0,075 = 5,9$ €/kg H₂ zullen zijn. Waterconsumptie wordt geschat op 13-14 l/kg H₂^{6,43} en de invloed hiervan op de productieprijs is dus te verwaarlozen. Wel komen er nog kosten bij voor o.a. de bouw en onderhoud van elektrolyse installatie. Deze worden voor alkalische elektrolyse (op dit moment de goedkoopste elektrolyse technologie) geschat op 800–1500 €/KW_{BVW} + 2-3% onderhoud⁴⁰.

Uit de praktijk blijkt dat energieverbruik van elektrolyse verantwoordelijk is voor ongeveer 75% van de waterstofproductiekosten. Met deze aanname komt de schatting voor de waterstofproductie prijs op ongeveer $5,9 \cdot (100/75) = 7,9$ €/kg waterstof. Of vertaald naar een energieprijs $7,9/39,4 = 0,20$ €/kWh. Dit betekent dat zonder compressie en transport én zonder omzetting van waterstof weer in elektriciteit de energieprijs al ca. 3 maal zo hoog is als elektriciteit en een stuk duurder dan waterstof uit biomassa of aardgas. Uitgaande van een omzetting van 50% van de energie in waterstof naar elektriciteit, betekent dit dat elektriciteit uit waterstofopslag minimaal 6 keer meer zal kosten als stroom van het huidige net.

Het is de verwachting dat in 2030 met PEM elektrolyse waterstof voor een lager tarief kan worden geproduceerd dan mogelijk is met alkalische elektrolyse⁴⁷, maar zoals getoond zijn productiekosten sterk afhankelijk van elektriciteitsprijzen. Een verbetering in energetische efficiëntie kan hierdoor een flinke kostenbesparing met zich meebrengen. Andersom zal een hogere elektriciteitsprijs in duurdere waterstof resulteren. De ontwikkeling van goedkopere, langdurig meegaande en goedwerkende katalyserende elektrode materialen is belangrijk voor de kostprijs van elektrolyse cellen en brandstofcellen. Schaarse en dure materialen als platina, iridiumoxide of rutheniumoxide kunnen naar verwachting in de toekomst vervangen worden door bv. nikkel – vanadium⁴⁸ of ijzer fosfaat (Fe(PO₃)₂) en nikkel⁴⁹.

Stoomelektrolyse is momenteel nog geen industriële technologie maar er zijn twee belangrijke redenen waarom deze technologie na 2030 tot lagere waterstof productie-

kosten kan leiden dan via elektrolyse: 1) warmte is goedkoper dan elektriciteit en 2) elektrolyse verloopt efficiënter bij hoge temperatuur (minder verliezen). De technologie moet echter nog verder worden onderzocht en installaties op industriële schaal moeten nog ontwikkeld worden om deze voordelen te kunnen benutten. Het is niet te verwachten dat de kosten voor zonne-energie gedreven stoom-elektrolyse voor 2030 kunnen concurreren met de huidige kosten voor aardgas gebaseerd waterstof. De verwachting is dat in 2030 de totale productie kosten, exclusief compressie en transport, 5,3–7 €/kg kunnen zijn³⁸. Alhoewel volledig opgewekt met duurzame energie zal deze waterstof nog steeds een CO₂ voetafdruk hebben omdat materialen die nodig zijn voor de productie van reactoren en ook voor compressie en transport niet op volledig duurzame wijze worden geproduceerd.

Voorgaande gaat over waterstofproductie op grote, gecentraliseerde schaal. Op gedecentraliseerde, kleinere schaal zal waterstofproductie duurder zijn. Voordeel is dat er minder transport en/of infrastructuur nodig is. In een Europese studie (2018) van een alkaline elektrolyse installatie met een capaciteit van 65 en 400 kg H₂/dag (η = 52%, OVW) worden de totale minimale productie kosten geschat op respectievelijk 13,3 en 12,7 €/kg H₂⁴⁴. Deze prijs komt redelijk overeenkomt met de kosten van gecentraliseerde productie na bezorging via trucks en trailers⁴⁴. Op basis van de OVW van waterstof komt dit neer op een energieprijis van ca. € 0.40/kWh H₂. Deze prijs is dus de waterstofprijs en niet de prijs van elektriciteit uit waterstof.

5 Perspectief voor Waterstof

5.1 Waterstof uit biomassa

De markt voor Groninger aardgas is ca. 70.000.000.000 Nm³ per jaar, uitgaande 7 kWh/Nm³ aardgas betekent dit 490 TWh aan energie. De OVW van biomassa ligt typisch tussen de 14 en 19 MJ/kg. Voor nu volstaat het gemiddelde: 16.5 MJ/kg, ofwel 4.6 kWh/kg. Met deze gegevens kunt u benaderen hoeveel biomassa nodig is voor 490 TWh: $490 \cdot 10^9 \text{ kWh} / 4,6 \approx 107$ miljoen ton biomassa. De technologie met het hoogste rendement is op dit moment vergassing. Bij de aanname dat het rendement voor biomassa vergassing op grote schaal 70% is (meest positieve scenario), dan is er dus minimaal $107/0,7 \approx 153$ miljoen ton biomassa nodig om het aardgas te vervangen, dit komt overeen met een schatting op basis van de gegevens in²¹. Voor een meer volledige schatting moet ook worden meegenomen wat het rendement is van het gebruik van het aardgas of waterstof, hier wordt aangenomen dat dit gelijk is.

Volgens een rapport van de rijksoverheid is er in 2030 voor Nederland tussen de 7–45 miljoen ton droge biomassa beschikbaar voor niet voedseltoepassingen⁵⁰. Dit is dus beschikbaar voor energieopwekking maar ook voor productie van chemicaliën, materialen en compost. Er kan dus gerust geconcludeerd worden dat er onvoldoende biomassa beschikbaar zal zijn om te voorzien in alle energiebehoeften van Nederland, waaraan nu met aardgas wordt voldaan!

Om bovenstaande reden zal waterstof uit biomassa (of biogas) niet de rol van aardgas kunnen overnemen als energiedrager. Helemaal niet omdat de vraag naar biomassa ook in andere sectoren zal toenemen. Bioplastics, biobouwmaterialen, biochemicaliën en biologische kunstmest zijn voorbeelden van producten die biomassa nodig hebben voor productie. Daarmee is niet gezegd dat de technologie voor waterstofproductie uit biomassa niet verder hoeft te worden ontwikkeld omdat het zeker een bijdrage aan de energiebehoefte kan leveren. Het is echter maar zeer de vraag of de waterstof die uit biomassa gewonnen kan worden ook werkelijk voor de geprojecteerde (lage) kostprijs kunnen worden gemaakt omdat met de toenemende vraag naar biomassa de prijs van biomassa waarschijnlijk zal toenemen. Het is niet ondenkbaar dat men u in de toekomst gaat betalen om uw (groen)afval op te mogen halen. Hoewel groenafval dan misschien ook gescheiden ingezameld moet worden omdat het type biomassa (kwaliteit) grote invloed heeft op mogelijke producten of energieproductie.

Op internationaal niveau zijn er zorgen omtrent de waarborging van voldoende voedselproductie voor de groeiende wereldbevolking als de vraag naar biomassa voor energiewinning gaat toenemen. Naast het feit dat er in ieder geval in Nederland niet genoeg biomassa aanwezig is, is er nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig om effectief waterstof uit biomassa te winnen. Hierdoor zal waterstof uit biomassa in ieder geval het komende decennia geen grote rol vervullen op de energiemarkt. Verder kan hier nog de opmerking worden geplaatst dat de biologische waterstofproductieroutes minder geschikt lijken voor waterstofproductie op grote schaal. Wel kan waterstof op

kleine / middelgrote schaal worden gewonnen als onderdeel van een bioraffineringsproces waarbij een scala aan biomassa gebaseerde producten worden gemaakt.

5.2 Waterstof uit water

Waterstofproductie uit water met elektrolysetechnologieën kan al op industriële schaal. De kostprijs van dit waterstof is echter hoog en (op dit moment) is het energetisch rendement nog relatief laag (40-67%). In 2030 kan dit rendement voor stoom elektrolyse opgelopen zijn tot boven de 80%. Op dit moment zijn de kosten voor energie uit waterstof tenminste 3 maal de elektriciteitsprijs en voor elektrisch uit waterstof tenminste ~6 maal de huidige elektriciteitsprijs. In het algemeen geldt dat hoe groter de schaal hoe lager de productiekosten kunnen zijn. Verder zal een beter ontwikkeld waterstofnetwerk, verbeterd reactorontwerp, technische innovaties en gebruik van goedkopere materialen hoogstwaarschijnlijk leiden tot een prijsdaling van waterstof uit water. De vraag blijft hoe lang het duurt voordat waterstof voor een concurrerende prijs kan worden gemaakt. Niet voor 2030 is de verwachting op basis van de laatste onderzoeken en waarschijnlijk ook niet voor 2035.

Maar al was het mogelijk om reeds vandaag al voor een gunstig tarief waterstof uit water te produceren en te gebruiken als energiedrager, dan nog zal energie uit dit waterstof het aardgas, de olie, kolen en kerncentrales niet kunnen vervangen. Dit omdat in Nederland eenvoudigweg niet voldoende duurzame elektriciteit opgewekt wordt om een grote hoeveelheid waterstof te produceren. Volgens het CBS was 6,6% van de gebruikte energie in 2017 van duurzame oorsprong⁵¹. Ongeveer 60% van deze energie komt trouwens uit biomassa, zonne-energie en windenergie zijn goed voor ~32% en de overige ~8% komt uit aardwarmte, bodemenergie en buitenlucht warmte. Een deel van deze 6,6% kan gelijk via het net gebruikt worden door de consument en een deel moet voor langere of kortere tijd worden opgeslagen. Een ander deel is alleen voor lokaal gebruik geschikt, omdat de opgewekte energie in de vorm van warmte is, bv. energie uit biomassa, zonnecollectoren en aardwarmte, hierdoor is deze energie minder geschikt voor efficiënte waterstofopwekking.

Voor waterstofwinning op kleine schaal wordt onderzoek gedaan naar o.a. zonnepanelen met ingebouwde elektrolyse apparatuur die waterstof produceren uit luchtvochtigheid⁵². Deze panelen hebben in het laboratorium een energetisch rendement (zon naar waterstof) gehaald van boven de 15%, wat erg hoog is omdat huidige zonnepanelen een rendement (zon naar elektrisch) hebben van rond de 20%. In België wordt deze technologie de komende jaren verder onderzocht in de praktijk.

5.3 Perspectief voor Waterstof

Door voorgaande krijgt u misschien het idee dat waterstof eigenlijk helemaal niet de heilige graal van de toekomstige energievoorziening is, zoals soms wel wordt voorgesteld. Dit betekent niet dat waterstof geen (belangrijk) onderdeel zal uitmaken van de toekomstige energievoorziening. Wat u wel uit voorafgaande kan opmaken is dat energie, duurzame energie wel te verstaan, schaars is. Er gaan duurzame energie dromen de ronde waarin bijna elk denkbaar oppervlak gebruikt wordt voor elektrici-

teitsopwekking uit zonnecellen, er grote windenergieparken zijn, blauwe energie wordt gewonnen op het grensvlak van zoet en zout water, getijdenenergie wordt gebruikt en aardwarmte en duurzame energie uit biomassa een veel grotere rol speelt en het elektriciteitsgrit opnieuw ingericht is en uitgebreid met energieopslagmogelijkheden. In deze dromen is er volop duurzame energie, vooralsnog zijn dit nog dromen en nog geen toekomstvisie want dit zou betekenen dat er al een gedefinieerd plan is om dit doel te bereiken, wat niet het geval is. Om deze reden zal er efficiënt met de duurzaam opgewekte energie moeten worden omgesprongen. Als door waterstof te gebruiken als energiedrager uiteindelijk veel minder duurzaam opgewekte energie nuttig gebruikt kan worden, dan wanneer andere energieopslagmogelijkheden worden gebruikt dan verdienen die andere methoden misschien de voorkeur. Hoe lager de energieopslag efficiëntie, hoe groter het areaal aan bv. zonnepanelen / collectoren of windmolens nodig is om voldoende energie te produceren, dit betekent ook een grotere invloed op de omgeving en mogelijke grotere nadelige gevolgen voor de plaatselijke flora en fauna.

De eerder genoemde hoeveelheid van het Gronings aardgas wordt niet allemaal in Nederland verbruikt, en niet alle energie die gebruikt wordt in Nederland komt uit aardgas. Uit gegevens van het centraal bureau voor de statistiek blijkt dat het totaal energieverbruik in Nederland ca. 875 TWh/jaar bedraagt, van deze energie komt zo'n 340 TWh uit aardgas⁵³. Het elektriciteitsverbruik is ca. 121 TWh/jaar⁵⁴. De verwachting is dat met de transitie van fossiele brandstoffen naar duurzame energiebronnen het aandeel elektrische energie sterk zal toenemen. Elektrisch (en ook warmte) kan niet gemakkelijk worden vastgehouden. In elk willekeurig systeem zal energie verspreid worden en zal een spanningsverschil of warmteverschil met de omgeving verdwijnen. Om energie op te slaan zijn er energiedragers nodig, zoals waterstof. Door het (huidige) beperkte rendement en hoge kosten van brandstofcellen en elektrolyse cellen is grootschalige opslag van elektrische energie in waterstof echter geen aantrekkelijke optie en met het oog op energieschaarste allicht zelfs onwenselijk. Als het deel duurzaam geproduceerde elektrische energie dat opgeslagen dient te worden op 100% wordt gesteld dan zal er na de omzetting met elektrolyse in waterstof ($\eta \approx 60\%$) en vervolgens weer met een brandstofcel in elektriciteit ($\eta \approx 60\%$) er maximaal $(100 * 0.6 * 0.6) = 36\%$ van de energie over zijn. Dit is de zogenaamde 'round trip' efficiëntie van elektrisch naar waterstof weer naar elektrisch. De 36% komt goed overeen met gepubliceerde schattingen van deze round trip efficiëntie tussen de 30-43%^{5,55}. In omkeerbare brandstofcellen die bij hoge temperatuur werken (stoomelektrolyse) kan een hoger rendement worden behaald: in een experimentele set-up is een round trip efficiëntie van wel 75% behaald (op basis van OVW)⁵⁶. Dit is nog geen systeem dat beschikbaar is voor praktische toepassing op korte termijn en de kostprijs van deze energie is nog onbekend. Het laat wel zien dat er nog volop technologische ontwikkelingen gaande zijn. Als waterstof in de tussentijd onder druk wordt gezet of vloeibaar wordt gemaakt zal het rendement tot wel een derde lager zijn. Lithium-ion batterijen of condensatoren, kunnen een round trip efficiëntie van meer dan 95% hebben.

Batterijen en condensatoren hebben een lagere specifieke energiedichtheid (kWh/kg) dan brandstofcellen¹¹. Hierdoor zal waterstof juist voor niet aan het energienet gekoppelde mobiele units: zoals auto's bussen, tractoren, vrachtauto's en schepen interessant kunnen zijn. Het energieverbruik van vervoer en verkeer ligt momenteel op zo'n 125 TWh/jaar⁵³. Vooral daar waar veel energie nodig is en (huidige) batterijen te weinig capaciteit of te veel gewicht hebben en er weinig tijd is voor opladen liggen kansen voor waterstof, bv. internationaal wegtransport, landbouwwerktuigen en scheepvaart. De efficiëntie van een brandstofcel is lager dan die van batterijen, maar hoger dan voor interne verbrandingsmotoren. Gemiddeld ligt de efficiëntie voor deze motoren in auto's rond de 15-30% (stad-snelweg). Brandstofcellen zullen energie zuiniger zijn, waardoor waterstof mogelijk aantrekkelijker is als brandstof dan bv. biodiesel. Ook met het oog op luchtverontreiniging en smogvorming in steden verdient waterstof de voorkeur boven biodiesel. Verder zal de efficiëntie van de brandstofcel nog verder toenemen, terwijl de verbrandingsmotor grotendeels uitontwikkeld lijkt te zijn. De optie om vloeibare waterstof te gebruiken in brandstofmotoren kan een rol gaan spelen in bv. de luchtvaart. Indirect kan waterstof, met CO₂, als grondstof dienen voor duurzaam geproduceerde kerosine (via Fischer-Tropsch proces). Ook zal waterstof een belangrijke rol kunnen spelen in processen waar hoge temperaturen nodig zijn (bv. staalindustrie) en waterstof zal ook zeker als grondstof in de chemische industrie dienen.

Een andere mogelijke branche waar waterstof aantrekkelijk kan zijn is het opslaan van energie over langere termijn. Condensatoren en batterijen zullen met de tijd ontladen en nemen meer plaats in dan samengeperst waterstof en zijn als energie drager minder gemakkelijk te verplaatsen. Seizoensgebonden energieopslag is een vraagstuk dat nog grotendeels open ligt. Het lokaal op kleine schaal produceren van waterstof, met bv. de zonnepanelen die waterdamp in waterstof om kunnen zetten, kan een interessante optie zijn om het elektriciteitsnet te ontlasten en zomerse zonne-energie voor de winterperiode te bewaren.

In dit rapport zijn de kosten voor compressie of vloeibaar maken van waterstof niet meegenomen, omdat deze (bijna) onafhankelijk zijn van de waterstofproductietechnologie. Ook op het vlak van waterstofopslag wordt onderzoek gedaan om de energetische efficiëntie in de toekomst te verhogen⁵⁷. De verwachting is dat in de nabije toekomst de compressie kosten voor opslag bij 700 bar kunnen dalen naar 1.6 kWh/kg, terwijl het vloeibaar maken van waterstof mogelijk voor 6 kWh/kg kan worden gedaan (theoretisch minimum ~2.7 kWh/kg)⁵⁷. Deze energetische kosten voor de opslag van waterstof onder druk of in vloeibare vorm zullen de energieprijzen van energie uit waterstof omhoog stuwten.

6 Conclusie

Een waterstofmolecuul kan ons van energie voorzien doordat bij de reactie met een zuurstofatoom tot een watermolecuul een minieme hoeveelheid energie vrijkomt uit de herschikking van elektronen. Door deze reactie voor een immens aantal moleculen te laten verlopen kan een hoeveelheid energie (234,3 kJ/mol H₂) worden vrijgemaakt die nuttig is te gebruiken. Dit kan met behulp van een verbrandingsmotor waarbij een deel van de energie wordt omgezet in beweging. Als vervolgstap kan beweging weer deels in elektriciteit worden omgezet. Met behulp van een brandstofcel worden de elektronen, die betrokken zijn bij de chemische reactie om waterstof en zuurstof in water om te zetten, via een extern elektrisch circuit geleid en gebruikt om arbeid te leveren. Deze manier van stroom maken is veel efficiënter dan met verbrandingsmotoren.

Technologisch is het mogelijk om met duurzame energie waterstof te produceren, alhoewel het merendeel van de hier behandelde technologieën alleen nog maar op experimentele schaal zijn toegepast. Om waterstof uit biomassa te winnen lijken vergassing en donkere fermentatie van biomassa de interessantste technologieën. In Nederland is echter niet voldoende biomassa beschikbaar om, na het dichtdraaien van de aardgaskraan, Nederland van energie te voorzien. Zelfs wanneer er met een rendement van 100% de energie uit biomassa kan worden omgezet in waterstof, biogas of welke energiedrager dan ook, dan nog zal slechts minder dan de helft van de hoeveelheid energie die nu uit aardgas komt kunnen worden geproduceerd. Binnenlandse biomassa gaat Nederland dus niet voorzien van energie, ook speelt nog een rol dat de vraag naar biomassa ook van buiten de energiesector zal toenemen. Dit omdat in een duurzame economie zonder aardolie, biomassa de voornaamste grondstof voor veel productieprocessen zal zijn. Door deze groeiende vraag zal de hoeveelheid biomassa die voor energiewinning overblijft afnemen en als logisch gevolg ook duurder worden.

Water als grondstof voor waterstof is in Nederland minder schaars dan biomassa. Desalniettemin zal het maken van waterstof uit water met elektrolyse waarschijnlijk ook na 2030 nog resulteren in een fors hogere energieprijis dan nu het geval is. Deze kosten zijn misschien nog wel op te brengen, het probleem is echter dat er veel te weinig duurzame energie geproduceerd wordt om aan ons energievraag te kunnen voldoen. Enkel 6,6% van de gebruikte energie in Nederland is op dit moment van niet duurzame oorsprong⁵¹. Het is een optie om op grote schaal groene energie uit het buitenland kopen, maar omdat er ook wereldwijd een tekort is aan duurzaam geproduceerde energie, betekend dit slechts een verplaatsing van de plaats waar fossiele brandstoffen worden verbrand. Misschien is het beter kolen te stoken in een efficiënte en relatief schone centrale in Nederland dan in een inefficiënte centrale in een economisch minder welvarend land. Een andere optie om goedkope energie te produceren zonder uitstoot van broeikasgassen is kernenergie, maar of het gebruik hiervan is een ethisch en politiek vraagstuk op zich.

In het kort: er is onvoldoende biomassa en duurzame energie om Nederland onafhankelijk te maken van fossiele brandstoffen. De verwachting is dat de hoeveelheid gewonnen energie uit wind, zon en aardbodem zal toenemen in de komende decennia. Deze toename zal bij lange na niet genoeg zijn om de hoeveelheid energie die nu uit fossiele brandstoffen wordt gebruikt te kunnen vervangen. Het 'energietekort' of 'het afhankelijk zijn van een te grote hoeveelheid energie' brengt met zich mee dat verkwisting van energie zeer onwenselijk is. Om deze reden verdienen de meest energie efficiënte processen voor energieopslag de voorkeur. Vanuit deze redenering zal waterstof voor korte termijn energieopslag niet gebruikt gaan worden. Voor energie opslag voor langere tijd kan waterstof zeker een rol gaan spelen als de praktische round trip efficiëntie van elektrisch – waterstof – elektrisch verder verbeterd kan worden. De verwachting is dat elektrolyse en brandstofcellen steeds efficiënter en goedkoper zullen worden, het perspectief voor waterstof als energiedrager zal bij realisatie van deze verwachtingen worden bijgesteld. Dit is echter voor het komende decennium noch niet aan de orde. In processen waarbij extreem hoge temperaturen nodig zijn of waar energiedragers met een hoge specifieke energie dichtheid voordeel hebben zal waterstof kunnen worden gebruikt als brandstof.

Met het in perspectief plaatsen van de potentie van waterstof als de energiedrager wordt het pijnlijk duidelijk dat we qua energieverbruik op veel te grote voet leven en dat de schoen behoorlijk wringt. Als energiedrager bevat waterstof relatief veel energie, maar er moet nog veel meer energie in worden gestoken om het te produceren. Deze energie is in duurzame vorm simpelweg niet beschikbaar in Nederland. Besparing van energie is daarom een belangrijk deel van de oplossing voor het energievraagstuk die: 1) voor kostenverlaging zorgt, 2) geen broeikasgassen produceert, en 3) de milieudruk van de mens vermindert, en 4) vandaag al kan worden ingezet. Verder is het in vele duizenden jaren bewezen dat mensen met een veel minder groot energieverbruik kunnen overleven dan de gemiddelde 'ontwikkelde' mens op dit moment. Door bewustwording van de grote energetische voetafdruk van alle producten, activiteiten en gemakken die de mens dienen kan een omslag in denken en hopelijk doen worden gemaakt. Met of zonder waterstof.

Dankbetuiging

Dank voor de interesse en positieve feedback aan de proeflezers van dit rapport. Speciale dank voor het uitgebreide constructieve en stimulerende commentaar en suggesties aan dr. D. Parmentier en drs. R. C. Terwisscha van Scheltinga.

Afkortingen en symbolen

Afkortingen:

BVW	=	bovenste verbrandingswarmte, maximale energie uit verbrandingsmotor
HTL	=	hydrothermische liquefactie (Eng: hydrothermal liquefaction)
Wh	=	wattuur, eenheid voor energie gelijk aan 3,6 MJ
MEC	=	microbiële elektrolyse cel (Eng: microbial electrolysis cell)
OVW	=	onderste verbrandingswarmte, BVW minus de verdampingswarmte van water
PEM	=	polymeer elektrolyt membraan, type elektrolyse cel
SOE	=	solid oxide elektrolyse, type elektrolyse cel

Symbolen:

<i>A</i>	=	ampère, eenheid voor stroomsterkte
<i>E</i>	=	energie in joule of kilowattuur
<i>F</i>	=	constante van Faraday in coulomb per mol
<i>G</i>	=	Gibbs vrije energie in joule
<i>g</i>	=	aanduiding gasvormige fase
<i>g</i>	=	gram, eenheid voor gewicht
<i>H</i>	=	enthalpie in joule
<i>I</i>	=	stroomsterkte in ampère
<i>J</i>	=	joule, eenheid voor energie: $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
<i>l</i>	=	aanduiding vloeibare fase
Nm^3	=	eenheid voor volume onder normale condities (bij 0°C en 1 atmosfeer)
<i>m</i>	=	massa in gram of ton
<i>n</i>	=	aantal mol elektronen betrokken in de reactie
<i>R</i>	=	weerstand in ohm
<i>S</i>	=	entropie in joule per kelvin
<i>T</i>	=	temperatuur in kelvin
<i>t</i>	=	tijd
<i>V</i>	=	volt, eenheid voor elektrische spanning / potentiaal
VS	=	vluchtige stof (Eng: volatile solids)
<i>W</i>	=	watt, eenheid van vermogen
<i>c</i>	=	lichtsnelheid
η	=	rendement
Ω	=	ohm, eenheid voor weerstand

Toevoegingen:

<i>m</i>	=	milli-, een duizendste (10^{-3})
<i>k</i>	=	kilo-, duizend (10^3)
<i>M</i>	=	mega, miljoen (10^6)
<i>G</i>	=	giga, miljard (10^9)
<i>T</i>	=	tera, biljoen (10^{12})

Bibliografie

1. Harrison KW, Remick R, Martin GD, Hoskin A. *Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries*. Golden, CO (United States); 2010. <http://www.osti.gov/bridge>.
2. Kumamoto A, Iseki H, Ono R, Oda T. Measurement of minimum ignition energy in hydrogen-oxygen-nitrogen premixed gas by spark discharge. *J Phys Conf Ser*. 2011;301(1). doi:10.1088/1742-6596/301/1/012039
3. Karagöz Y, Balcı Ö, Köten H. Investigation of hydrogen usage on combustion characteristics and emissions of a spark ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*. February 2019. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2019.01.147
4. Wild O, Prather MJ, Akimoto H. Indirect long-term global radiative cooling from NO_x Emissions. *Geophys Res Lett*. 2001;28(9):1719-1722. doi:10.1029/2000GL012573
5. FuelCellsWorks. Fuel Cell System Breaks Efficiency Record. <https://fuelcellsworks.com/news/fuel-cell-system-breaks-efficiency-record/>. Published 2018. Accessed April 1, 2019.
6. Singh V, Das D. Potential of Hydrogen Production From Biomass. In: *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. Elsevier Inc.; 2019:123-164. doi:10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4
7. Nikolaidis P, Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017;67:597-611. doi:10.1016/J.RSER.2016.09.044
8. Dincer I, Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int J Hydrogen Energy*. 2015;40(34):11094-11111. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2014.12.035
9. SCHLINGER WG, FALBE J, SPECKS R. Coal Gasification for Hydrogen Manufacturing. In: Smith WN, Santangelo JG, eds. *Hydrogen, Production and Marketing*. Washington, D.C.: American Chemical Society; 1980:177-190. doi:10.1021/bk-1980-0116.ch009
10. Gnanapragasam N V., Reddy B V., Rosen MA. Hydrogen production from coal gasification for effective downstream CO₂ capture. *Int J Hydrogen Energy*. 2010;35(10):4933-4943. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.07.114
11. Burheim OS. *ENGINEERING ENERGY STORAGE*. 1st ed. (Reading L, Rowley C, eds.). Academic Press (Elsevier); 2017.
12. Staffell I, Scamman D, Abad AV, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. 2018. doi:10.1039/c8ee01157e
13. Duman G, Yanik J. Two-step steam pyrolysis of biomass for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*. 2017;42(27):17000-17008. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2017.05.227
14. Ye M, Tao Y, Jin F, et al. Enhancing hydrogen production from the pyrolysis-gasification of biomass by size-confined Ni catalysts on acidic MCM-41 supports. *Catal Today*. 2018;307:154-161. doi:10.1016/j.cattod.2017.05.077
15. Elliott DC, Biller P, Ross AB, Schmidt AJ, Jones SB. Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. *Bioresour Technol*. 2015;178:147-156. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.132

16. Shende A, Tungal R, Jaswal R, Shende R. A Novel Integrated Hydrothermal Liquefaction and Solar Catalytic Reforming Method for Enhanced Hydrogen Generation from Biomass. *Am J Energy Res.* 2015;3(1):1-7. doi:10.12691/ajer-3-1-1
17. Sara HR, Enrico B, Mauro V, Andrea DC, Vincenzo N. Techno-economic Analysis of Hydrogen Production Using Biomass Gasification -A Small Scale Power Plant Study. *Energy Procedia.* 2016;101:806-813. doi:10.1016/J.EGYPRO.2016.11.102
18. Hydrogen Europe. UNIfHY project| Hydrogen. <https://hydrogeneurope.eu/project/unifhy>. Accessed December 28, 2018.
19. Pallozzi V, Di Carlo A, Bocci E, Villarini M, Foscolo PU, Carlini M. Performance evaluation at different process parameters of an innovative prototype of biomass gasification system aimed to hydrogen production. *Energy Convers Manag.* 2016;130:34-43. doi:10.1016/j.enconman.2016.10.039
20. Alamia A, Larsson A, Breitholtz C, Thunman H. Performance of large-scale biomass gasifiers in a biorefinery, a state-of-the-art reference. *Int J Energy Res.* 2017;41(14):2001-2019. doi:10.1002/er.3758
21. Thunman H, Seemann M, Berdugo Vilches T, et al. Advanced biofuel production via gasification - lessons learned from 200 man-years of research activity with Chalmers' research gasifier and the GoBiGas demonstration plant. *Energy Sci Eng.* 2018;6(1):6-34. doi:10.1002/ese3.188
22. Chandrasekhar K, Lee Y-J, Lee D-W. Biohydrogen production: strategies to improve process efficiency through microbial routes. *Int J Mol Sci.* 2015;16(4):8266-8293. doi:10.3390/ijms16048266
23. Paritosh K, Kushwaha SK, Yadav M, Pareek N, Chawade A, Vivekanand V. Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. *Biomed Res Int.* 2017;2017:1-19. doi:10.1155/2017/2370927
24. Varanasi JL, Veerubhotla R, Pandit S, Das D. Biohydrogen Production Using Microbial Electrolysis Cell: Recent Advances and Future Prospects. In: *Microbial Electrochemical Technology*. Elsevier; 2019:843-869. doi:10.1016/B978-0-444-64052-9.00035-2
25. Yu Y, Takahashi P. Biophotolysis-based Hydrogen Production by Cyanobacteria and Green Microalgae. In: Méndez-Vilas A, ed. *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology (Vol. 1)*. Badajoz (Spain); 2007:79-89. <http://www.formatex.org/microbio/pdf/Pages79-89.pdf>.
26. Show K-Y, Yan Y, Ling M, Ye G, Li T, Lee D-J. Hydrogen production from algal biomass – Advances, challenges and prospects. *Bioresour Technol.* 2018;257:290-300. doi:10.1016/J.BIORTECH.2018.02.105
27. Ren H-Y, Liu B-F, Kong F, Zhao L, Ma J, Ren N-Q. Favorable energy conversion efficiency of coupling dark fermentation and microalgae production from food wastes. *Energy Convers Manag.* 2018;166:156-162. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.032
28. Jarunglumert T, Prommuak C, Putmai N, Pavasant P. Scaling-up bio-hydrogen production from food waste: Feasibilities and challenges. *Int J Hydrogen Energy.* 2018;43(2):634-648. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2017.10.013
29. Levin D. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *Int J Hydrogen Energy.* 2004;29(2):173-185. doi:10.1016/S0360-3199(03)00094-6

30. Wang X, Fang Y, Wang Y, et al. Single-stage photo-fermentative hydrogen production from hydrolyzed straw biomass using *Rhodobacter sphaeroides*. *Int J Hydrogen Energy*. 2018;43(30):13810-13820. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2018.01.057
31. South PF, Cavanagh AP, Liu HW, Ort DR. Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science (80-)*. 2019;363(45). doi:10.1126/SCIENCE.AAT9077
32. Khetkorn W, Rastogi RP, Incharoensakdi A, et al. Microalgal hydrogen production – A review. *Bioresour Technol*. 2017;243:1194-1206. doi:10.1016/J.BIORTECH.2017.07.085
33. Nagarajan D, Lee D-J, Kondo A, Chang J-S. Recent insights into biohydrogen production by microalgae – From biophotolysis to dark fermentation. *Bioresour Technol*. 2017;227:373-387. doi:10.1016/J.BIORTECH.2016.12.104
34. Rivera I, Schröder U, Patil SA. Microbial Electrolysis for Biohydrogen Production. In: *Microbial Electrochemical Technology*. Elsevier; 2019:871-898. doi:10.1016/B978-0-444-64052-9.00036-4
35. Aiken DC, Curtis TP, Heidrich ES. Avenues to the financial viability of microbial electrolysis cells [MEC] for domestic wastewater treatment and hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*. 2019;44(5):2426-2434. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2018.12.029
36. Fukuzumi S, Lee Y-M, Nam W. Thermal and photocatalytic production of hydrogen with earth-abundant metal complexes. *Coord Chem Rev*. 2018;355:54-73. doi:10.1016/J.CCR.2017.07.014
37. Farjana SH, Huda N, Mahmud MAP, Saidur R. Solar process heat in industrial systems – A global review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;82:2270-2286. doi:10.1016/J.RSER.2017.08.065
38. Yadav D, Banerjee R. Economic assessment of hydrogen production from solar driven high-temperature steam electrolysis process. *J Clean Prod*. 2018;183:1131-1155. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.074
39. Ahmed M, Dincer I. A review on photoelectrochemical hydrogen production systems: Challenges and future directions. *Int J Hydrogen Energy*. 2019;44(5):2474-2507. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2018.12.037
40. Buttler A, Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;82:2440-2454. doi:10.1016/J.RSER.2017.09.003
41. Bhandari R, Trudewind CA, Zapp P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *J Clean Prod*. 2014;85:151-163. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2013.07.048
42. Hosseini SE, Wahid MA. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016;57:850-866. doi:10.1016/j.rser.2015.12.112
43. Ramsden T, Ruth M, Diakov V, Laffen M, Timbario TA. *Hydrogen Pathways: Updated Cost, Well-to-Wheels Energy Use, and Emissions for the Current Technology Status of Ten Hydrogen Production, Delivery, and Distribution Scenarios*. Golden, CO (United States); 2013. doi:10.2172/1107463
44. Andrea MF, Sara RH, Luca DZ, Giovanni SS, Enrico B. Techno-economic analysis of in-situ production by electrolysis, biomass gasification and delivery systems for Hydrogen Refuelling Stations: Rome case study. *Energy Procedia*. 2018;148:82-89. doi:10.1016/j.egypro.2018.08.033
45. Nakyai T, Authayanun S, Patcharavorachot Y, Arpornwichanop A, Assabumrungrat S, Saebea D. Exergoeconomics of hydrogen production from biomass air-steam gasification with methane co-feeding. *Energy Convers Manag*. 2017;140:228-239. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2017.03.002

46. Lee Y-W, Chung J. Bioproduction of hydrogen from food waste by pilot-scale combined hydrogen/methane fermentation. *Int J Hydrogen Energy*. 2010;35(21):11746-11755. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2010.08.093
47. Saba SM, Müller M, Robinius M, Stolten D. The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *Int J Hydrogen Energy*. 2018;43(3):1209-1223. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2017.11.115
48. Fan K, Chen H, Ji Y, et al. Nickel–vanadium monolayer double hydroxide for efficient electrochemical water oxidation. *Nat Commun*. 2016;7(1):11981. doi:10.1038/ncomms11981
49. Zhou H, Yu F, Sun J, et al. Highly active catalyst derived from a 3D foam of Fe(PO₃)₂/Ni₂P for extremely efficient water oxidation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2017;114(22):5607-5611. doi:10.1073/pnas.1701562114
50. Rijksoverheid. *Biomassa 2030.*; 2016. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2015/12/01/biomassa-2030>.
51. CBS. Aandeel hernieuwbare energie naar 6,6 procent. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/22/aandeel-hernieuwbare-energie-naar-6-6-procent>. Published 2018. Accessed April 10, 2019.
52. Heremans G, Trompoukis C, Daems N, et al. Vapor-fed solar hydrogen production exceeding 15% efficiency using earth abundant catalysts and anion exchange membrane † Sustainable Energy & Fuels. 2017;9:58-53. doi:10.1039/c7se00373k
53. Statline C. Energiebalans; aanbod en verbruik, sector 2017. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83989NED/table?ts=1557613082566>. Published 2019. Accessed May 1, 2019.
54. CBS. Energieverbruik gedaald in 2018. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/16/energieverbruik-gedaald-in-2018>. Published 2019. Accessed May 1, 2019.
55. Energy Storage Association (ESA). Hydrogen Energy Storage. <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/hydrogen-energy-storage>. Published 2019.
56. Duan C, Kee R, Zhu H, et al. Highly efficient reversible protonic ceramic electrochemical cells for power generation and fuel production. *Nat Energy*. 2019;4(3):230-240. doi:10.1038/s41560-019-0333-2
57. Andersson J, Grönkvist S. Large-scale storage of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy*. 2019;44(23):11901-11919. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2019.03.063