

Een objectieve kijk op  
**WATERSTOF**

**Uitdagingen en kansen  
voor de klimaat- en energietransitie**

Inkijkexemplaar

ISBN: 978-94-92404-22-0 (paperback)  
NUR: 961 (Energie), 259 (Wetenschap), 100 (Educatief)  
Trefwoorden: waterstof, waterstofeconomie, H2, energie, klimaat

Titel: Een objectieve kijk op waterstof  
Ondertitel: uitdagingen en kansen voor de  
klimaat- en energietransitie  
Auteur: Jeroen Horlings  
Druk: 1 (december 2019, v1.04)  
Opmaak en cover: Uitgeverij Sycorax  
Cover-illustratie: ZRost9 / Pond5  
*De weergave toont een illustratie van een  
Methaan-molecule (CH<sub>4</sub>). Meer dan 90% van de  
geproduceerde waterstof wordt momenteel uit  
methaan (aardgas) gebaald.*

Uitgeverij Sycorax - [www.sycorax.nl](http://www.sycorax.nl) © Copyright 2019-2020

*Met dank aan Robert van den Hoed, Lies Muller, Emile Nijssen,  
Wim Schermer, Jaap Slager en Wammes Witkop.*

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, digitaal, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht. Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatie- of andere werken (artikel 16 Auteurswet 1912), in welke vorm dan ook, dient men zich tot de uitgever te wenden. Ondanks alle aan de samenstelling van dit boek bestede zorg kan noch de redactie, noch de auteur, noch de uitgever aansprakelijkheid aanvaarden voor schade die het gevolg is van enige fout in deze uitgave.

# INHOUDSOPGAVE

<b>Voorwoord .....</b>	<b>11</b>
<b>I. Inleiding .....</b>	<b>17</b>
<b>II. Wat is waterstof? .....</b>	<b>23</b>
Energiedrager .....	25
Energiedichtheid van waterstof.....	26
Vloeibare waterstof (LH <sub>2</sub> ) .....	27
<b>III. Waterstofproductie .....</b>	<b>31</b>
Grijze waterstof.....	32
Blauwe waterstof.....	32
Groene waterstof .....	33
<b>IV. Elektrolyse .....</b>	<b>37</b>
Efficiëntie .....	39
Zuiver water .....	42
Stroom opwekken waar het efficiënt is .....	43
Waterstof produceren in de Sahara.....	45
<b>V. De brandstofcel .....</b>	<b>49</b>
Waterstof en zuurstof.....	51
Rendement.....	51
Hoe werkt een brandstofcel? .....	52
PEMFC en SOFC .....	53
<b>VI. De waterstofauto .....</b>	<b>55</b>
Tankstations.....	57
Nieuwe belangstelling.....	58
Beschikbare waterstofauto's.....	59
Cilindrische tanks .....	62
Accu en grondstoffen .....	64
Luchtinlaat.....	65

Waterstof tanken.....	66
Rendement.....	68
Compromissen.....	68
Prijs aan de tank .....	70
Levensduur en garantie .....	72
Veiligheid.....	73
Grote auto's .....	76
Toekomst .....	76
Reacties van derden.....	79
<b>VII. Van vrachtwagen tot schepen .....</b>	<b>85</b>
Vrachtwagens en bussen.....	87
Treinen.....	89
Scheepvaart .....	90
Vliegtuigen .....	92
<b>VIII. Opslag, distributie en infrastructuur ..</b>	<b>95</b>
Opslag.....	96
Tanken .....	98
Interne druk .....	99
Spreiding tankstations .....	101
Lokale waterstofproductie.....	101
Rentabiliteit .....	102
Business case: de pomphouder.....	103
<b>IX. Buffer voor overtollige energie .....</b>	<b>105</b>
Curtailment.....	108
Energietransitie.....	108
Kernenergie .....	110
Accu's en V2G .....	111
Overtollige energie (overschotten).....	112
Economische haalbaarheid.....	114
<b>X. Koken en verwarmen op waterstof .....</b>	<b>119</b>
Transportnetwerk.....	120
Waterstof in het gasnetwerk .....	121
Verwarmen en koken met waterstof .....	124
Alternatieven .....	129
Kosten.....	130

<b>XI. CCS: waterstof zonder CO<sub>2</sub></b> .....	<b>135</b>
Carbon-Capture-and-Storage.....	136
Ondergrondse opslag.....	137
Nadelen.....	138
Hoe werkt CO <sub>2</sub> afvang?.....	140
Blauwe waterstof ‘groener’ dan groene waterstof?....	141
<b>XII. Milieu en duurzaamheid</b> .....	<b>143</b>
Waterstof ‘vergroenen’ .....	144
Waterstofgebruik in de industrie .....	146
Staalindustrie.....	147
Autoproductie en grondstoffen.....	148
<b>XIII. Waterstof in het Klimaatakkoord</b> .....	<b>155</b>
Waterstofgebruik in de industrie .....	156
Waterstofprogramma .....	158
Dalende stroomprijs?.....	158
Elektrolyzers .....	159
Verdringing = meer CO <sub>2</sub> .....	159
<b>XIV. Alternatieven voor waterstof</b> .....	<b>163</b>
Waterstof in een verbrandingsmotor .....	164
Groengas.....	164
Ammoniak .....	165
Mierenzuur .....	166
Waterstof in poedervorm .....	167
Waterstof als range extender .....	169
Solid-state-accu .....	170
<b>XV. Toekomst</b> .....	<b>173</b>
De knelpunten.....	175
Verdringing.....	177
Keuzes maken.....	179
Tot slot.....	183
<b>Begrippenlijst</b> .....	<b>185</b>
<b>Index</b> .....	<b>189</b>

# VOORWOORD

Waterstof staat sinds een aantal jaren weer volop in de belangstelling. Er gaat geen week voorbij of een nieuwe proef, demo of visie wordt via de media op ons losgelaten. Grootse plannen worden aangekondigd over grootschalige productie van groene waterstof, over toepassingen in brandstofcelauto's of -bussen, of over mogelijkheden van bijmengen van waterstof bij aardgas voor verwarming van onze huizen. Hierbij wordt waterstof gepresenteerd als dé toekomstige energiedrager en dé oplossing om toekomstige overschotten door overproductie van zonne- en windenergie op te slaan. Er wordt, eerlijk gezegd, niet altijd even kritisch gekeken naar de beperkingen van dergelijk gebruik van waterstof.

De berichtgeving rond waterstof oogst ook tegenreacties. Het ketenrendement van waterstof zou laag zijn, de kosten van groene waterstof en brandstofcellen hoog en de CO<sub>2</sub>-uitstoot laag (omdat waterstof vooral met aardgas geproduceerd wordt), terwijl de voordelen van waterstof beperkt zouden zijn. Batterij-elektrische auto's zouden een veel beter alternatief zijn voor de auto op benzine, diesel of gas. Kortom, waterstof wordt door de criticasters weggezet als een hype.

En zo buitelen de voor- en tegenstanders van waterstof over elkaar heen. In de discussie over de energietransitie leidt waterstof dan ook tot een (soms heftig) gepolariseerde discussie over voors en tegens, kansen en bedreigingen, zin en onzin. Het lijkt soms meer een geloofskwestie dan een nuchtere beoordeling van blote feiten, waarbij argumenten dikwijls selectief in stelling worden gebracht ter onderbouwing van kansen dan wel bezwaren van een waterstofeconomie.

De naakte waarheid is dat waterstof nog steeds in de kinderschoenen staat. Sinds het midden van de jaren

negentig zijn tientallen brandstofcel-, electrolyser- en waterstofbedrijven actief in de ontwikkeling van vermarktbaar producten. Toch blijft de launch-to-market veelal achterwege. Tegelijk staat de concurrentie te dringen – batterij-technologie voorop. De ontwikkeling die de afgelopen tien jaar met lithium-ionbatterijen is gemaakt is ongekend. Hierdoor lijkt de automotieve markt voor waterstof nu al een gepasseerd station.

Maar een andere realiteit is, dat de opwekking van duurzame energie al meer dan vijftien jaar hand over hand toeneemt, met groeipercentages van 25 tot 35% per jaar. Daar waar duurzame energie 15 jaar geleden een kleine nichemarkt was, is de industrie rond met name zonne- en windenergie meer dan volwassen geworden. Met gelijkblijvende groeicijfers gaan overschotten, en dan met name op lokaal niveau, spoedig werkelijkheid worden. En men behoeft beslist geen helderziende te zijn om nu al te kunnen voorspellen dat er een dringende vraag gaat ontstaan naar grootschalige opslag van elektriciteit. Daar hebben we momenteel nog steeds geen goede oplossing voor. En dan blijft waterstof wel degelijk als één van de meest attractieve opties over. Voorsorteren op een waterstofeconomie mag dan wat voorbarig lijken, erop voorbereid zijn is alleszins verstandig.

En zo moeten we in de discussie over waterstof misschien een onderscheid maken tussen aan de ene kant de nu nog geldende beperkingen en aan de andere kant de kansen (en een mogelijke rol) voor waterstof in de toekomstige energietransitie. Dat bijvoorbeeld waterstoftankstations nu nog veel te duur zijn en omgeven met technische onvolkomenheden, betekent geenszins dat we geen pilotprojecten zouden moeten starten teneinde vast te stellen aan welke voorwaarden voldaan dient te worden om ze op termijn wel kansrijk te doen zijn.



En dat waterstof nu nog op basis van aardgas gemaakt wordt (grijze waterstof), betekent nog niet dat over tien jaar groene waterstof niet een serieuze optie zou kunnen zijn. Ook hier geldt weer: onder welke voorwaarden, met welke technologieën en met welke (beleidsmatige) stimulansen.

Belangrijke voorwaarde voor dergelijke pilotprojecten is natuurlijk wel, dat er kritisch gekeken wordt naar de voors en tegens en dat er een objectieve en eerlijke evaluatie plaatsvindt van aan welke voorwaarden eerst voldaan dient te zijn, vóór projecten opgeschaald kunnen worden. En daar schort het veelal aan. Er bestaat een enorme behoefte aan objectieve(!) informatie omtrent kosten, baten, kansen en risico's van productie en opschaling van waterstofsysteem. De grote risico's zijn momenteel dat onvolkomenheden met de mantel der liefde bedekt worden en de hype rond waterstof zodoende wordt gevoed.

Eén van de voornaamste redenen waarom waterstof zo tot de verbeelding spreekt is misschien omdat waterstof in theorie de backbone kan zijn van ons hele energiesysteem. Het kan geproduceerd worden bij onze offshore windmolens, vervoerd door ons gasnetwerk en gebruikt in onze huizen, voertuigen, industrie en zelfs onze elektronische apparaten.

Het beeld van een waterstofeconomie zoals Jeremy Rifkin ons die in de jaren negentig voorspiegelde, spreekt weliswaar tot de verbeelding, maar de realiteit is vooralsnog dat waterstof en brandstofcellen per sector en per toepassing stevige concurrentie hebben. En zo is het nog steeds wachten op de killerapplicatie voor waterstof en brandstofcel.

Dit boek probeert te laveren tussen de hoge verwachtingen en de kritische kanttekeningen die rond waterstof spelen. Het doet een poging om zowel voorstanders als criticasters een podium te geven. Beide partijen krijgen de gelegenheid hun visie over het voetlicht te brengen, waarom waterstof wel of juist niet kansrijk is. Dit boek biedt een perspectief op de voors en tegens per toepassingsgebied, zodat je als lezer je eigen mening kunt vormen over waterstof. Ook relativeert het hier en daar al te ronkende juichverhalen over nieuwe toepassingen van waterstof.

Al met al een boek dat volgens mij hoognodig is om feiten van fictie rond waterstof te scheiden, en om een genuanceerd beeld te scheppen van waterstof als toekomstige energiedrager. En dus ook een boek dat mogelijk ertoe kan bijdragen voor- en tegenstanders wat dichter bij elkaar te brengen.

- *Professor Robert van den Hoed*

*Robert van den Hoed is afgestudeerd aan de TU-Delft en onderzocht tijdens zijn promotie waterstof- en brandstofcel-technologie in de auto-industrie. Tussen 2004 en 2010 was hij bij Ecofys verantwoordelijk voor het opzetten en uitvoeren van waterstof- en brandstofcel-projecten en sinds 2011 werkt hij als Lector Energie en Innovatie aan de Hogeschool van Amsterdam. Daar houdt hij zich bezig met studies naar duurzame mobiliteit, elektrisch rijden en energie-innovaties.*

— HOOFDSTUK I —  
**INLEIDING**

In het klimaatakkoord van juni 2019 wordt waterstof maar liefst 182 keer genoemd. In het daaraan voorafgaande conceptakkoord, dat door diverse 'klimaattafels' werd samengesteld, was dat 124 keer. Ongetwijfeld heeft het besluit om in 2022 grotendeels te stoppen met de aardgaswinning in Groningen een rol gespeeld bij de toegenomen interesse in waterstof. Immers, hoe worden huizen dan straks verwarmd, waarop gaan we in de toekomst koken en is onze gigantische gasinfrastructuur niet her te gebruiken voor iets anders? De vraag rees al snel of waterstof niet aardgas zou kunnen vervangen.

Waterstof (H<sub>2</sub>) lijkt een essentieel onderdeel te zijn van de energietransitie van fossiele brandstoffen naar duurzame energie. Waterstof is een veelzijdige energiedrager en kan voor meerdere doelen worden ingezet. Bijvoorbeeld als buffer om zonne-energie 's zomers op te slaan voor gebruik in de winter. Of als alternatieve energiebron voor de industrie in plaats van kolen, aardgas en olie - inclusief auto's en zwaar transport dat er op kan rijden. Toch zijn er nog heel wat knelpunten te overwinnen voordat dit gerealiseerd is.

Waterstof is geen nieuwe ontdekking, maar wordt al decennia gebruikt in de industrie. Al meer dan dertig jaar wordt er gesproken over een 'waterstofeconomie', waarbij waterstof de rol van fossiele brandstoffen - waar we nu voor onze economie van afhankelijk zijn - volledig overneemt. Toch wordt waterstof momenteel nog grotendeels gemaakt van aardgas, wat op dat vlak dus geen zoden aan de dijk zet. Ook zijn er flinke hobbels te overwinnen om het efficiënt, betaalbaar en op grote schaal duurzaam te kunnen produceren. In een ideaal scenario zou waterstof met hoog rendement kunnen worden geproduceerd door zonnepanelen bij de evenaar, waar de zon optimaal schijnt. Vanaf daar kan het

via pijpleidingen of schepen (op waterstof) vervoerd worden naar ons land. Ook kan het in Nederland worden geproduceerd wanneer er sprake is van overcapaciteit van duurzame energie. Het zou tijdelijk kunnen worden opgeslagen in speciale opslagtanks, maar ook in zoutkoepels en lege gasvelden.

Dat waterstof veelzijdig en voor de toekomst potentieel veelbelovend is, staat buiten kijf. Toch schiet het enthousiasme soms wat door. Dagelijks zijn er in kranten, op websites, tijdens presentaties, op tv en op sociale media enthousiaste verhalen te horen en te lezen over waterstof die met regelmaat wat eenzijdig zijn. Dat de voordelen worden uitgelicht is prima, maar door niet of nauwelijks over knelpunten en nadelen te spreken, ontstaat soms een te rooskleurig beeld waarbij het lijkt alsof waterstof op korte termijn dé oplossing is voor al onze problemen. Dit probleem wordt versterkt doordat veel mensen, met name op platformen als Twitter, Facebook en LinkedIn, soms ongegeneerd en zonder kennis van zaken - een bepaalde overtuiging in stelling brengen naar aanleiding van iets dat ze ooit gehoord of gelezen hebben. Het gevolg is dat daardoor al snel een eenzijdige nullen-en-enen-discussie ontstaat, met enkel voor- en tegenstanders en niets daar tussenin.

Voor een leek is de discussie vaak lastig te volgen. Waterstof is best een complex onderwerp - juist omdat het zo veelzijdig is, maar er ook zoveel haken en ogen zijn. Basiskennis van natuur- en scheikunde is een pré omdat dit inzicht biedt in de mogelijkheden en beperkingen. Weten wat er speelt is ook belangrijk - bijvoorbeeld om te realiseren dat massale productie van duurzame groene waterstof nog ver weg is. Ook voor journalisten is waterstof een lastig onderwerp. Goede vragen stellen is eigenlijk alleen mogelijk wanneer je concrete kennis

hebt over het onderwerp. Zonder kritische inhoudelijke vragen is het onmogelijk om de voor- en nadelen duidelijk te maken en ontbreekt duiding. Het gevolg is dat het dan al snel eenzijdige jubelverhalen worden - een aantal voorbeelden worden in dit boek besproken. Verder is het voor de beeldvorming goed om een onderscheid te maken tussen onafhankelijke partijen zonder eigen belang en bedrijven en individuen die een business model rondom waterstof hebben. Logischerwijs presenteert de laatste groep doorgaans meer positieve en optimistische verhalen. Ook zijn zij meestal minder open over de knelpunten en zullen deze zelden pro-actief benoemen. Het zal geen verrassing zijn dat een bedrijf als de Gasunie waterstof als alternatief aandraagt voor aardgas. En evenmin dat Shell inzet op auto's die op waterstof rijden. In beide gevallen biedt waterstof de kans om het huidige verdienmodel en de infrastructuur grotendeels in stand te houden. In het laatste geval blijven mensen bijvoorbeeld afhankelijk van tankstations en kan Shell ook een rol blijven spelen bij de productie en distributie.

Aan het begin van dit boek staan een aantal quotes over waterstof. Inhoudelijk is er weinig mis mee - de geciteerden streven naar een betere wereld met minder afhankelijkheid van buitenlandse energiebronnen, minder oorlogen om grondstoffen en meer duurzaamheid. Met de kennis van nu kunnen we echter stellen dat de uitspraken bijna twintig jaar na dato vrij optimistisch waren en dat een waterstofeconomie nog steeds ver weg is. Niets zegt dat dit de komende twintig jaar wezenlijk anders zal worden. Ondanks de brede inzetbaarheid van waterstof, zijn er nog steeds dezelfde knelpunten die niet eenvoudig op te lossen zijn. Weliswaar zal waterstof steeds belangrijker kunnen worden in de klimaat- en energietransitie, veel problemen zijn natuurkundig van

aard en die zijn, ondanks diverse ‘doorbraken’ de afgelopen jaren, niet overwonnen.

De belangrijke problemen hebben te maken met de productie, opslag en distributie van waterstof. De huidige productie op basis van aardgas is relatief goedkoop, maar houdt de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in stand - inclusief de bijbehorende CO<sub>2</sub>-uitstoot. Als overgangsfase moet de CO<sub>2</sub> in de nabije toekomst worden afgevangen en onder de grond opgeslagen (CCS) - iets dat tot nu toe nog niet van de grond gekomen is omdat bedrijven, inclusief twee hageInieuwe kolencentrales, het te duur vonden. Nog veel duurder is waterstof duurzaam produceren door met behulp van elektriciteit gedestilleerd water te splitsen in zuurstof en waterstofgas middels ‘elektrolyse’. Dit proces kost behoorlijk veel energie en is pas echt groen als het op basis van stroom van windmolens of zonnepanelen gebeurt. Maar er is veel te weinig duurzame stroom om dit binnen afzienbare tijd te realiseren. In 2030, wanneer 70% van de stroom duurzaam moet zijn, is de totale capaciteit van alle windparken nauwelijks voldoende om de huidige productie van grijze waterstof voor de industrie te vergroenen. En die duurzame stroom is broodnodig voor bedrijven en huishoudens. Omdat tijdens de productie en het gebruik van waterstof veel energie verloren gaat, zal er in de toekomst veel meer energie geproduceerd moeten worden dan nu gepland is. Voorbeeld: vanwege het grote verschil in energie-efficiëntie zouden er twee tot drie keer zoveel windmolens nodig zijn om op duurzame waterstof te rijden dan op accu’s.

De opslag en de distributie van waterstof is een ander struikelblok. Waterstof is een gas dat in normale atmosferische condities een lage energiedichtheid heeft. Dat betekent dat het bijzonder veel volume inneemt en daar-

door niet in auto's of vliegtuigen past. Dit wordt opgelost door het gas flink te comprimeren door de druk op te voeren - tot wel 700 bar. Waterstof is wel zeer licht, dus gecompriemd is de energiedichtheid in kilo's wel hoger dan van bijvoorbeeld benzine. Maar in liters dus niet. Het laat zich ook lastig vervoeren. Bij lage druk neemt het veel te veel ruimte in beslag, waardoor er veel meer tankwagens nodig zouden zijn dan nu. Bij hoge druk wordt het bewaard in cilindrische gastanks en zijn er dus heel veel losse cilinders nodig - en nog steeds meer tankwagens dan nu. Er is één bewezen alternatief: door waterstof extreem te koelen tot  $-252,87^{\circ}\text{C}$  - slechts twintig graden boven het absolute nulpunt. Dan wordt het vloeibaar en is het makkelijker te transporteren. Andere alternatieven, zoals waterstof in poedervorm of door het te binden aan een andere vloeibare drager zijn tot nu toe in de praktijk nog niet van de grond gekomen.

Dit boek zet de feiten in begrijpelijke taal, maar met voldoende diepgang, op een rij. Er wordt ingegaan op de verschillende productiemethodes, de opslagmogelijkheden en de distributie, mede aan de hand van praktijkvoorbeelden. We kijken naar waterstofauto's, -bussen, -vrachtwagens, -schepen, -treinen en vliegtuigen en de infrastructuur die daarvoor nodig is. Bovenal is er aandacht voor de rol die waterstof kan spelen als buffer - al dan niet voor overtollige energie - en op welke manieren het zou kunnen worden opgeslagen. Waterstof in het gasnetwerk wordt niet onbesproken gelaten, waarbij gekeken wordt in hoeverre verwarmen en koken praktisch is. Tot slot is er aandacht voor het klimaatakkoord, de duurzaamheid van waterstof in alle verschijningsvormen en eventuele alternatieven.

- *Jeroen Horlings*, november 2019  
[www.jeroenhorlings.nl](http://www.jeroenhorlings.nl)



# INDEX

---

## A

---

*accu* 39, 50, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 76, 78, 81, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92, 93, 111, 115, 125, 126, 144, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 166, 169, 170, 171, 180, 181

*ammoniak* 26, 140, 146, 147, 157, 164, 165, 176, 180

*anode* 38, 51, 52

## B

---

*blockchain* 111, 112

*brandstofcel* 12, 13, 14, 15, 27, 39, 41, 42, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 60, 64, 65, 68, 69, 72, 73, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 86, 96, 125, 126, 127, 131, 134, 149, 150, 151, 164, 169, 170, 175

## C

---

*CCS* 33, 43, 56, 117, 131, 136, 137, 138, 139, 142, 144, 145, 156, 157, 159, 161, 174, 176, 177, 181

*cilindrische tank* 62, 74, 87, 92, 121, 176

*compressie* 39, 42, 78, 87, 98, 104, 125, 126, 167, 168

*curtailment* 108, 113, 115

## D

---

*degradatie* 72, 73

## E

---

*electrolyzers* 70, 113, 114, 130, 141, 159, 160, 161, 178

*elektrolyse* 33, 34, 38, 39, 42, 43, 44, 52, 71, 72, 78, 81, 84, 102, 110, 114, 125, 131, 132, 133, 141, 145, 151, 157, 159, 160, 161, 166, 168, 175, 178, 181

*elektrolyt* 44, 51, 52, 72, 170

*elektronen* 29, 50, 51, 52

*energiedichtheid* 26, 27, 28, 63, 81, 86, 87, 92, 97, 165, 170, 176

*energiedrager* 12, 15, 18, 25, 32, 76, 81, 86, 118, 174, 180, 183

*energieopslag* 24, 39, 115

*energietransitie* 12, 13, 18, 25, 32, 108, 113, 118, 128, 129, 174, 183

*ETS* 136, 176

## **G**

---

gascentrales 106, 107, 108, 118, 161, 178  
gasnetwerk 14, 120, 121, 123, 126, 127, 164, 174, 180  
groengas 164, 165

## **H**

---

HDPE 120  
hoge druk 26, 29, 32, 41, 62, 73, 92, 96, 98, 166, 176  
HVDC-kabel 46, 47  
hydrogenatiereacties 146

## **I**

---

ionen 50, 51, 52

## **K**

---

katalysator 40, 44, 51, 64, 125, 148, 166, 167  
kathode 38, 51, 52  
kernenergie 110, 181  
klimaatakkoord 18, 58, 86, 117, 121, 130, 156, 157, 159, 160, 176, 177  
klimaatdoelen 139, 157, 182, 183  
klimaattransitie 33, 136, 156  
kobalt 64, 65, 149  
kraken 40, 146  
kunstmatige intelligentie 44

## **L**

---

lithium 13, 64, 150, 170, 171

## **M**

---

machine learning 44  
membraan 40, 51, 52  
methaan 25, 28, 32, 117, 122, 124, 139, 186  
mierenzuur 164, 166

## **O**

---

onderzoek 40, 41, 44, 45, 48, 59, 75, 113, 115, 116, 129, 141, 147, 149, 150, 152, 153  
overschotten 12, 13, 34, 38, 43, 112, 113, 114, 115, 125, 177, 178, 179, 180  
overtollige energie 187  
oxidatie 50, 117, 139

## **P**

---

*palladium* 148, 150  
*PEMFC* 52, 53, 64  
*perpetuum mobile*. 40  
*platina* 52, 54, 64, 65, 148, 149, 150, 151  
*poeder* 98, 167, 168, 169  
*protonen* 51

## **R**

---

*reductie* 50, 82, 86, 130, 132, 136, 147, 159, 182  
*reforming* 32, 33, 38, 39, 43, 52, 56, 71, 84, 117, 131, 139, 140, 145, 159, 161, 174, 176  
*rendement* 12, 18, 32, 38, 39, 40, 41, 46, 51, 52, 53, 68, 70, 78, 81, 92, 117, 125, 131, 132, 134, 167, 168, 169, 178  
*rhodium* 148, 150

## **S**

---

*SOFC* 53  
*solid-state* 62, 81, 170  
*staalindustrie* 144, 147, 174  
*stikstof* 90, 127, 148, 165  
*stoomreforming* 32, 131, 139, 187

## **T**

---

*tankstation* 13, 20, 57, 58, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 77, 78, 79, 81, 82, 88, 89, 96, 98, 99, 101, 102, 103, 153, 164, 165, 166, 168, 180  
*tetrahydrothiofeen* 74, 127  
*thermodynamica* 52  
*thermoneutrale efficiëntie* 40  
*tritium* 147

## **V**

---

*verbrandingsmotor* 27, 51, 59, 84, 164, 168  
*verdringing* 34, 43, 113, 156, 160, 176, 177, 187  
*verliezen* 39, 41, 52, 82, 131, 168, 175, 178  
*vloeibaar* 25, 26, 27, 28, 97, 121, 136, 147, 165, 166, 171  
*volume* 26, 28, 80, 87, 91, 92, 97, 98, 125, 136

## **W**

---

*warmtepomp* 39, 116, 125, 129, 130, 131, 132

*waterstofatomen* 24, 25

*waterstofeconomie* 13, 14, 96, 177, 179, 183

*waterstofinfrastructuur* 77, 96, 130

*windmolens* 14, 34, 39, 43, 70, 71, 106, 107, 108, 110, 113, 138, 145, 146, 151, 158,  
161, 178, 182, 183

## **Z**

---

*zonnepanelen* 18, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 83, 107, 110, 125, 126, 133, 138, 151, 158,  
182

*zuiverheid* 53, 96, 125

*zuurstof* 24, 28, 38, 39, 40, 44, 50, 51, 52, 53, 54, 64, 65, 74, 75, 125, 127, 140, 147,  
148