

Auteur H.J. (Rik) Altena, adviseur DWA en lid Redactieraad TVVL Magazine

# Lessen uit het verleden voor de energietransitie van nu

*Duurzame technieken die zijn gebaseerd op 'oude' natuurkundige ontdekkingen, zijn nu wel zo'n beetje uitontwikkeld. De kans op een echt vernieuwende techniek die de doelstellingen van de energietransitie in één klap waarmaakt, is dan ook klein. Voorlopig zullen we de ambities van 'morgen' moeten realiseren met de technieken van 'gisteren'. Maar we kunnen wel veel leren van vorige energie-innovaties en energietransities. En lerend van het verleden, moeten we blijven innoveren.*

In 400 jaar tijd heeft de natuurkunde ons veel toepassingen gebracht op het gebied van warmte, machines, motoren, elektriciteit, isolatie, warmtepompen, warmtenetten en waterstof. Die gebruiken we vandaag de dag bij de energieopwekking en in klimaatinstallaties van woningen en gebouwen. In feite werken we aan de toekomst met de technieken van gisteren, die ook nog eens een groot deel van het klimaatprobleem hebben veroorzaakt. Veel meer keus hebben we echter niet. We roeien met de riemen die we hebben.

Vrijwel alle energie- en duurzaamheidstechnieken die we vandaag kennen, hebben hun wortels in een (ver) verleden. De ontdekkingen waarop ze zijn gebaseerd, kwamen niet voort uit een duurzaamheidsambitie, maar uit een zucht naar kennis en de noodzaak om geld te verdienen. De ontdekkingen van de klassieke natuurkundige principes uit de 17<sup>e</sup>, 18<sup>e</sup> en 19<sup>e</sup> eeuw herken je vaak niet in de toepassingen van nu. Want toen Henry Cavendish in 1766 waterstof ontdekte, deed hij dat niet met de zeppelin, de brandstofcel of de waterstofeconomie in gedachten. Op de verschillende tijdlijnen is een groot aantal belangrijke ontdekkingen, uitvindingen en innovaties weergegeven die hebben geleid tot de energietechnieken van nu en de nabije toekomst.

## Warmtepomp ouder dan we denken

De compressiewarmtepomp wordt gezien als een moderne uitvinding en speelt een belangrijke rol in onze huidige energietransitie. De ontwikkeling van de warmtepomp begon al in 1756 toen William Sullen<sup>1</sup> het principe van verdampingskoeling demonstreerde. [1] 100 jaar later ontwierp Peter Ritter von Rittinger de eerste verwarmende warmtepomp met koudemiddelcyclus. Daarna duurde het nog weer zo'n 100 jaar voordat de eerste warmtepompen in woningen en gebouwen terecht kwamen en die duurzaam gingen verwarmen. Compressiekoeling had al wel veel eerder een rol, in toepassingen als airconditioning en in koelkasten.

In de loop der jaren is de warmtepomp verder ontwikkeld en is het rendement steeds hoger geworden. De laatste 10 jaar stijgt het rendement echter minder snel. De techniek lijkt redelijk uitontwikkeld. Toch is er nog verbetering mogelijk. Kleine verbeteringen in rendement komen nu bijvoorbeeld nog van het slim aansturen van de warmtepompcyclus, het inspelen op vraagpatronen en het gelijktijdig produceren van warmtapwater in koelbedrijf. Daardoor steeg het rendement van een specifieke Nederlandse bodemwarmtepomp tussen 2010 en 2021 van een COP van 5,6 naar 5,9.

## Carnot-rendement

Het Carnot-proces of de Carnot-cyclus beschrijft een ideaal thermodynamisch kringproces. Het Carnot-rendement is het theoretisch hoogst haalbare rendement bij een omzetting van arbeid in thermische energie. Het temperatuurverschil tussen het koudemiddel aan de verdamperszijde en aan de condensorszijde bepaalt het rendement bij warmtepompen. Hoe groter het temperatuurverschil van verdampers en condensor, hoe lager het rendement. Hoe kleiner het temperatuurverschil, hoe hoger het rendement. Maar een proces is in de praktijk nooit ideaal. Daardoor zal het rendement van een warmtepomp in de praktijk altijd maximaal zo'n 50 tot 85% van dat theoretische rendement zijn.

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Figuur 1: Formule Carnotrendement.

# “We cannot solve our problems with the same thinking we used when we created them.”

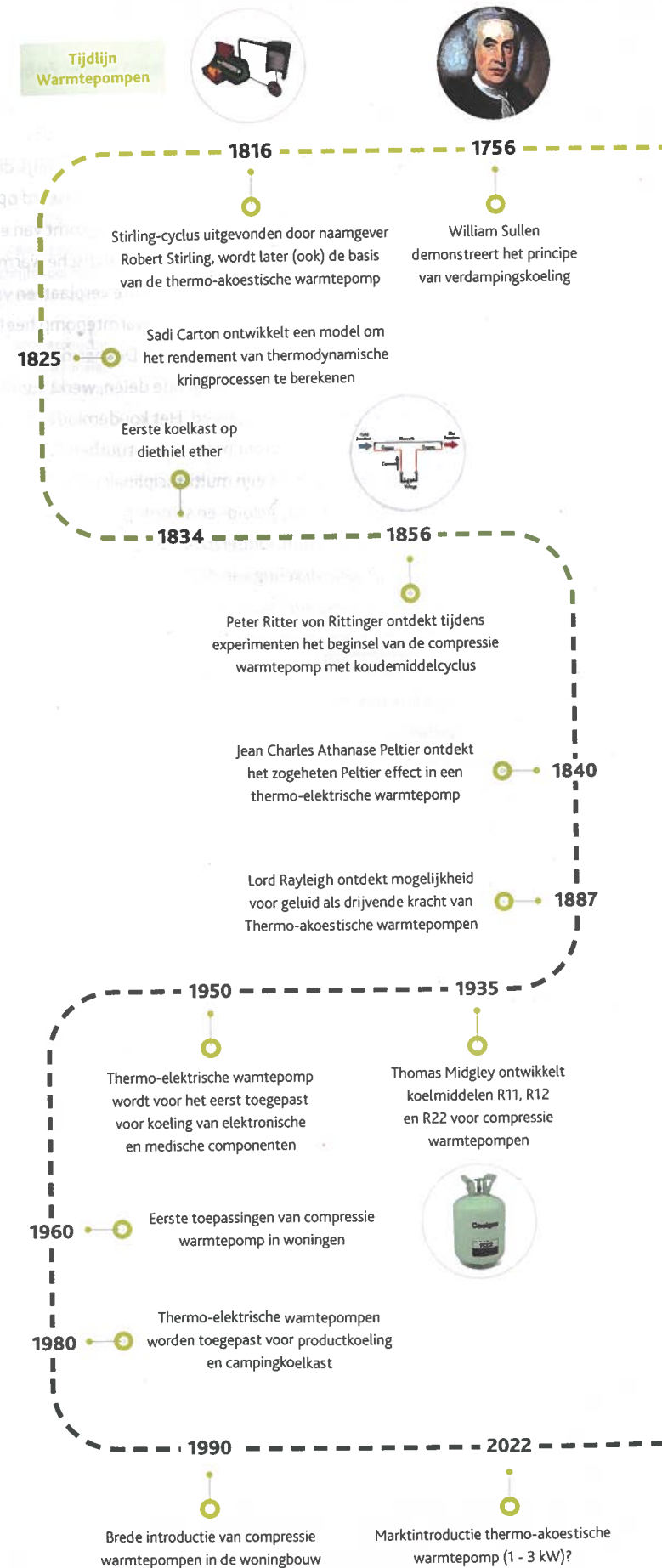
Albert Einstein

De wiskundige Sadi Carnot toonde in 1825 aan dat warmtepompen een maximaal theoretisch rendement hebben. Welke nieuwe warmtepomptechnologie dan ook, een beter rendement (Carnot-rendement) dan Carnot die destijds berekende voor een ideale omzetting, zal die nooit hebben. Dit Carnot rendement is trouwens niet alleen van toepassing op compressiewarmtepompen met een koudemiddelcyclus, maar geldt voor alle omzetting van arbeid in warmte (en andersom). Dit zijn bijvoorbeeld ook de thermo-elektrische warmtepomp (het peltier-element), de thermo-akoestische warmtepomp of de magneto-calorische warmtepomp. In de praktijk zijn er geen ideale omzettingen. Er is altijd verlies. De hedendaagse compressiewarmtepompen met bodembron die voorkomen in klimaatinstallaties behalen daardoor maximaal zo'n 55 a 70% van het Carnot-rendement (zie op pagina 32). Er is dus nog steeds ruimte voor efficiencyverbetering. Het rendement is natuurlijk altijd afhankelijk van de brontemperatuur en de temperatuurstep die overbrugd moet worden.

## Van goeds komt soms ook slechts

Een belangrijke stimulans voor de ontwikkeling van de warmtepomp of koelmachine was de toenemende vraag naar productkoeling vanaf 1800 en de ontdekking van freon (R11, R12, R22) door Thomas Midgley in 1920. Dit leidde ertoe dat na 1940 langzamerhand kleinere, veiligere en energiezuinigere koelkasten hun intrede deden in woningen.

Thomas Midgley is naast innovator van (duurzame) klimaatinstallaties, ook de persoon die indirect verantwoordelijk is voor vervuiling van de atmosfeer. Hij was namelijk degene die de ontwikkeling van loodhoudende benzine op gang bracht, met als gevolg dat er via uitlaatgassen lood in de natuur kwam. Zijn ontdekking van cfc's (freon) leidde tot gaten in de ozonlaag.





Nieuwe soorten warmtepompen

De ontwikkeling van de warmtepomp gaat in kleine stapjes verder. Zo bereidt het bedrijf Coolt de marktintroductie voor van een adsorptiewarmtepomp, aangedreven door aardgas- of waterstofwarmte. Een ander bedrijf doet onderzoek naar de thermo-akoestische warmtepomp, die waarschijnlijk dit jaar op de markt komt. Deze thermo-akoestische warmtepomp is gebaseerd op de techniek van de in 1816 uitgevonden stirlingmotor. Aandrijving komt van een constante geluidsgolf in een heliummedium. De thermo-akoestische warmtepomp kan met 50 à 60% van het Carton-rendement warmte verplaatsen van een lage temperatuur naar een hoge temperatuur. Deze warmtepomp heeft een aantal voordelen boven de compressiewarmtepomp. De thermo-akoestische warmtepomp is stil, heeft geen bewegende delen, werkt zonder koudemiddelen en heeft een groot werkingsgebied. Het koudemiddel dat nodig is voor de compressiewarmtepomp, begrenst het temperatuurbereik. Bijzonder aan de thermo-akoestiek is verder dat dit een multidisciplinair vakgebied is van thermodynamica, werktuigbouwkunde, geluid- en stromingsleer, dat relatief weinig aandacht krijgt op universiteiten. Onderzoek door ECN, BlueHart en SoundEnergy helpt bij de doorontwikkeling van deze techniek.

Waterstof in de kinderschoenen

Waterstof maakt eigenlijk pas 350 jaar na ontdekking zijn intrede als afzonderlijke energiebron voor klimaatinstallaties. In 1671 beschreef Robert Boyle als eerste de reactie van ijzer en verdund zuur waarbij waterstof vrijkwam. Zo'n 100 jaar later, in 1766, ontdekte Henry Cavendish de eigenschappen van waterstof. Waterstof is in de loop der jaren al voor verschillende toepassingen gebruikt, onder meer als nuttig (bij)product uit pyrolyse bij kolen voor stadsgas,

voor zeppelins, industriële processen, nucleaire en kernfusieprocessen. Toch staan we vandaag de dag, 350 jaar na de eerste beschrijving van waterstof, pas aan het begin van de grootschalige introductie van waterstof als groene-energie drager uit elektrolyse. Voor transport, voor het verwarmen van (woon)gebouwen en voor gebruik in brandstofcellen.

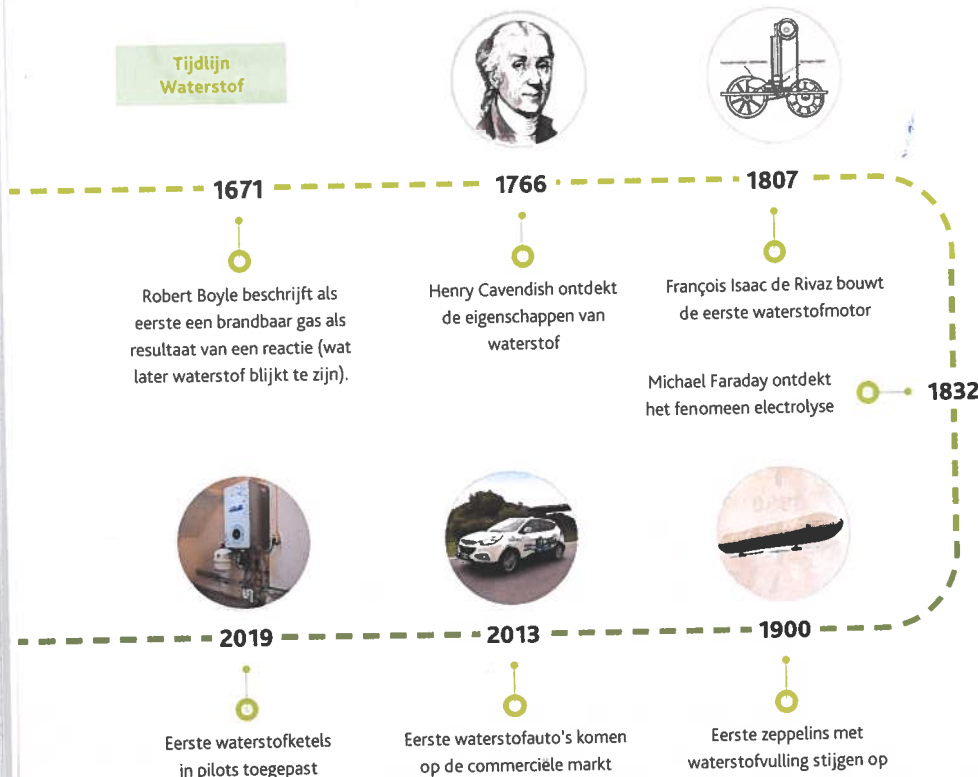
Zonnepanelen zien het licht

Zonnepanelen zagen hun eerste levenslicht al in 1838, als gevolg van de experimenten van Edmund Becquerel. Hij ontdekte dat er een spanningsverschil ontstaat als zonlicht schijnt op platina elektrodes met een coating van zilverchloride. In 1883 kwam Charles Fritts met een fotovoltaïsche cel met een rendement van 1%. Door de ontwikkeling van halfgeleiders in de 19<sup>e</sup> eeuw en de verklaring van het foto-elektrisch effect door Albert Einstein in 1905, waarmee hij in 1921 de Nobelprijs won, kwam Bell Labs in 1954 met het eerste echte zonnepaneel. De zoektocht naar een energiebron voor de Vanguard I satelliet die in 1958 werd gelanceerd, gaf R&D naar zonnepanelen ook een flinke push. Want een accu of een kernreactor waren voor een satelliet geen serieuze alternatieven. De eerste zonnepanelen op de Vanguard I, 6 stuks van 5 bij 5 cm, produceerden samen slechts 1 W, maar luidden het begin in van de ontwikkeling van zonnecellen.

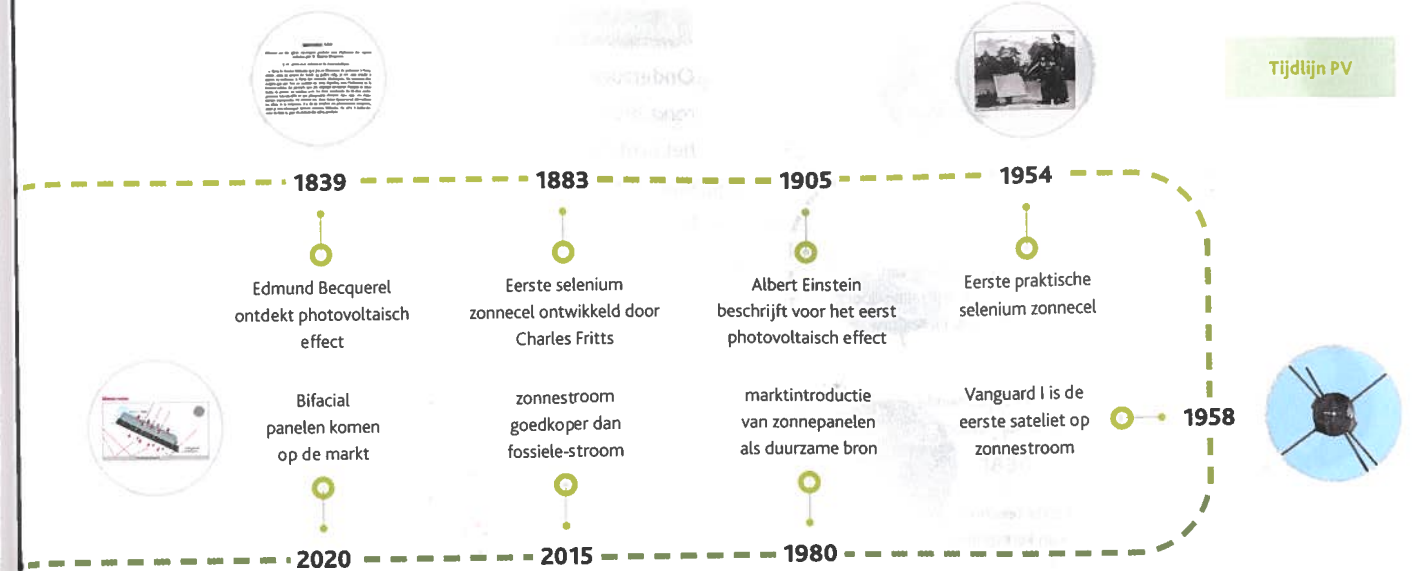
Kwestie van vraag en aanbod

Bepalend voor veel technieken zijn de aanbod- en vraagfactoren. Het aanbod neemt toe als er voldoende geld is voor R&D, door beschikbaarheid van goed gekwalificeerde professionals en als gevolg van overheidsopdrachten. De vraag neemt toe door regelgeving - zoals hogere duurzaamheidsnormen, subsidies en fiscaal voordeel - door nieuwe marktwensen op het gebied van comfort en bij een hogere energievraag voor industrie of woningen. Ook nieuwe (disruptieve) technieken of fabricageprocessen kunnen het aanbod substantieel verbeteren of goedkoper maken.

Tijdlijn Waterstof



Tijdlijn PV



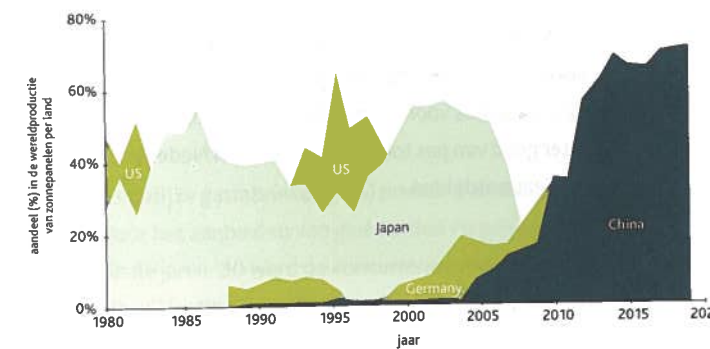
Pas in 1980 zagen we de eerste marktintroductie van zonnepanelen als duurzame energiebron. Tot die tijd zag men zonnepanelen vooral als off-grid oplossing. Het duurde vanaf de Vanguard I nog bijna 60 jaar voordat rond 2015 het fotovoltaïsch effect commercieel concurrerend was met andere (fossiele) elektriciteitsbronnen. De kosten van de panelen daalde fors en dat deed de consumentenmarkt groeien. Via webshops en vergelijkingssites zijn de prijzen van panelen en de montage van systemen eenvoudig vergelijkbaar en de prestaties zijn door Tv-certificaten gegarandeerd. Zonnepanelen hebben daarnaast het voordeel dat ze bij voldoende beschikbaar dakoppervlak plug & play te installeren zijn en zich bij een geschikte oriëntatie, zonder al te veel schaduw, makkelijk laten terugverdienen.

Vanaf 2000 stimuleerde Duitsland de vraag met haar 'feed-in' tarief en zorgde China er met grote staatsleningen voor dat zonnepanelen goedkoop gefabriceerd konden worden. De markt innoveerde verder. Zo kwam Tesla met haar 'Solar Roof', zijn er bi-facial zonnepanelen die het licht van beide zijden kunnen omzetten in energie en onderzoekers van de KU Leuven ontwierpen recent een zonnepaneel dat zonlicht direct omzet in waterstof.

Slechts 9,6% van de elektriciteit in Nederland komt vandaag de dag van zonnepanelen.[2] Toch mogen we de ontwikkeling van zonnestroom zien als een echte energietransitie, want de impact op de samenleving is groot. Netbeheerders en eigenaren van zonnestroominstallaties moeten steeds meer rekening houden met netcongestie bij teruglevering en transport van zonnestroom. Tegelijk veranderen zonnevelden het aanzicht van het buitengebied, fiscale regels en saldering vragen om regulatie door de overheid en het balanceren van netten en buffering van elektriciteit wordt een steeds grotere uitdaging.

Financiering basis van succes

Het succes van zonnepanelen is voor een groot deel te verklaren door continue financiering. Eerst door de Verenigde Staten met hun defensieprojecten in de jaren '50 en 'Project Independence' in de jaren '70. Daarna door Japan met 'Project Sunshine' in de jaren '90.

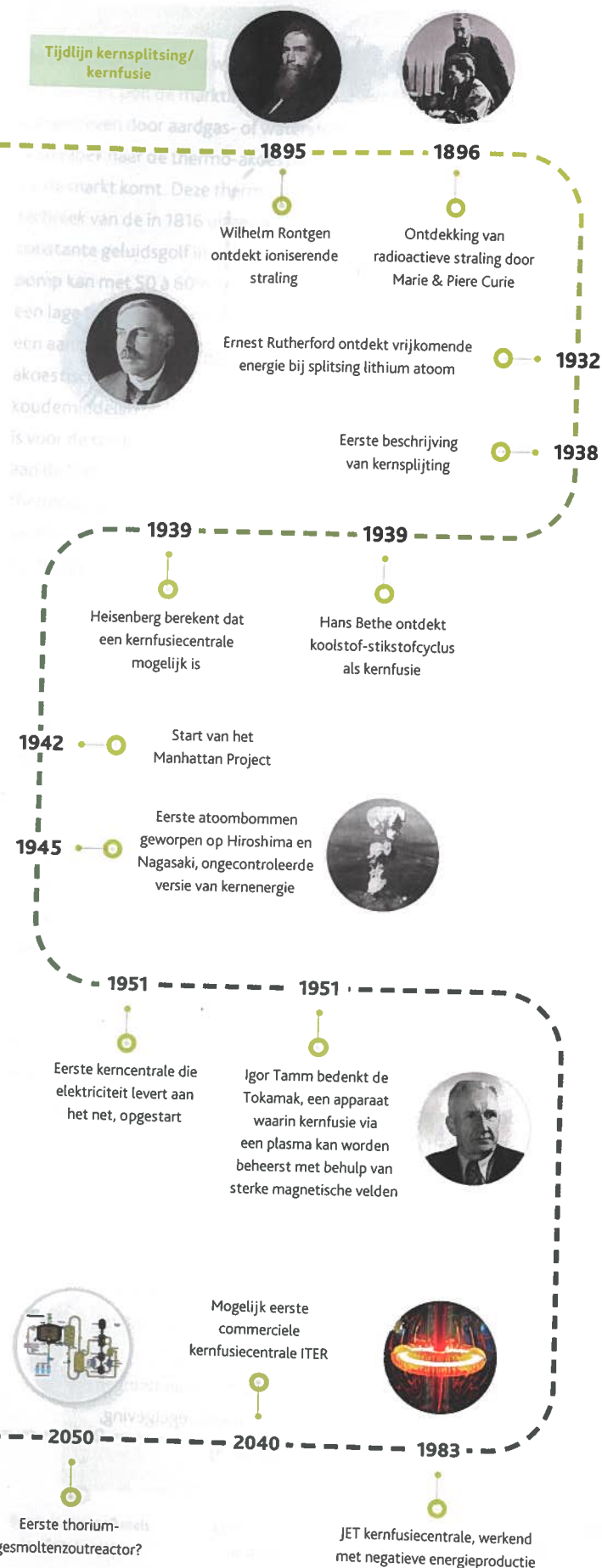


Figuur 2: Bijdrage in % van de wereldproductie (bron: How Solar Energy Became Cheap Gregory F. Nemet).

Een energietransitie is een structurele en significante verandering van energiegebruik die invloed heeft op energiebronnen, energiedragers, omzetting en diensten.[3] Energietransities zorgen niet alleen voor significante veranderingen van techniek, maar ook van politieke regelgeving, tarieven en (nieuwe) gebruikers.[4]



Tijdlijn kernsplijting/ kernfusie



Kernenergie

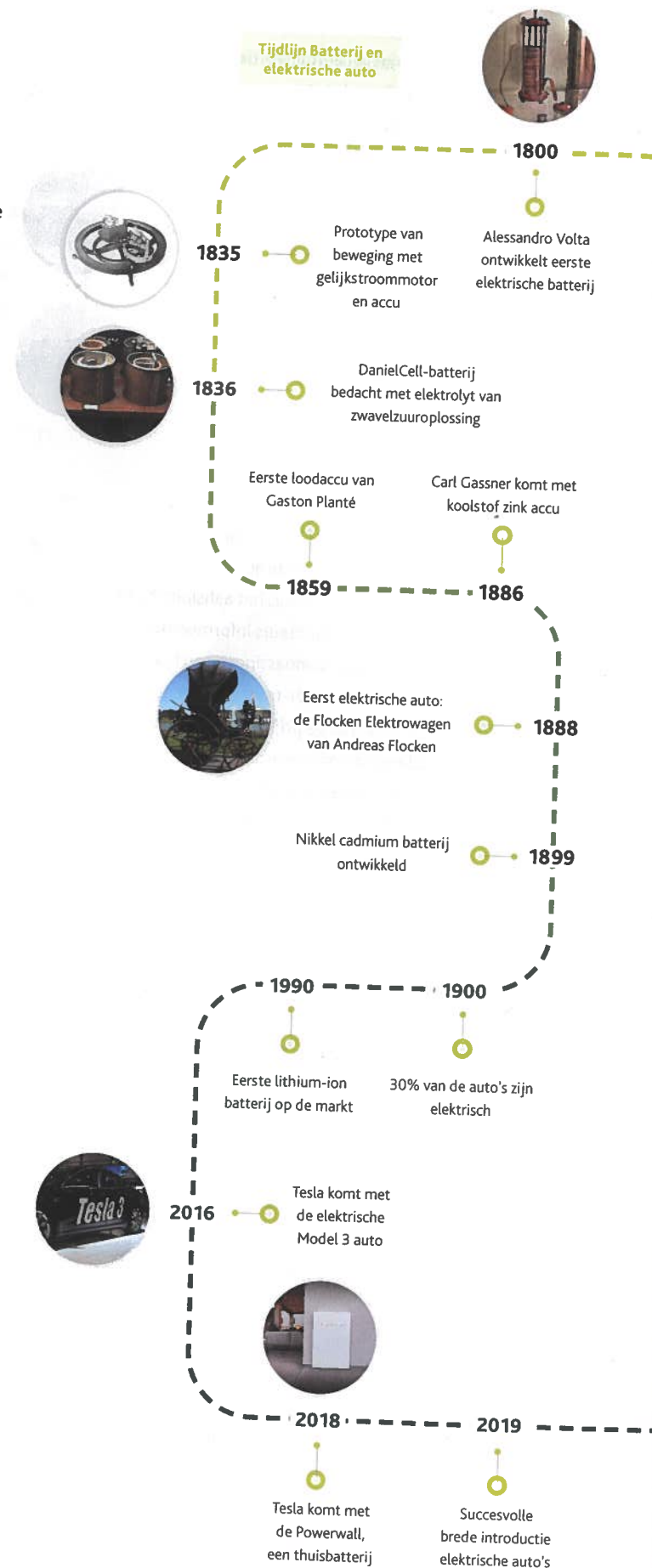
Onderzoek van Wilhelm Röntgen in 1895 en van Marie Curie rond 1900, brachten röntgenstraling en radioactiviteit aan het licht. Daarop ontdekte Ernest Rutherford in 1932 dat er energie vrijkomt bij atoomsplijting. In 1942 voerde Enrico Fermi de eerste gecontroleerde kernsplijting uit, waarop een razendsnelle ontwikkeling op het gebied van kernenergie volgde.

Adaptatie van innovaties

Soms duurt het lang voordat de samenleving een techniek omarmt. Nederland was bijvoorbeeld 100 jaar later dan Engeland (1750) met de introductie van de stoommachine. Stoommachines boden ons dan ook minder voordelen dan in Engeland indertijd. Hier gebruikten we windmolens voor de opwekking van mechanische energie. Daar was veel in geïnvesteerd (sunk costs) en was er geen steenkool voor nodig. Ook hadden windmolens veel lagere operationele kosten dan stoommachines. Daarnaast was in Nederland (nog) maar weinig steenkool en ijzererts beschikbaar voor de bouw en exploitatie van stoommachines.

Nieuwe technieken die het leven een veel beter of makkelijker maken, komen sneller van de grond. Dat gebeurde bijvoorbeeld bij de introductie van stads- of lichtgas uit steenkool, begin 1800. Deze nieuwe techniek veroorzaakte een enorme vraagexplosie en de adaptatie ging dus snel. Lichtgas verbeterde het comfort dan ook aanzienlijk ten opzichte van de traditionele kaarsen. In het begin werd lichtgas vooral ingezet voor openbare verlichting en verlichting in fabrieken en grote gebouwen. Later kregen ook particulieren een aansluiting, de rijkere lagen van de bevolking als eerste. Nog weer later gingen we ook koken en verwarmen op dit gas. Het leidingstelsel dat nodig was voor de distributie van stadsgas, kwam later goed van pas toen we rond 1960 in Nederland aardgas ontdekten.

Tijdlijn Batterij en elektrische auto



Dankzij de enorme ambitie en financiering van het Manhattan Project, wist de Verenigde Staten tijdens de tweede wereldoorlog de atoombom te ontwikkelen. Slechts 20 jaar na de ontdekking van vrijkomende energie bij atoomsplijting, leverde de eerste kerncentrale in 1952 elektriciteit aan het elektriciteitsnet. Naast het maken van kernwapens, was ook de inzet van kernenergie voor de voortstuwing van onderzeeërs een belangrijke stimulans voor verdere kennisontwikkeling op dit gebied.

Strijd tussen elektriciteit, stadsgas en petroleum

In de loop van de 20e eeuw ontstond er een concurrentiestrijd tussen de energiebronnen elektriciteit, stadsgas en petroleum. De toepassing van elektriciteit ontwikkelde zich begin 20e eeuw in Nederland nog relatief langzaam. Dit kwam vooral door lage gas- en petroleum prijzen, onbekendheid met elektriciteit en beperkte aanwezigheid van industrie. Daarnaast vonden Nederlanders de infrastructuur van bovengrondse elektriciteitsleidingen lelijk. De regelmatige storingen bij de elektriciteitsbedrijven hielpen ook niet mee. Als elektriciteit hier vanaf het begin dezelfde lage tarieven kende als in Engeland en de VS, had het aantal aansluitingen ook in Nederland snel kunnen groeien. Maar gas en petroleum bleven goedkoper, en Nederlanders zijn nu eenmaal zuinig. Volgens Nagtglas Versteeg, toonaangevend ingenieur in die tijd, was er meer propaganda nodig 'om de overwegend geldelijke bezwaren bij het publiek te doen verdwijnen'. [5]

Meest geëlektrificeerde stad van Europa

In Amsterdam zorgde directeur Lulofs van de Gemeente- Electriciteitswerken (GE) ervoor dat meer klanten aansloten op het net. Hij zette sterke marketing in, vooral gericht op vrouwen. Ook introduceerde hij gratis aansluitingen, verlaagde hij de tarieven en stoffelde die. En hij introduceerde de elektriciteitsmunt, waarmee je prepaid elektriciteit kon tappen uit je eigen meterkast. Daarmee zette hij aan tot elektrificatie van andere toepassingen dan alleen verlichting en werd Amsterdam in 1920 mogelijk de meest geëlektrificeerde stad van Europa. GE stimuleerde tegelijkertijd het elektriciteitsverbruik, door de verkoop van elektrische stofzuigers, kachelletjes, strijkijzers, en boilers en creëerde hiermee een lock-in voor elektriciteit.

De gemeentelijke gasfabrieken (GG) probeerden ook een lock-in te creëren door het aanbieden van gashaarden en geisers. Maar door de crisis in de jaren '30 werd de concurrentie met elektriciteit en vooral olie vrij lastig. De verkoop van fornuizen en geisers droeg wel bij aan de extra afname van gas. Dit leidde tot een flinke concurrentie tussen elektriciteit (GE) en stadsgas (GG), ieder gooide hun eigen reclamecampagne in de strijd.

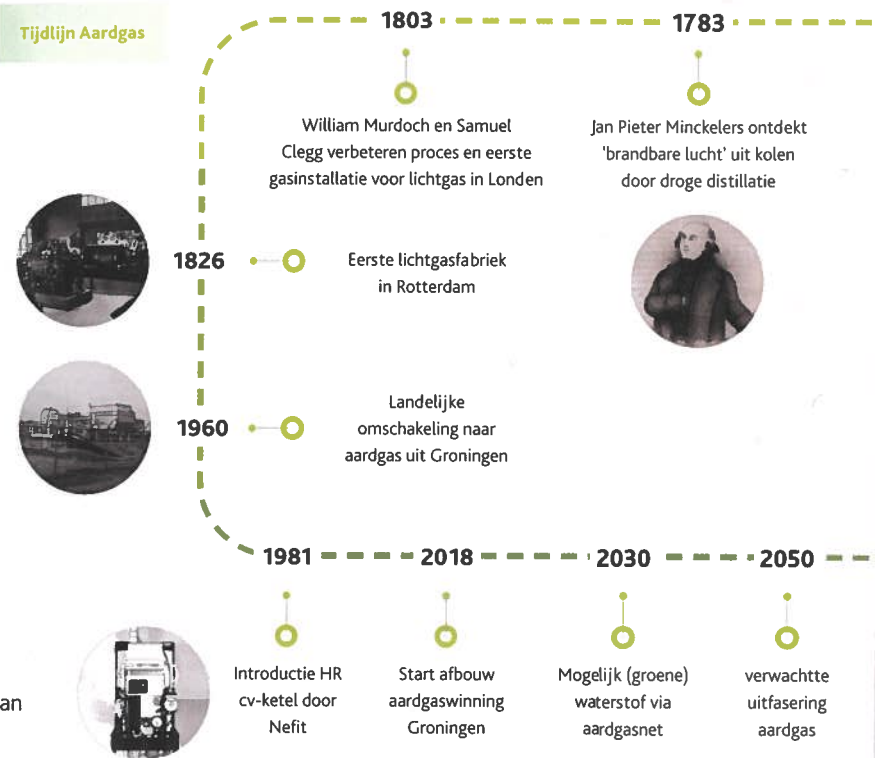


## Van steenkool naar aardgas

Een sterke overheidsregie en gecentraliseerde uitvoering van de transitie was de basis voor een snelle en succesvolle energietransitie naar aardgas vanaf de jaren '60. De rijksoverheid had een groot financieel belang bij de omschakeling naar het aardgas dat in 1959 bij Slochteren was ontdekt. De aardgasbaten zouden zo voor tientallen jaren een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de Nederlandse staatskas. Minister De Pous van Economische Zaken kwam in 1962 met een plan voor productie en distributie van aardgas. Goedkope kernenergie dreigde roet in het eten te gooien, dus om het financiële belang van aardgas veilig te stellen, werd alles op alles gezet voor een snelle uitrol. In 1963 vloeide het eerste aardgas uit Slochteren naar de gemeentelijke gasbedrijven. Door de al aanwezige (stads)gasinfrastructuur was het aansluiten van gebruikers relatief eenvoudig. Enquêteurs informeerden bewoners over de vervanging en aanpassingen aan hun gastoestellen. Voor bewoners was de transitie naar aardgas aantrekkelijk vanwege de gunstige prijsstelling. Verwarmen op aardgas via centrale verwarming werd de standaard, ijskoude slaapkamers behoorden tot het verleden en sjouwen met kolen of petroleum hoefde niet meer. Het verbruik per aansluiting ging daardoor van 300 m<sup>3</sup> per jaar in 1963 naar 3.300 m<sup>3</sup> per aansluiting in 1973.

De transitie naar aardgas betekende ook voor installateurs een grote verandering. Volgens Gasunie-rapporteurs waren sommige installateurs negatief over verwarmen met aardgas. Zij voorzagen potentiële problemen met het gasnet en een lagere winstmarge door goedkopere aardgasinstallaties. Ook was de kennis over gasgestookte installaties vaak zeer beperkt. Er werden cursussen georganiseerd 'om zich de meest elementaire begrippen van dit gas eigen te maken'. Veel installateurs waren hierin zeer geïnteresseerd. Net zoals nu met de 'Green Deal', waarbij installateurs trainingen krijgen om warmtepompen succesvol te kunnen installeren.

## Tijlijn Aardgas



## Klassieke natuurkunde

Terugkijkend op al deze ontdekkingen en innovaties is bijna alles te herleiden naar de klassieke natuurkunde (tot 1900) en doorontwikkeld naar hedendaagse toepassingen. De klassieke natuurkunde is bekend en 'af'. De kans op revolutionaire nieuwe uitvindingen gebaseerd op natuurkundige wetten uit de klassieke mechanica, elektrodynamica, thermodynamica en optica is na 120 jaar relatief klein. Het verder ontwikkelen van 'oude' energietechnologieën kan ook nog eens oninteressant zijn voor investeerders. Want nieuwe toepassingen van oude technieken, zoals de stirlingmotor of adsorptietechnologie, zijn eenvoudig te kopiëren door andere bedrijven doordat octrooien lastig te verwerven zijn. Bestaande technieken krijgen wel een steeds hogere energie-efficiëntie, door optimalisatie van processen en slimmere regelingen. Ook zijn ze steeds compacter met minder materiaalgebruik. Het is echter de vraag of van slimmere regelingen nog grote verbeteringen in prestatie te verwachten zijn.

## Moderne natuurkunde

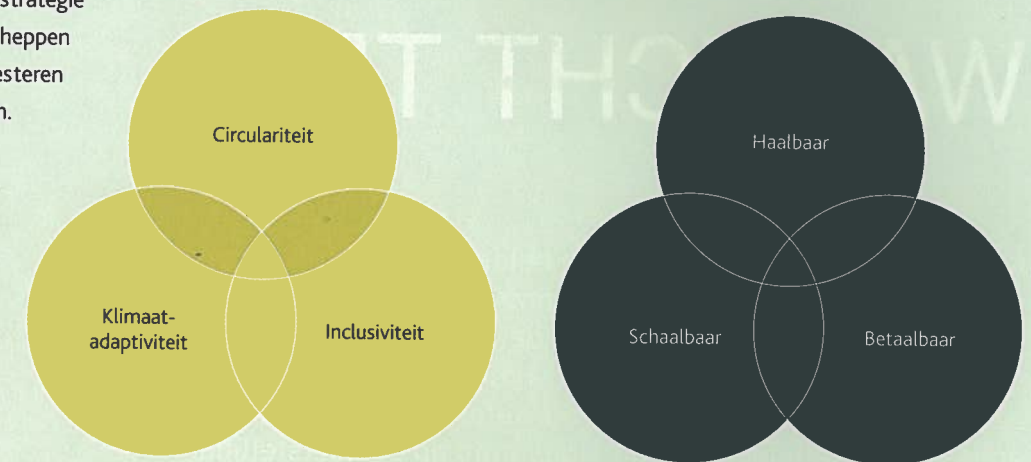
De moderne natuurkunde van na 1900 heeft ons het foto-elektrisch effect gegeven: het verschijnsel dat elektronen die niet zo sterk zijn gebonden aan een atoom, loskomen bij het opnemen van energie uit invallend licht. Deze ontdekking was onmisbaar voor de ontwikkeling van zonnepanelen. De moderne natuurkunde bracht ons ook de mogelijkheden van kernsplijting en kernfusie voor het opwekken van energie. De huidige kernreactoren gebruiken kernsplijting, waarvoor radioactief materiaal nodig is. Kernfusie belooft al de gevaren en nadelen van kernsplijting op te lossen. Maar het zal nog wel 20 tot 30 jaar duren voordat dit concept marktrijp is.

We zullen de doelstellingen van 'morgen' dus moeten realiseren met de technieken van 'gisteren'. Maar we kunnen wel veel leren van vorige energie-innovaties en energietransities, zoals hiervoor beschreven. Wat zijn dan die lessen voor de energietransitie waar we nu middenin zitten? Zorg net als bij atoomenergie voor een goed gefinancierde productontwikkeling met voldoende en goed opgeleide wetenschappers en technici. Zorg voor optimale benutting van de ontwikkelde kennis, voor meerdere toepassing en werkvelden dan de initiële toepassing zoals bij de thermo-akoestische warmtepomp. Blijf innovatie internationaal langdurig stimuleren zoals bij de uitrol van zonnepanelen en creëer naar het voorbeeld van de zonnepanelenmarkt

betrouwbare producten voor een grote consumentenmarkt. Voorkom met duidelijk beleid lock-ins zoals turf bij stoommachines en maak op die manier collectieve systemen kansrijker. Zorg voor overheidsregie en overheidsinvesteringen vanuit een heldere energiesysteemvisie zoals bij de transitie naar aardgas zodat markt en consumenten met voldoende zekerheid investeringsbeslissingen kunnen nemen. En accepteer dat het beoordelingskader van mensen en partijen verschillend kan zijn.

## Beoordeling van duurzame technieken

De een ziet haalbaar, betaalbaar en schaalbaar als dé criteria voor duurzame technieken. Voor de ander is dat betaalbaarheid, betrouwbaarheid en duurzaamheid. Een derde vindt circulariteit, inclusiviteit en klimaatadaptiviteit weer belangrijk. Warmtepompen scoren goed op betrouwbaarheid en duurzaamheid, maar op betaalbaarheid minder. Dat laatste komt vooral door de noodzaak van investeringen in noodzakelijke isolatie en geschikte afgiftesystemen. Groene waterstof scoort uitstekend op betrouwbaarheid, maar vraagt veel meer duurzame energieproductie voor bijvoorbeeld ruimteverwarming dan een warmtepomp. Zonnepanelen zijn betaalbaar en duurzaam, maar minder stabiel, omdat het vermogen 's-nachts nul is en bij bewolking erg laag. Verschillende spelers hechten elk hun eigen belang aan deze factoren en criteria. Het is dus lastig om consensus te vinden in de keuze voor een bepaalde energietransitie-strategie en daarmee duidelijkheid te scheppen voor bedrijven die moeten investeren en eigenaren die moeten kiezen.



Figuur 3.

## Referenties

- [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Cullen](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Cullen)
- <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i26179/nederland-produceert-25-procent-meer-stroom-met-zonnepanelen-ruim-33-procent-stroom-is-duurzaam>
- O'Connor P.A., Energy Transitions (The Pardee Papers/No. 12/November 2010)
- Sovacool, Benjamin K, Energy research & social science, 202-215, How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions, 2016
- Techniek in Nederland in de twintigste eeuw – Deel 2 Delfstoffen, Energie en Chemie blz. 134
- Techniek in Nederland in de twintigste eeuw – Deel 2 Delfstoffen, Energie en Chemie blz. 218

## Bronnen

- Voor de informatie over wetenschappers en hun bijdrage aan de wetenschap is hoofdzakelijk wikipedia.com gebruikt
- Voor de informatie over de energietransitie in Nederland is gebruik gemaakt van Techniek in Nederland in de twintigste eeuw. Deel 2. Delfstoffen, energie, chemie (2000)–A.A.A. de la Bruhèze, H.W. Lintsen, Arie Rip, J.W. Schot is grotendeels gebruikt
- Een aantal keuzes voor wetenschappers en hun ontdekkingen is arbitrair. In die gevallen is een (persoonlijke) selectie gemaakt.

Met dank aan Siebe Pool (voormalig docent Windesheim) voor het overdragen van zijn enthousiasme over thermodynamica en meelesen met dit artikel