

**HET  
BATTERIJ  
BOEK**

INKIJKEXEMPLAAR

# Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b>	<b>7</b>
<b>1. Inleiding</b>	<b>9</b>
De veranderende rol van batterijen	12
De energietransitie	13
Klimaatakkoord	14
Europees beleid	16
Elektrisch vervoer	17
Scheepvaart	20
Luchtvaart	21
De rijdende batterij (V2X)	22
Veiligheid	24
Toekomst	25
<b>2. Geschiedenis</b>	<b>27</b>
Leidse fles	31
Alessandro Volta	33
De loodzuurbatterij	34
NikkelCadmium (NiCd)	35
NikkelMetaalHydride batterij (NiMH)	37
Lithiumion	38
De geschiedenis van de elektrische auto	40
<b>3. Geopolitiek</b>	<b>43</b>
Grondstoffen voor batterijen	46
Stijgende vraag	47
Geopolitieke afhankelijkheid	48
Nimby	50
Circulariteit en recycling	51

<b>4. Grondstoffen</b>	<b>55</b>
Koper	58
Aluminium	59
Lithium	60
Nikkel	61
Kobalt	62
Mangaan	63
Grafiet	63
Silicium	64
Ijzer en fosfaat	65
Zouten	66
<b>5. Milieu</b>	<b>69</b>
Klimaatverandering	71
Grondstoffen	74
Elektrificatie	76
Grondstoffen voor batterijen	78
<b>6. Hoe werkt een batterij?</b>	<b>83</b>
Een soort boekenkast	86
Onderdelen	87
Anode	88
Kathode	88
Elektrolyt	89
Separator	89
Ionen en elektronen	89
Tijdens het ontladen (gebruik)	91
Tijdens het opladen	92
Energiedichtheid	93
Temperatuur	93
Zelfontlading	94
<b>7. Cellen en modules</b>	<b>97</b>
Cellen	99
Modules	101
Pakket	103
Batterijmanagementsysteem (BMS)	104
State-of-Charge	105

State-of-Health	107
Koelsysteem	109
Skateboard	110
<b>8. Chemische samenstellingen</b>	<b>113</b>
NMC (kathode)	116
NCA (kathode)	117
Silicium (anode)	118
Lithiummetaal, hard carbon, nanotubes (anode)	120
LFP (kathode)	121
LMFP (kathode)	122
Natrium (elektrolyt)	123
Zwavel (kathode)	124
Solidstate (elektrolyt)	126
Lithiumlucht (kathode)	128
Flowcel (elektrolyt)	130
<b>9. Veiligheidsrisico's</b>	<b>133</b>
Veiligheidsmaatregelen op cel- en pakketniveau	138
Veiligheidssysteem van EV's	140
Toekomstige ontwikkelingen	142
Regelgeving	143
Brand	144
<b>10. Levensduur</b>	<b>149</b>
Wat is van invloed?	151
Cycli	151
Hoe cyclische degradatie ontstaat	152
De factor tijd	153
Energiebeheer	154
Chemische samenstellingen	154
Temperatuur	155
Batterijmanagement	156
Koelsysteem	156
Niet volledig ont- en volladen	157
Levensduur in de praktijk	158
Garantie	159
Bi-directioneel laden	160

<b>11. Circulariteit en recycling</b>	<b>163</b>
Circulariteit	165
Wetgeving	167
Batterijen in elektrische voertuigen	169
Tweede leven	170
Grondstoffen zijn terug te winnen	172
Werkwijze recycling	172
Black mass	173
Pyrometallurgie	173
Hydrometallurgie	175
Lithium, mangaan en grafiet	177
Uitdagingen	178
<b>12. Toekomst</b>	<b>181</b>
Wachten op de superbatterij?	183
Toekomstige batterijen	185
Ontwikkelingen thuisbatterijen	187
Ontwikkelingen elektrische auto's	188
Slim laden en V2H/V2G	189
Opslag op industriële schaal	191
AI en machine learning	192
Andere opslagvormen	194

<b>Index</b>	<b>196</b>
--------------	------------

# Voorwoord

**E**lektrisch rijden, thuiswerken op de laptop, draadloos stofzuigen of de weg zoeken op je mobiel: batterijen zijn onmisbaar in ons dagelijks leven. We gebruiken ze voor talloze zaken en hun rol wordt steeds groter. Veel mobiele apparaten zouden zonder lithiumbatterijen niet in hun huidige vorm kunnen bestaan. Maar de kwaliteit en gezondheid van een batterij is belangrijk voor goede prestaties en een lange levensduur van een apparaat. Het succes van elektrische auto's staat en valt met de eigenschappen van het batterijpakket. Voor een energiesysteem gebaseerd op zonne- en windenergie wordt opslag een cruciale factor in de energietransitie. Batterijen zijn onmisbaar voor een duurzame toekomst.

Toch is er weinig kennis over batterijen. Wie weet wat een Leidse Fles is, wat Alessandro Volta precies uitvond in 1800, wat het verschil is tussen een nikkel-cadmium en een lithiumion batterij, welke grondstoffen je nodig hebt, of wat het voordeel kan zijn van een solidstate batterij? En wat mij persoonlijk natuurlijk altijd interesseert: hoelang gaan ze mee, hoe zit het met de grondstoffen en kun je van oude batterijen weer nieuwe maken? Sinds het begin van deze eeuw is de ontwikkeling van batterijen in een stroomversnelling geraakt en zijn ze een soort heilige graal in de energietransitie geworden.

Stel je dit eens voor: elektrische auto's met een actieradius van duizend kilometer op één batterijlading, laadtijden van een kwartiertje, 's nachts een wasje draaien met energie uit de auto en 's ochtends weer met een volle batterij op pad. En een Europese laadinfrastructuur die zo dekkend is, dat je probleemloos met je elektrische auto van de Poolgrens tot Portugal rijdt. Of elektrische vrachtwagens die volledig emissieloos door heel Europa rijden en binnenvaartschepen die stil en zonder uitstoot door de grote rivieren glijden.

Het is niet allemaal ver weg in de toekomst. Met Vehicle-to-Home (V2H) en Vehicle-to-Grid (V2G) technologie en ‘slim laden’ kunnen we het opslagpotentieel veel beter benutten en kunnen elektrische voertuigen zelfs een oplossing bieden voor het overvolle stroomnet (netcongestie). Rond 2030 willen we in heel Europa langs snelwegen iedere zestig kilometer voldoende laadmogelijkheden voor elektrische vrachtwagens. De AFIR5 (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) is een Europese richtlijn die daarvoor moet gaan zorgen.

We hebben belangrijke doelen gesteld om onze leefomgeving veilig, schoon en mooi te houden voor de generaties na ons. Om een toekomst te bouwen waarin we geen onnodige broeikasgassen produceren en onze lucht en leefomgeving schoon houden, laten we oude (fossiele) patronen los, en omarmen we nieuwe mogelijkheden. En ik zie veel kansen: er wordt volop geëxperimenteerd en geïnnoveerd en de batterij van de toekomst zal nog veel meer kunnen dan de beste batterij van dit moment. Daar ben ik van overtuigd.

Maar daar is wel meer kennis voor nodig. Kennis over grondstoffen, circulariteit, elektrisch vervoer, het stroomnet en milieu is cruciaal voor onze toekomst. En daarom ben ik heel blij met dit batterijboek. Het vergroten van de basiskennis rondom batterijen helpt ons bij het vinden van nieuwe oplossingen voor maatschappelijke vraagstukken, het maakt het debat inhoudelijker en helpt ons betere (politieke) besluiten te nemen.

Meer basiskennis kan aankomende studenten inspireren. En die hebben we hard nodig voor de energietransitie. Van het ontwikkelen van nieuwe type batterijen en het installeren van thuisbatterijen tot het repareren om ze een nog langer leven te geven. Want ook Nederlandse bedrijven zijn bezig met ‘de batterij van de toekomst’. Een volgende generatie batterij die wel eens een cruciale rol kan gaan spelen in de Nederlandse, Europese en mondiale toekomst en overal in de samenleving te vinden is.

Veel inspiratie bij het lezen van dit boeiende batterijboek!

*Vivianne Heijnen*

- Staatssecretaris Infrastructuur en Waterstaat

HOOFDSTUK 1.

# Inleiding





**I**n het hart van onze continu verbonden wereld klopt een stil maar krachtig mechanisme: de batterij. We hebben allemaal een batterij in onze broekzak, om onze pols en in menig consumentenproduct, maar weten er eigenlijk maar weinig van.

Batterijen worden steeds beter door nieuwe uitvindingen. Het begon met gestapelde cellen in de 18e eeuw en ontwikkelde zich tot de geavanceerde lithiumionbatterijen die vandaag de dag ons mobiele bestaan voeden. Nog niet zo lang geleden waren mobiele elektrische apparaten enorm lomp en beperkt in capaciteit, denk bijvoorbeeld aan de eerste generatie ‘portable laptops’ uit de jaren tachtig en negentig. Tegenwoordig zijn ze compact, licht en oplaadbaar. Vooral de lithiumionbatterij, met zijn veel hogere energiedichtheid, heeft een revolutie teweeggebracht in de mogelijkheden van draagbare elektronica. Zonder deze technologie zouden smartphones, laptops, tablets, smartwatches, drones en elektrische voertuigen niet bestaan.

Momenteel zitten we in een transitie van een fossiele naar een circulaire economie. Dit wordt ook wel de energietransitie genoemd. Naast bijvoorbeeld zonnepanelen en windmolens spelen batterijen hierin ook een belangrijke rol. Batterijen maken het mogelijk om overtollige energie op te slaan voor gebruik op momenten dat de zon niet schijnt of de wind niet waait, wat helpt bij het afbouwen van onze afhankelijkheid van fossiele brandstoffen. Batterijen zullen samen met andere opslagmethoden, zoals waterstof en warmte, essentieel zijn voor een succesvolle transitie naar duurzamere energiebronnen en minder luchtvervuiling.

De innovatie van batterijen staat nog lang niet stil; ze ontwikkelen zich voortdurend verder. Toekomstige batterijen kunnen meer energie bevatten, zijn

lichter en kosten minder. Als die trend zich doorzet zouden toekomstige batterijen de weg kunnen vrijmaken voor een nog grotere paradigmaverschuiving<sup>1</sup>. Denk aan vliegtuigen op batterijen<sup>2</sup> die zonder schadelijke emissies de halve wereld rondreizen of energieopslagsystemen die hele steden van stroom voorzien in een klimaatneutrale samenleving.

## De veranderende rol van batterijen

Batterijen spelen al ruim honderd jaar een belangrijke rol in het opslaan en verspreiden van energie. Deze rol wordt alleen maar groter nu we midden in de energietransitie zitten. Al in de vorige eeuw werden batterijen gebruikt voor telegrafie- en telefoniesystemen. Later in de twintigste eeuw begonnen energiebedrijven al batterijen te gebruiken als energiebuffers voor het stroomnet. Dit waren de eerste stappen naar een 'smart grid'. Dit is een systeem waarbij de opwekking en het verbruik van energie flexibeler kan worden geregeld.

Met de komst van nieuwe batterijtechnologieën, zoals Nikkel-Cadmium (NiCd) en Nikkel-Metaalhydride (NiMH), werden batterijen steeds meer een onderdeel van ons dagelijks leven. Ze werden gebruikt in draagbare apparaten zoals zaklampen en draadloze telefoons, maar ook in de eerste draagbare computers. Later werden ze ook gebruikt in complexere systemen. Denk aan noodstroomsystemen voor gebouwen en computernetwerken en natuurlijk elektrische voertuigen.

Sinds de ontwikkeling van de lithiumiontechnologie in de late 20e en vroege 21e eeuw is het gebruik van batterijen sterk toegenomen. Dankzij deze technologie zijn de capaciteit en efficiëntie van batterijen enorm verbeterd. Dit heeft nieuwe kansen gecreëerd voor de opslag en verspreiding van energie, vooral met het oog op de wereldwijde overgang naar hernieuwbare energiebronnen.

---

1 Een grote verandering (met beduidend minder vervuiling)

2 Momenteel bestaan er alleen kleine vliegtuigen op batterijen. In de komende jaren worden er passagiersvliegtuigen verwacht die 500 tot 800 kilometers kunnen overbruggen met tientallen tot honderd passagiers. Binnen Europa zal dat tot meer duurzame luchtvaart leiden, maar intercontinentale vluchten lijken met de nu bekende batterijtechnologie niet haalbaar. Energiedragers als waterstof of synthetische brandstof lijken daarvoor meer voor de hand te liggen.

Elektrische auto's waren vroeger beperkt tot kleine voertuigen met een beperkte actieradius, maar tegenwoordig kunnen ze concurreren met traditionele benzine- of dieselauto's. Tegelijkertijd worden batterijen nu ook gebruikt voor volledig nieuwe producten zoals drones, medische apparatuur en thuisbatterijen.

Projecten zoals de Hornsdale Power Reserve<sup>3</sup>, met 150 MW aan batterijopslag, in Australië hebben aangetoond dat lithiumionbatterijen op grote schaal kunnen worden ingezet om de stabiliteit van het elektriciteitsnet te verbeteren en om hernieuwbare energiebronnen beter te integreren. Het wordt steeds gebruikelijker, en in de toekomst zelfs verplicht, om batterijen te gebruiken bij zonnevelden en windmolenparken. Hierdoor gaat er minder duurzaam opgewekte energie verloren.

Samen met andere technologieën, zoals waterstof, zorgt dit ervoor dat we energie kunnen opslaan als de zon schijnt of de wind waait, en deze later kunnen gebruiken als dat niet het geval is. Batterijen zijn het meest efficiënt voor de opslag op korte termijn, terwijl waterstof bijvoorbeeld kan worden gebruikt voor de opslag op lange termijn.

De geschiedenis laat ons zien dat batterijen sinds hun uitvinding een belangrijke rol hebben gespeeld in ons energiesysteem. En deze rol zal in de toekomst alleen maar groter worden.

## De energietransitie

In de strijd tegen klimaatverandering is het bereiken van een CO<sub>2</sub>-neutrale toekomst in 2050 een van de belangrijkste doelen. Om verdere opwarming van de aarde door de mens te voorkomen. Daarbij is de uitstoot door het massaal verbranden van fossiele brandstoffen ook een belangrijke bron van luchtverontreiniging, die verantwoordelijk is voor talrijke gezondheidsproblemen, van ademhalingsproblemen tot hartziekten. Door over te stappen op batterij-aangedreven transport (en eventueel andere duurzame energiedragers als waterstof en brandstofcellen) verminderen we de uitstoot van schadelijke

---

3 <https://hornsdalepowerreserve.com.au/>

stoffen zoals stikstofoxiden en fijnstof, wat leidt tot schonere lucht en een betere volksgezondheid.

Bovendien, fossiele brandstoffen hebben een beperkte beschikbaarheid. Het aantal nieuwe oliebronnen dat wereldwijd ontdekt wordt daalt al jaren en is eindig – met het huidige verbruik tempo zal olie over vijftig jaar schaars zijn (en dan moeten we dus alsnog overstappen op andere bronnen). De winning en verwerking ervan veroorzaken milieuschade, waaronder landschapsverstoren en lucht- en watervervuiling.

Uiteraard vereist de productie van batterijen ook grondstoffen, zoals lithium en kobalt, en we moeten ons ervan bewust zijn dat dit ook een impact op het milieu heeft, evenals op de leefomgeving van mensen en dieren. Maar het grote plaatje is belangrijk: zelfs met meer mijnen voor dergelijke grondstoffen zal het totale grondstoffengebruik flink afnemen in een duurzame in plaats van de huidige fossiele economie. Bovendien zijn er veel initiatieven en technologische ontwikkelingen om batterijen duurzamer te maken, zoals batterijen zonder nikkel en kobalt en de recycling van batterijen – dit vermindert de afhankelijkheid van mijnbouw en draagt bij aan een meer circulaire economie. Zie ook de hoofdstukken over milieu en grondstoffen.

Batterijen, in allerlei soorten en maten en een groot aantal verschillende chemische samenstellingen, gaan ook een steeds grotere rol spelen in het opvangen van fluctuaties in hernieuwbare energieproductie. Bijvoorbeeld om overvloedige wind- en zonne-energie op te slaan voor gebruik tijdens piekuren en om het overvolle elektriciteitsnet te stabiliseren. De hoge laad- en oplaadsnelheid zijn hierbij belangrijke parameters, want in tegenstelling tot een kolen- of kerncentrale, kunnen batterijen direct bijschakelen of gepauzeerd worden. Ook flowcelbatterijen lijken veelbelovend op dit vlak omdat ze relatief goedkoop en zeer schaalbaar zijn, geen kritische grondstoffen nodig hebben en een enorm lange levensduur hebben. Zie het hoofdstuk over chemische samenstellingen.

## **Klimaatakkoord**

Het Nederlandse Klimaatakkoord van 2019 ging indirect ook over batterijen. Die spelen immers een grote rol op het gebied van energieopslag, maar ook

voor vermindering van emissies door fossiele brandstoffen en de doelstellingen rondom elektrische mobiliteit.

Een belangrijk aspect van het Klimaatakkoord is de stimulering van grootschalige energieopslag. Door de fluctuerende aard van hernieuwbare energiebronnen zoals zonne- en windenergie, die op het ene moment meer opleveren dan het andere, is energieopslag noodzakelijk om een betrouwbare energievoorziening te waarborgen. Batterijen zijn hierbij van belang. Ze kunnen thuis, in de buurt of centraal overtollige energie opslaan wanneer de productie hoog is en leveren energie wanneer de vraag groot is, waardoor de betrouwbaarheid en efficiëntie van het elektriciteitsnet verbeteren.

In het kader van de vermindering van emissies spelen batterijen een tweeledige rol. Ten eerste maken ze de integratie van meer hernieuwbare energiebronnen in het energienet mogelijk, wat leidt tot een lagere afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en dus minder CO<sub>2</sub>-uitstoot. Ten tweede stimuleren batterijen de adoptie van elektrische voertuigen door de energiedichtheid en het bereik van deze voertuigen te verbeteren. Niet alleen auto's, maar ook zware vormen van transport, van bussen tot vrachtwagens en meer. Dit draagt bij aan de vermindering van uitstoot in de transportsector, een van de grootste bronnen van broeikasgassen.

De doelstellingen rondom e-mobiliteit in het Klimaatakkoord zijn ambitieus. Een belangrijk doel is het vergroten van het aantal elektrische auto's op de weg. Het streven is om in 2030 ongeveer 1,9 miljoen volledig elektrische personenauto's in Nederland te hebben. Ook werd afgesproken dat vanaf dat jaar alle nieuw verkochte auto's emissieloos moeten zijn, dus moeten werken op batterijen of waterstof. Vanaf 2035 geldt dat voor de hele EU. Om de groei van elektrische auto's te ondersteunen, is er een sterke focus op het uitbreiden van de laadinfrastructuur. Tegen 2030 moeten voldoende laadpunten zijn om aan de vraag te voldoen, dus inclusief alle elektrische auto's die er nog bijkomen. Dit omvat zowel openbare laadpalen als privéladingspunten op eigen terrein. Ook worden er miljarden uitgetrokken om het net te verzwaren. Bedrijven worden gestimuleerd om voor bestelbussen en vrachtwagens ook over te stappen op emissieloze varianten, onder andere met fiscale stimulans en milieuzones vanaf 2025. Dit alles moet de uitstoot van de transportsector flink verminderen.

De verwachting is dat de toename van elektrische voertuigen een exponentiële vraag naar batterijen zal creëren. Dit vereist niet alleen verbeteringen in batterijtechnologieën voor een hogere capaciteit en snellere laadtijden, maar ook een focus op de duurzaamheid van batterijproductie, recycling en grondstoffen. De afspraken van 2019 zijn essentieel voor een toekomstige circulaire economie, maar ook voor het behalen van de lange termijn klimaatdoelstellingen wereldwijd.

## Europees beleid

De Europese Unie (EU) heeft ambitieuze doelstellingen gesteld voor milieu- en energiebeleid, waarvan de Fit-for-55-doelstellingen belangrijk zijn voor de korte termijn. Fit-for-55 moet de netto broeikasgasemissies tegen 2030 met ten minste 55% zijn afgenomen vergeleken met de niveaus van 1990. Deze doelstellingen komen samen in de Europese Klimaatwet en vormen een sleutelonderdeel van de Europese Green Deal. Alle EU-landen moeten daaraan voldoen.

Op het gebied van batterijen en grondstoffen zijn er specifieke wetgevingsinitiatieven en doelstellingen vastgesteld om de milieueffecten te minimaliseren en de duurzaamheid te vergroten. De nieuwe Batterijenverordening, van kracht geworden op 17 augustus 2023, is een belangrijk instrument in deze strategie. Deze verordening heeft als doel de milieu- en sociale impact van alle soorten batterijen te verlagen door de gehele levenscyclus, van ontwerp en productie tot *end-of-life* management. De verordening legt een kader vast voor de inzameling en recycling van batterijen en streeft naar een ‘closed-loop’ economie door te eisen dat een aanzienlijk percentage van de gebruikte materialen wordt gerecycled. Nieuwe batterijen moeten een minimaal niveau van gerecycled materiaal bevatten, wat de afhankelijkheid van geïmporteerde grondstoffen moet verminderen en de impact van mijnbouwactiviteiten kan beperken.

Een ander belangrijk aspect van de EU-Batterijenverordening is de introductie van een ‘batterijpaspoort’ voor alle in de EU verkochte batterijen (en producten waar deze in zitten). Dit digitaal paspoort zal gedetailleerde informatie bevatten over de herkomst van de materialen, de ecologische voetafdruk en de recyclebaarheid van de batterij, wat transparantie voor consumenten en recyclingbedrijven moet vergroten. Daarnaast worden in de Batterijenver-

ordening prestatie- en duurzaamheidsnormen opgesteld voor batterijen, waarbij fabrikanten worden verplicht om aan bepaalde energie-efficiëntie en duurzaamheidscriteria te voldoen. Dit is bedoeld om de levensduur van batterijen te verlengen, de efficiëntie van het gebruik van hulpbronnen te verbeteren, en uiteindelijk de uitstoot van broeikasgassen door de batterijsector te verminderen.

In het verlengde van deze regelgeving ondersteunt de EU de ontwikkeling van nieuwe technologieën en de bouw van batterijproductiefaciliteiten binnen de EU-grenzen om strategische autonomie op het gebied van energieopslag te waarborgen. Investerings in onderzoek naar en ontwikkeling van geavanceerde batterijtechnologieën zoals *solidstate* batterijen worden gezien als essentieel om de Europese competitiviteit te behouden en de afhankelijkheid van import te verminderen.

## Elektrisch vervoer

Een van de grootste ontwikkelingen die we momenteel zien op het vlak van batterijen is de overgang naar elektrisch vervoer, vandaar dat daar in dit boek ook regelmatig aan gerefereerd wordt. De transportsector is een van de grootste bijdragers aan de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot. Maar liefst 60% van ons gebruik van olie is toe te schrijven aan de transportsector<sup>4</sup>. Batterij-elektrische voertuigen (BEV/EV's) bieden een weg naar een lagere CO<sub>2</sub>-voetafdruk, omdat ze geen directe uitstoot produceren. De overstap naar EV's, in combinatie met een toename van hernieuwbare energiebronnen voor elektriciteitsopwekking, kan de impact van transport op klimaatverandering aanzienlijk verminderen.

De transitie naar duurzamer transport is niet alleen belangrijk vanwege de CO<sub>2</sub>-uitstoot en betere luchtkwaliteit, maar ook omdat het algehele energieverbruik hierdoor daalt. Batterij-elektrische voertuigen zijn veel efficiënter in het omzetten van energie naar beweging dan voertuigen met een verbrandingsmotor. Waar een traditionele auto slechts ongeveer 18 tot 25% van de energie uit brandstof omzet in beweging (en de rest voornamelijk in warmte),

---

4 Volgens het International Energy Agency (IEA) was dat in 2019 ongeveer 57% en dit aandeel daalt tot op heden niet of nauwelijks doordat het grootste deel van het wegverkeer, de scheepvaart en vliegtuigen nog steeds fossiele brandstoffen gebruikt.

kan een EV meer dan 70% van de elektrische energie omzetten in kinetische energie – een factor drie verschil.

Het is dan ook niet gek dat momenteel een derde van alle nieuwe auto's in Nederland 100% elektrisch is (en met plug-ins en hybrides meegerekend zelfs twee derde, waardoor niet-geëlektrificeerde auto's nu een minderheid vormen). In Nederland reden er op het moment van schrijven<sup>5</sup> een half miljoen EV's rond. En deze trend is niet alleen in Nederland zichtbaar, maar doet zich wereldwijd voor. Mondiaal is meer dan 14% van alle nieuwe auto's wereldwijd batterij-elektrisch, waarbij Europa, China en de VS voorop lopen. Maar ook in niet-Westerse of minder ontwikkelde landen is een sterke groei te zien van elektrisch vervoer, waaronder in India, Vietnam, Thailand, Costa Rica, Indonesië, Nepal en Afrikaanse landen.

En het gaat zeker niet alleen om personenwagens en elektrische motoren. Er is ook een flinke opmars van elektrische bussen, vooral in steden. Zo is de hele busvloot van Shenzhen (China) volledig elektrisch. Alleen al in die stad rijden 16.000 elektrische bussen rond en ook in andere Chinese steden als Beijing en Shanghai gaat het om enorme aantallen. Maar ook in Nederlandse en veel Europese steden zijn elektrische bussen al een normaal verschijnsel in het straatbeeld. Amsterdam, Kopenhagen en Parijs streven ernaar om in 2025 alleen nog maar elektrische bussen te hebben en steden als Los Angeles, New York en Berlijn willen dat in 2030 bereiken. Ook in steden in minder ontwikkelde landen zien we steeds meer elektrische bussen, waaronder in Santiago (Chili), Delhi en Bangalore (India), Marrakesh (Marokko) en Kaapstad (Zuid-Afrika). De elektrificatie in het openbaar vervoer helpt om stedelijke luchtvervuiling te verminderen en bij te dragen aan het behalen van klimaatdoelstellingen.

Lang werd gedacht dat elektrificatie vooral zin had voor kleine stadsautootjes die niet ver hoefden te rijden. Voor bussen en vrachtwagens was de gedachte dat ze van zichzelf al zwaar zijn en ook nog een zware lading moeten vervoeren, waardoor batterijen niet praktisch zouden zijn. Immers, hoe groter de capaciteit, des te groter de toename in gewicht. Toch rijden er op dit moment al 16.000 kleine elektrische vrachtwagens en busjes in Nederland rond (<3,5 ton) en 1000 zware vrachtwagens (>3,5 ton). Een vrachtwagen kan inclusief vracht 40 ton wegen, dus het eigen gewicht plus dat van een batterij is in het

---

5 Februari 2024.



grote geheel nog wel te overzien. Volgens onderzoek<sup>6</sup> rijdt 80% van de vrachtwagens maximaal 750 km per dag en dat bereik is haalbaar met moderne batterijen (bovendien mogen waterstof- en batterij-elektrische vrachtwagens twee ton meer wegen volgens nieuwe EU-wetgeving).

De infrastructuur voor vrachtwagens voor internationaal transport is nog wel een aandachtspunt. De AFIR<sup>7</sup> (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) moet dat laatste in goede banen leiden. Dit is een Europese richtlijn die in de EU-landen moet zorgen voor een dekkende laadinfrastructuur. Zo moet er rond 2030 langs snelwegen iedere 60 kilometer voldoende laadvermogen zijn voor elektrische vrachtwagens.

Een recent rapport<sup>8</sup> van de RVO (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland) stelt dat Nederland een leidende rol speelt op het gebied van elektrische voertuigen en dat deze rol steeds meer bijdraagt aan onze economische positie. We gebruiken de kennis en ervaring die we hebben opgedaan in nieuwe markten, zoals aan elektrische mobiele werktuigen en batterijtechnologie. Hierdoor draagt de sector van elektrisch vervoer (EV) steeds meer bij aan een sterke economie in Nederland.

Tussen 2019 en 2021 is de werkgelegenheid in deze sector met 77% gegroeid naar 3,6 miljard euro. Ook de directe werkgelegenheid is gegroeid: met 56% tot 30.210 voltijdequivalenten (VTE). Ongeveer 17% van de totale werkgelegenheid komt van bedrijven die volledig gericht zijn op EV. Dit zijn bijvoorbeeld bedrijven die laadpalen plaatsen en beheren (Charge Point Operators, CPO's) en bedrijven die elektrische voertuigen bouwen of ombouwen. Nederland is in Europa de koploper in het gebruik en de ombouw van deze mobiele werktuigen. Dit komt mede door de stikstofcrisis.

Maar liefst 83% van de werkgelegenheid komt van bestaande bedrijfstakken die een steeds groter deel van hun inkomsten uit de EV-sector halen. Voorbeelden hiervan zijn de autobranche en de installatiebranche. Al deze ontwikkelingen stimuleren ook de batterijsector in Nederland.

---

6 Auke Hoekstra, TU Eindhoven.

Video: [https://www.youtube.com/watch?v=aBi1abd\\_1ZA](https://www.youtube.com/watch?v=aBi1abd_1ZA)  
[https://elaad.nl/wp-content/uploads/downloads/Auke\\_Hoekstra\\_-\\_Electric\\_trucks\\_economically\\_and\\_environmentally\\_desirable\\_but\\_misunderstood.pdf](https://elaad.nl/wp-content/uploads/downloads/Auke_Hoekstra_-_Electric_trucks_economically_and_environmentally_desirable_but_misunderstood.pdf)

7 AFIR: <https://www.rvo.nl/nieuws/nieuwe-europese-wetgeving-stelt-eisen-aan-nederlandse-laadinfrastructuur>

8 Economische betekenis sector elektrisch vervoer Nederland 2020-2022 (2024)  
<https://open.overheid.nl/documenten/dpc-bdbf16803038f089100c4499ed9e26ccd-c70d0df/pdf>

Volgens het rapport liggen er grote kansen voor Nederland. Zo kunnen we bijvoorbeeld halffabrikaten produceren en batterijen recycleren. Dit komt doordat deze industrie nog relatief jong is. Ook op het gebied van onderzoek, software voor batterijmanagementsystemen (BMS) en innovaties liggen er kansen. Het Nationaal Groeifonds<sup>9</sup> speelt in op de groeipotentie binnen markten zoals batterijtechnologie of elektrische binnenvaartschepen.

## Scheepvaart

De elektrificatie van de scheepvaart zit nog in een relatief vroege fase, maar groeit eveneens. In relatieve zin is de scheepvaart efficiënter dan verkeer over land en door de lucht, maar het probleem is dat schepen voornamelijk op diesel varen en in internationale wateren soms ook op nog vervuilende bunkerolie, wat leidt tot veel zwaveluitstoot, fijnstof en CO<sub>2</sub>. De International Maritime Organization heeft als doel gesteld dat de internationale scheepvaart in 2050 de helft minder CO<sub>2</sub> moet uitstoten, maar ook in Europa en Nederland worden de milieueisen steeds strenger om de luchtkwaliteit te verbeteren en klimaatdoelen te halen.

In Nederland is een belangrijke stap gezet met de oprichting van Zero Emission Services<sup>10</sup> (ZES) in 2021. Dat is een samenwerkingsverband van Engie, ING, Wärtsilä en het Havenbedrijf Rotterdam. ZES introduceerde een innovatief concept van verwisselbare energiecontainers met batterijen voor de aandrijving van binnenvaartschepen. Doordat de containers snel te vervangen zijn, hoeft er niet noodzakelijkerwijs te worden geladen in havens. Het eerste schip dat gebruikmaakt van het ZES-systeem, de *Alphenaar*, begon in 2021 met varen. Een ander voorbeeld is het Green Shipping Waddenzee-programma, waarbij SRF Shipbuilding werkt aan de ombouw van het charterschip ‘de Tjalk’. De traditionele dieselgenerator wordt vervangen door een elektromotor die wordt opgeladen via walstroom. En sinds enkele jaren varen er in Amsterdam elektrische ponten die hiermee tijdens hun vaarten geen emissies produceren – ook zij worden opgeladen via walstroom.

---

<sup>9</sup> <https://www.nationaalgroefonds.nl/>

<sup>10</sup> <https://zeroemissionservices.nl/>

Voor schepen die langere afstanden afleggen, zoals binnenvaartschepen of containerschepen, zijn hybride systemen momenteel de trend. Deze systemen combineren traditionele verbrandingsmotoren met batterijen, wat zorgt voor een reductie in brandstofverbruik en emissies. Deze hybride aanpak is een tussenstap op weg naar volledige elektrificatie, waarbij de actieradius en capaciteit van batterijen geleidelijk worden verbeterd. Voor de internationale zeevaart, bijvoorbeeld van China naar Europa, blijft volledige elektrificatie een uitdaging. Desondanks zijn er wereldwijd momenteel ongeveer 600 elektrische en hybride zeeschepen actief, op een totaal van circa 100.000 schepen in de wereldhandelsvloot.

## Luchtvaart

Van alle transportsectoren is de luchtvaartsector het lastigste om te verduurzamen. De energiedichtheid van kerosine is zo hoog, dat geen enkele batterijtechnologie daar in de buurt komt (er is één theoretische uitzondering – zie het hoofdstuk over chemische samenstellingen). Ter vergelijking: kerosine heeft een energiedichtheid van 43MJ/kg (omgerekend circa 12.000 Wh/kg) en lithiumionbatterijen bevatten momenteel gemiddeld iets meer dan 1MJ/kg (280 Wh/kg). Omdat vliegtuigen zo licht mogelijk moeten zijn, is het relatief hoge gewicht van batterijcellen een serieuze beperking. Voor korte afstanden binnen Europa zijn er wel mogelijkheden, maar voor intercontinentale vluchten eigenlijk niet.

Toch zijn er al verschillende elektrische vliegtuigen. De Velis en Alpha Electro van het Sloveense Pipistrel, tegenwoordig onderdeel van Cessna, hebben ruimte voor twee passagiers en kunnen een uur vliegen met een snelheid van 170 km/u – ze in de praktijk worden gebruikt voor pleziervluchten en lestoe-stellen. De Duitse Lillium Jet kan zowel horizontaal als verticaal opstijgen en landen en krijgt een bereik van 300 km. Eviation werkt aan de Alice, een elektrisch vliegtuig voor negen personen met een geschat bereik van 1000 tot 1200 km. De Delftse start-up Venturi is bezig met de ontwikkeling van de Echelon 01. Die biedt ruimte voor 44 passagiers en moet een bereik krijgen van 550 kilometer. Dat zou het toestel geschikt maken voor korte vluchten binnen Europa – dat komt neer op 15% van alle Europese lijnvluchten.

Voor lange internationale vluchten wordt vooral gekeken naar *Sustainable Aviation Fuels* (SAF). Deze brandstoffen worden geproduceerd uit hernieuwbare bronnen zoals plantaardige oliën, afvalstoffen en algen en kunnen zonder grote aanpassingen voor bestaande vliegtuigmotoren worden gebruikt. Dit maakt SAF een aantrekkelijke optie voor luchtvaartmaatschappijen om hun milieu-impact te verlagen.

Voor korte en middellange vluchten lijkt waterstof veelbelovend. Maar het gebruik van waterstof als brandstof vereist serieuze aanpassingen aan de ontwerpen van vliegtuigen en wordt geconfronteerd met technische uitdagingen, zoals de opslag en distributie van waterstof op luchthavens. Want waterstof wordt in cilinders opgeslagen en die nemen meer ruimte in beslag. De commerciële uitrol van alternatieve brandstoffen als SAF en waterstof wordt verder belemmerd door de belastingvoordelen van kerosine. Want de productieprijzen van alternatieve brandstoffen is hoger terwijl de prijs van kerosine dankzij fossiele subsidies kunstmatig laag gehouden wordt. Daardoor is het heel lastig om te concurreren.

## De rijdende batterij (V2X)

Elektrische voertuigen (EV's) worden niet alleen als transportmiddel steeds belangrijker, maar ze krijgen ook een nieuwe rol als energiebron binnen het bredere energiesysteem. Zij hebben immers een batterij met een flinke opslagcapaciteit die voor meer gebruikt kan worden dan het aandrijven van de wielen. Bijvoorbeeld door als een soort buurt- of thuisbatterij te functioneren.

Technologieën zoals *Vehicle-to-Grid* (V2G) en *Vehicle-to-Home* (V2H) maken van EV's mobiele energieopslagsystemen die stroom kunnen terugleveren aan het elektriciteitsnet of direct aan huishoudens. Dit heet bi-directioneel laden (V2X<sup>11</sup>) en dat heeft meerdere voordelen. Ten eerste kan V2G helpen om piekbelastingen op het net te verminderen. Tijdens periodes van hoge piekbelasting in het net kunnen EV's lokaal energie terugleveren, wat resul-

---

11 V2X is de verzamelnaam voor voertuigen die bi-directioneel kunnen laden en dus ook terugleveren. De X kan voor verschillende dingen staan, zoals Home, Grid en Load.

teert in een stabiel net. Met deze vorm van flexibiliteit wordt overbelasting op het net (netcongestie) voorkomen.

Ten tweede kan V2G bijdragen aan de balans tussen vraag en aanbod op de energiemarkt. EV's kunnen stroom opslaan op momenten dat het aanbod van hernieuwbare energiebronnen, zoals zon en wind, hoog is en de prijs laag. Deze energie kan vervolgens worden teruggeleverd wanneer de vraag hoog is en de energieprijzen stijgen, wat economische voordelen oplevert voor de EV-eigenaren die deelnemen aan V2G-programma's. Hierdoor wordt minder beroep gedaan op conventionele energiecentrales, wat resulteert in een vermindering van de behoefte aan fossiele brandstoffen.

V2H maakt het mogelijk dat de energie die in de batterij van een EV is opgeslagen, gebruikt kan worden voor het voeden van huishoudelijke apparaten. Dit kan bijzonder handig zijn tijdens stroomuitval of in gebieden waar de elektriciteitsvoorziening instabiel is. V2H kan ook financiële voordelen bieden door het mogelijk te maken om energie te verbruiken tijdens daluren (wanneer het goedkoper is) en het te gebruiken tijdens piekuren.

Op dit moment zijn er helaas nog maar weinig EV's die hier ondersteuning voor bieden. Maar er is nog een andere technologie die wel breed beschikbaar is: slim laden. Daarmee kan het moment van opladen, plus de laadsnelheid, worden aangepast aan de situatie op het elektriciteitsnet. Het kan bijvoorbeeld de laadsnelheid verlagen tijdens piekuren om overbelasting van het net te voorkomen, of juist verhogen wanneer er veel aanbod van zonne- of windenergie is. Een concreet voorbeeld is de situatie dat veel mensen rond zes uur 's avonds thuiskomen van hun werk en dan gaan koken, eten en televisie kijken – dit leidt iedere dag tot een piek op het elektriciteitsnet. Als dan ook nog mensen massaal hun auto gaan opladen op het moment dat ze thuiskomen, wordt die piek nog groter. En dat is niet nodig, want gedurende de avond en nacht is er genoeg tijd om weer op te laden. Een simpele oplossing is om de starttijd in de auto in te stellen op bijvoorbeeld 23:00. Maar via slim laden werkt dit helemaal automatisch – je geeft simpelweg aan wanneer de auto vol moet zijn en vervolgens wordt via een app of de laadpaal op de gunstigste momenten opgeladen zonder het net onnodig te belasten.

## Veiligheid

Het steeds groter gebruik van batterijen in het dagelijks leven brengt ook risico's met zich mee, zoals het gevaar van brand. Brand kan ontstaan door 'thermal runaway', een kettingreactie waarbij hoge temperaturen ervoor zorgen dat cellen in de batterij beschadigd raken en nog meer hitte produceren, wat kan leiden tot een brand of zelfs een explosie.

De meeste moderne batterijsystemen zijn uitgerust met uitgebreide veiligheidsmechanismen om dit risico te beperken. Beveiliging tegen oververhitting, overladen en kortsluiting zijn standaardvoorzieningen. In het geval dat een batterij tekenen van defecten vertoont, zoals overmatige hitte of zwelling, is het cruciaal om het apparaat uit te schakelen, indien mogelijk veilig te verwijderen en professionele hulp in te schakelen.

Veel problemen met batterijen zijn het gevolg van menselijke fouten of verkeerd gebruik. Voorbeelden hiervan zijn het gebruik van een verkeerde oplader, het blootstellen van batterijen aan extreme temperaturen, of het fysiek beschadigen van batterijen door stoten of doorboren. Deze acties kunnen de interne structuur van een batterij verstoren en leiden tot gevaarlijke situaties.

In het hoofdstuk over Veiligheid zullen we uitgebreid ingaan op de risico's die batterijen met zich meebrengen, de mechanismen die zijn ingebouwd om deze risico's te beheersen, en de stappen die je kunt nemen om veilig te blijven. Gezien de potentieel ernstige gevolgen van batterijproblemen, is het essentieel om te weten hoe we met verschillende soorten batterijen moeten omgaan en hoe brand bestreden kan worden. Zie het hoofdstuk over veiligheid.

## Toekomst

De wereld van moderne batterijcellen is rijk aan chemische diversiteit. Lithiumionbatterijen bestaan eigenlijk uit een verzameling verschillende chemische samenstellingen met uiteenlopende eigenschappen en toepassingen. Bovendien zitten er varianten met nieuwe samenstellingen in de pijplijn die de komende jaren voor een kleine of grote revolutie in verschillende deelgebieden kunnen zorgen.

Zo is er momenteel een sterke groei van lithiumionbatterijen die geen nikkel en kobalt gebruikt en daardoor minder zeldzame en ethisch controversiële grondstoffen nodig hebben. Een voorbeeld daarvan is de lithiumijzerfosfaatbatterij (LFP) die voornamelijk ijzer nodig heeft – een grondstof die we al eeuwen gebruiken, die bijna overvloedig beschikbaar is en zich ook uitstekend laat recyclen. Een andere variant zijn natriumbatterijen. Deze gebruiken geen lithium of zeldzame grondstoffen. Dit ‘zout’ is vrijwel overal ter wereld te vinden en heeft dus ook grote geopolitieke voordelen omdat het ons minder afhankelijk maakt van grondstoffen die vooral buiten Europa gewonnen worden.

Iets vergelijkbaars gaat op voor zwavelbatterijen. Deze kunnen zowel gecombineerd worden met lithium als natrium en ze onderscheiden zich vooral met hun potentieel hogere energiedichtheid in vergelijking met de huidige generatie batterijen. Exact hetzelfde geldt voor het toevoegen van silicium (gemaakt van zand) aan de bestaande lithiumionbatterijen – dit zorgt voor een hogere energiedichtheid en een lagere afhankelijkheid van grafiet dat vooral uit China komt. Maar misschien wel een van de meest veelbelovende ontwikkelingen zijn zogenaamde solidstate-batterijen, die de potentie hebben om de energiedichtheid flink te verhogen en tegelijkertijd veiliger zijn, doordat er geen vloeibare elektrolyt gebruikt wordt (dat brandbaar is), maar een vaste stof. Deze toekomstige generatie batterijen zouden een nieuw tijdperk van energieopslag kunnen inluiden als ze hun beloften waarmaken. In het hoofdstuk over chemische samenstellingen kun je daar meer over lezen.

## **Samenvatting**

In dit hoofdstuk las je in vogelvlucht verschillende onderwerpen die we in de rest van het boek uitgebreider gaan behandelen. Je weet nu dat er van alles gebeurt in de wereld van batterijen en dat de verdere ontwikkeling hiervan essentieel is voor onze toekomst. Denk aan telefoons die langer op een lading meegaan, voertuigen op stroom in plaats van fossiele brandstoffen en de opslag van duurzame energie. Maar ook zaken als recycling, netcongestie en nieuwe technologie die ons leven makkelijker kan maken. Wat ons allemaal nog meer te wachten staat bespreken we in het hoofdstuk 'Toekomst', maar in het volgende hoofdstuk beginnen we bij het begin: de geschiedenis.

De belangrijkste punten in dit hoofdstuk waren:

- De rol van batterijen in ons leven is groter dan we vaak denken
- Er is niet één type batterij, maar er zijn tal van variaties (ook binnen lithiumionbatterijen zelf)
- Er komen steeds meer voertuigen die op stroom (uit batterijen) werken
- De opslag van duurzame energie wordt steeds belangrijker
- Elektrische auto's kunnen via slim laden en Vehicle-to-Grid bijdragen aan de stabilisatie van het elektriciteitsnet
- Batterijen zijn recyclebaar. Als ze 'op' zijn, kunnen de grondstoffen opnieuw worden gebruikt in nieuwe batterijen
- Internationaal en nationaal beleid is belangrijk om duurzamere alternatieven voor fossiele brandstoffen mogelijk te maken
- Er zijn tal van nieuwe batterijen in ontwikkeling die nog langer meegaan, goedkoper zijn om te maken en meer energie kunnen vasthouden



# Index

## A

actieradius 7, 13, 21, 34, 104, 109, 116, 142, 169  
Actieplan Circulaire Economie 52, 166  
AI 6, 143, 192–193, 195  
Akira Yoshino 60  
algen 22, 73–74  
alkalinebatterij 29  
aluminium 4, 59–60, 68, 74–75, 88, 117, 172–174, 176  
ampère 99, 103, 105, 155  
anode 4–5, 37, 45, 59, 66, 86–93, 95–96, 115–116, 118–121, 124, 126, 128, 135, 138, 152–154, 172–173, 176–177, 184–185

## B

BMS (Batterij Management System) 4, 94–95, 99, 104–106, 108–109, 112, 139–141, 143, 156, 158, 169  
batterijcapaciteit 29, 101, 105, 121, 158  
batterijpaspoort 16, 176, 179  
bauxiet 60, 74–75  
beveiligingscircuits 39  
bi-directioneel laden 5, 22, 160–161  
Bolloré Bluecar 127  
BYD 122, 124

## C

cadmium 7, 12, 30, 36–37, 60, 115  
CATL 101, 122, 124, 127  
celbalancering 104–105  
chemische reactie 89, 136  
chemische samenstellingen 5, 14, 21, 25, 47–48, 64, 79–80, 94, 99, 115, 117, 126, 139, 142, 154, 158, 183–185  
cilindrische cellen 99–101  
CO<sub>2</sub> 13, 15, 17, 20, 46, 52–53, 59, 71–76, 78, 81, 144, 166  
consumentenelektronica 29, 78, 157  
corrosiebestendigheid 59  
coulombtelling 105–106  
Critical Raw Materials Act 168  
cryoliet 59

cycli 5, 116, 119, 121, 125, 131, 151, 153–155, 160, 169  
cyclische veroudering 152, 162

## D

degradatie 5, 93, 95, 108, 119, 151–152, 156, 158–159, 162, 169  
Democratische Republiek Congo 45, 53, 62, 65  
Detroit Electric 40  
diepe ontlading 39, 95, 104, 153, 157  
dierlijke elektriciteit 33  
distributieketen 48  
drones 11, 13, 30, 38, 119, 158, 183

## E

e-bikes 30  
Ebusco 139  
elektrische auto's 6–7, 13, 15, 26, 30, 34, 38, 40–41, 46, 49, 66, 71, 76–77, 95, 102, 137, 140–142, 144–145, 157–158, 165, 183, 187, 189–190  
elektrische geleidbaarheid 58–59, 63, 120  
elektrische voertuigen 6, 8, 11–12, 15–17, 22, 29–30, 36, 40–42, 45, 48–49, 60, 63, 73, 76–79, 81, 100–101, 116, 118, 120–122, 124, 128, 135–136, 142, 144, 160, 162, 176, 180, 185–186, 188, 191, 193–194  
elektrode 86–87, 89, 91–92, 139, 154–155  
elektrolyse 59, 78, 175, 194  
elektrolyt 4–5, 25, 33–34, 57, 66, 86–87, 89–90, 92–93, 95–96, 121, 123, 126–129, 132, 139, 142, 145, 147, 153, 187  
elektrostatische generator 32  
energieopslag 14–15, 17, 25, 29, 32, 37, 42, 47, 95, 100, 102, 104, 122, 129, 131–132, 152, 170, 177, 180, 186, 188, 191–195  
energieopslagsystemen 12, 22, 30, 45, 66, 120, 147, 192–193, 195  
end-of-life 16, 169  
energietransitie 3, 7–8, 11–12, 30, 45–46, 48–49, 52, 165, 186, 191, 195  
EU Batterijenverordening 167, 176  
Europese Green Deal 16, 52, 166

Ewald Georg von Kleist 31

## F

fijnstof 14, 20, 73, 76–78

Fit-for-55 16

flowcel 5, 130–132

fosfaat 4, 61, 65, 68, 121, 172, 185

## G

geheugeneffect 36–39

geleidende metalen 57

gerecycled materiaal 16, 58, 79, 167, 172, 178–179

gestapelde cellen 11

geopolitiek 3, 43, 45, 47–48, 53, 65, 119, 122, 186

grafiet 4, 6, 25, 45, 47–49, 63–64, 88, 91–92, 96, 115–116, 118–121, 124, 132, 166, 172–173, 177, 179, 185

gravimetrische dichtheid 39

## H

Hall-Hérout 59

handelsbeperkingen 49

Henry Ford 40

hernieuwbare energiebronnen 12–13, 15, 17, 23, 73, 80–81, 104, 183, 192

hoge ontladingsnelheden 36

hydrometallurgie 6, 173, 175–177, 179–180

## I

ijzer 4, 25, 61, 65, 68, 121, 124, 172–173, 176, 185

import 17, 45, 48, 50, 53, 180

infrastructuur 2, 8, 19, 59, 174, 189, 193

innovaties 29

Ionen 4, 60, 66–67, 86–87, 89–93, 96, 126, 153

## J

Johan August Arfwedson 60

John Goodenough 60

## K

kathode 4–5, 57, 59, 62–63, 65–66, 86–93, 95–96, 115–117, 121–124,

126, 128–129, 135, 138, 152–154, 168, 172–173, 176, 184–185

kerncentrale 14

klimaatakkoord 3, 14–15

klimaatverandering 4, 13, 17, 71, 73, 75, 77, 81

koperfolie 58, 172

kosten per kilowattuur 30

kunstmatige intelligentie 192, 195

## L

laadcapaciteit 58, 63, 185

laadinfrastructuur 7, 15, 19, 188–189

laadpalen 15, 145, 189

laadsnelheid 23, 120, 152, 156, 162

LFP-batterijen 52, 61–62, 65–66, 68, 106, 117–118, 121–122, 132, 147, 154, 185

Leyden Jar / Leidse Fles 3, 7, 29–32, 119

LFP-batterijen 52, 61–62, 65–66, 68, 106, 117–118, 121–122, 132, 147, 154, 185

lithiumijzerfosfaat 47, 62, 65, 79, 94, 116, 139, 195

lithiumzouten 65–67

loodzuurbatterij 3, 29, 34–35, 42

luchtvervuiling 11, 18, 41, 73, 76–77, 81

## M

machine learning 6, 192, 195

medische implantaten 30

megasiemens per meter 58

mijnbouw 14, 46, 50, 52–53, 62, 80, 117, 165–166, 178, 180

milieubelastend 35, 77, 81, 123, 132

mobiele apparaten 7, 135

mobiele gamingconsoles 30

## N

natrium 5, 25, 31, 47, 116, 123–125, 186, 195

NEN1010 145

Nikkel-Cadmium 7, 12, 30, 60

Nikkel-MetaalHydride 12, 30, 36, 60

NMC-batterijen 64–66, 106, 116–118, 121–122, 132, 147, 185–186

Nimby 3, 50

## O

ontlading 32, 39, 95, 104, 124, 131, 152–153, 157–158, 162, 186  
organische oplosmiddelen 66–67  
oververhitting 24, 121, 137–140, 142–143, 147, 162

## P

Pieter van Musschenbroek 31  
powerbanks 30, 100, 158  
preconditioning 109  
pyrometallurgie 6, 173–174, 176, 178–179  
pouch cellen 99, 101, 112

## R

raffinage 62, 73–74, 79  
recycling 3, 6, 14, 16, 50, 52–53, 68, 71, 79, 144, 163, 165–169, 172–175, 178–180  
regeneratief remmen 77, 94, 160  
roestvrij staal 61, 75  
R-Ladder 52

## S

separator 4, 87, 89, 96, 138  
silicium 4–5, 25, 45, 64–65, 68, 88, 96, 116, 118–120, 124–126, 132, 172, 177, 185, 195  
smart grid 12  
smarhome 30  
smartphones 11, 29, 38, 46, 62, 79, 94, 101, 104, 108, 116, 118, 142, 157, 169, 185, 187, 189, 194  
staalproductie 63, 75  
standaardisatie 52, 141, 166, 168, 180  
Stanford Ovshinsky 37  
Stanley Whittingham 60  
Stapel van Volta 29–30, 33  
stationaire opslag 124–125, 170–171, 186  
statische elektriciteit 31  
State-of-Charge 4, 105  
State-of-Health 5, 105–107  
stikstofoxiden 14, 75–76  
stroomsterkte 35, 99, 103, 137, 155  
superlegeringen 62

## T

telecommunicatiesystemen 29  
telegraaf 29, 33  
thermal runaway 24, 124, 135–136, 139,

142, 147  
thermische stabiliteit 63, 65, 117, 124, 139, 142  
Thomas Parker 40  
thuisbatterijen 6, 8, 13, 35, 104, 122, 124, 147, 170, 180, 183, 187–188, 193, 195  
transformatorhuisjes 58  
TU Delft 52, 165, 184

## U

Universiteit Leiden 52, 165  
Universiteit Utrecht 88

## V

vermogensdichtheid 103  
veiligheid 3, 5, 24, 63, 65–68, 95, 102, 116, 121–122, 132–133, 135, 138–143, 145, 147, 183  
verzuring 73  
vliegtuigmotoren 22, 62  
Voltaïsche stapel 33  
volumetrische dichtheid 39

## W

waterstof 11, 13, 15, 19, 22, 37, 76, 78, 191, 194–195  
windenergie 7, 15, 23, 73, 78, 191  
windmolens 11, 50, 71

## Z

zand 25, 64, 119, 177  
zilver 58  
zink 33, 74–75  
zonne-energie 14, 78, 194  
zonnepanelen 11, 48–49, 64, 78, 102, 104, 156, 171, 187–188  
zouten 4, 57, 67, 126, 153  
zoutwaterbatterij 123  
zwavel 5, 31, 116, 124–125, 186  
zwavelbatterijen 25, 124–125, 132, 186, 195  
zwavelzuur 34