



Verkenning

# Elektronen en/of Moleculen

Twee transitiepaden voor een CO<sub>2</sub>-neutrale toekomst

Bert den Ouden  
Peter Graafland  
Jan Warnaars

*April 2018*

**Berenschot**



# Elektronen en/of Moleculen

Twee transitiepaden voor een CO<sub>2</sub>-neutrale toekomst

Bert den Ouden

Peter Graafland

Jan Warnaars

*April 2018*





## Inleiding

Ter facilitering van de discussie over de klimaattransitie heeft Berenschot twee scenario's opgesteld en doorgerkend: het "elektronenscenario" en het "moleculenscenario".

Deze twee scenario's hebben allebei de eigenschap dat de CO<sub>2</sub>-emissie in 2050 wordt teruggebracht naar vrijwel nul. Dat gebeurt via twee tamelijk verschillende paden:

- Het elektronen scenario bereikt de CO<sub>2</sub>-reductie door inzet van duurzame energie.
- Het moleculenscenario richt zich, naast zeker aandeel duurzaam, vooral op CO<sub>2</sub>-reductie door "schoon fossiel"

Het doel van deze scenario's is het verkennen van de mogelijkheden en effecten in elk van deze uiterste transitiepaden.

Het is niet bedoeld om een keus te maken tussen één of de ander. De uitkomsten zijn inbreng in de discussie over het volledige speelveld van alle mogelijke transitie-oplossingen inclusief alle opties tussen deze twee uiterste scenario's.

Het is goed mogelijk deze transitie scenario's te combineren, zowel qua samenstelling (mix van opties parallel) als in de tijd (volgtijdelijke ontwikkeling)

Ook is de discussie verkenning van transitie-opties hiermee geenszins afgerond. Zo zouden we onder andere voorstellen om nog een "warmtescenario" op te stellen.

De uitkomsten van deze scenario's zijn de verantwoordelijkheid van Berenschot. Het werk hiervoor is financieel ondersteund door EnPuls, TKI energie en industrie, en TKI gas.

## Scope

Deze scenario's zijn globaal en bedoeld voor discussie-doelinden, ter illustraties van de uiterste systeemconsequenties van verschillende paden voor verduurzaming en decarbonisering. Het is niet bedoeld om te hoeven kiezen voor het ene of het andere scenario; er zijn ook tal van tussentijdse mogelijkheden, zowel parallel of als ontwikkeling in de tijd. Andere uitgangspunten kunnen resulteren in andere uitkomsten van de scenario's. Naast deze twee, het elektronenscenario en molecuulenscenario, onderzoekt Berenschot de mogelijkheid om nog een warmtescenario op te stellen als derde variant.

## Energietransitie: een gigantische en noodzakelijke opgave

Ons energiesysteem evolueert snel naar een duurzamere toekomst. Tijdens de COP21 in Parijs besloten 192 landen samen om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de twee graden Celsius.

Dit vereist dat er maatregelen worden getroffen om de koolstofemissies in 2050 met 80-95% te verminderen in vergelijking met 1990.

De energietransitie is een grote uitdaging voor zowel de gebouwde omgeving alsmede de Nederlandse industrie, vooral met betrekking tot de vraag naar warmte.

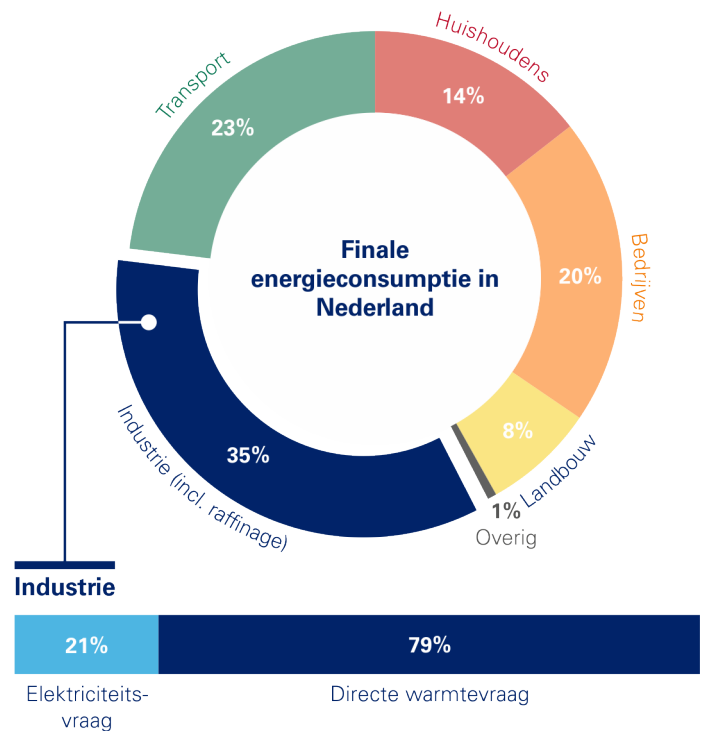
Op dit moment zijn er maar weinig oplossingen beschikbaar die zorgen voor een decarbonisatie van het warmte aanbod op hoge temperatuur.

Dit geldt in mindere mate voor het aanbod van lagere temperatuurwarmte maar daar staan de kosten en de snelheid van implementatie van de beschikbare maatregelen ter discussie.

Op dit moment lijkt de energietransitie nog een incrementeel proces maar daar zal voor het bereiken van de opgave meer radicale innovatie moeten plaatsvinden.

In deze exercitie proberen we meer inzicht te geven waar en hoe deze transitie kan plaatsvinden voor specifiek twee sectoren: *industrie en gebouwde omgeving*.

## De energietransitie is een uitdaging voor de vraag naar hoge-temperatuur warmte in de industrie



**Figuur 1.** Finale energieconsumptie in Nederland, hoge temperatuur-warmte industrie<sup>1</sup>.

De Nederlandse industrie is veruit de meest energie verbruikende sector, verantwoordelijk voor 35% (666 PJ) van de totale finale energievraag in Nederland.

Het grootste deel van het industriële energieverbruik wordt gebruikt voor warmte, voornamelijk bij hoge temperaturen.

Industriële warmte wordt nu geleverd door fossiele brandstoffen (zoals aardgas, olie en kolen) met een hoge CO<sub>2</sub>-footprint.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot zal voor het behalen van de 2°C-doelstelling in 2050 met zo'n 85-95% moeten zijn gedaald ten opzichte van 1990.

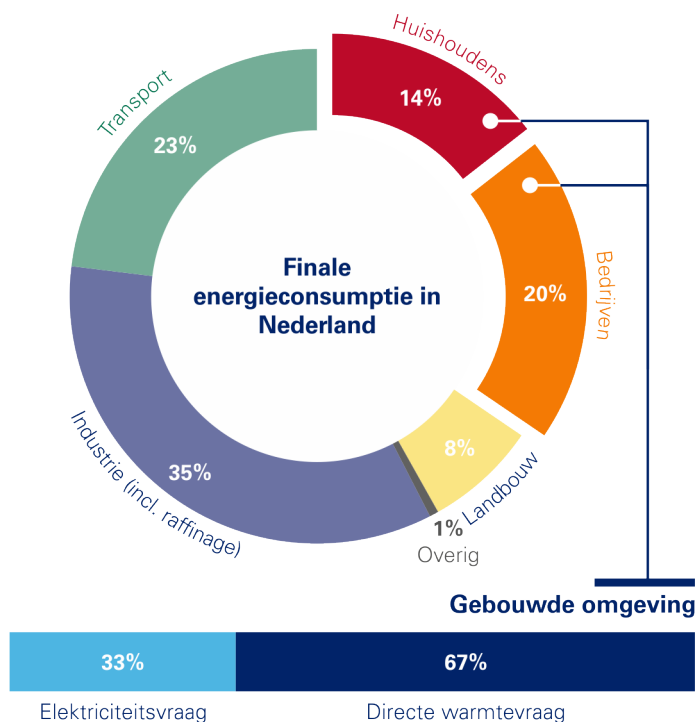
In de nabije toekomst zijn er nog weinig hernieuwbare alternatieven het voor warmteaanbod. Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen, moet zowel warmte als elektriciteit voorzien worden van CO<sub>2</sub>-vrije bronnen.

Gezien de beperkte beschikbaarheid van hernieuwbare opties is warmte echter veel moeilijker te leveren op een CO<sub>2</sub>-vrije manier dan elektriciteit

Hierdoor is de energietransitie een grote uitdaging voor hoge temperatuur warmte in de industrie.

<sup>1</sup> Bron: CBS (2015); CE Delft (2015); VMT (2006)

## Uitwerking lagere temperatuur verwarming naar aanleiding van de energieagenda



**Figuur 2.** Finale energieconsumptie in Nederland, lage temperatuur-warmte gebouwde omgeving<sup>2</sup>.

Naast de industrie is ook de gebouwde omgeving verantwoordelijk voor ongeveer één derde van energievraag in Nederland. Het grootste verbruik bij de huishoudens zit in lage temperatuurwarmte.

In de notitie transitiepad lagere temperatuur warmte (uitwerking van de energie agenda), beschrijven EZ en BZK mogelijke maatregelen die nodig zijn om de bestaande gebouwde omgeving te verduurzamen.

Volgens hen vindt de transitie grofweg plaats op drie fronten; reductie van de warmtevraag, verduurzamen van het warmteaanbod en investeren in de energie-infrastructuur.

Het warmteaanbod kan voor een groot deel bestaan uit omgevingswarmte middels warmtepompen in combinatie met hernieuwbare elektriciteit of hernieuwbaar gas.

Daarnaast zal een afbouw van gasdistributienetten plaatsvinden en de resterende netten moeten geschikt gemaakt worden voor hernieuwbaar gas. Tegelijkertijd neemt de noodzaak aan (zwaardere) elektriciteitsnetten en aan warmtenetten (klein- en grootschalig) toe.

Er ligt dus ook een grote uitdaging voor lage temperatuur-warmte in de bestaande gebouwde omgeving.

## Scenario-exercitie voor het faciliteren van de discussie

Nederland heeft vastgelegd om in 2050 80-95% minder CO<sub>2</sub> uit te stoten. Zowel de industrie als de gebouwde omgeving staan daarmee voor een grote opgave, omdat ze samen ongeveer twee derde van het nationale energieverbruik vertegenwoordigen (allebei goed voor één derde van het nationale energieverbruik).

Het is van belang om inzicht te krijgen in verschillende energietransitiepaden die naar volledige CO<sub>2</sub>-neutraliteit streven om op basis daarvan keuzes te kunnen maken voor de toekomst. Voor de kwantificering van verschillende scenario's naar een CO<sub>2</sub>-neutrale toekomst hebben we het energietransitiemodel in combinatie met eigen ontwikkelde modellen gebruikt.

Deze scenario-exercitie beschouwen wij als een levend document, voor het faciliteren van discussies omtrent lange termijn keuzes voor het energiesysteem. Het is daarmee ook een poging om op de lange termijn de kwaliteit van scenario's te verhogen door ordergroottes en verhoudingen te illustreren, zowel energetisch als economisch, in perspectief van het gehele Nederlandse energiesysteem.

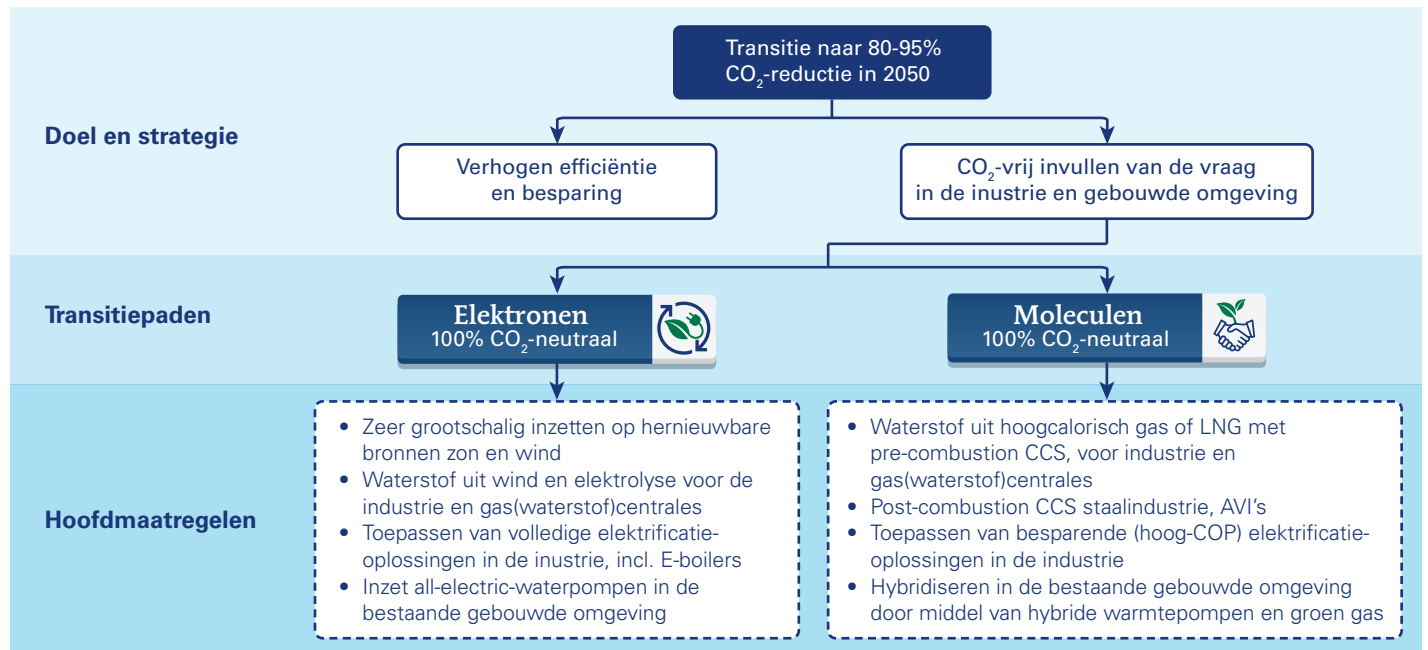
De focus lag hierbij op de industrie en de gebouwde omgeving. Er is gekeken naar de verschillende opties om de industriële warmtevraag te verduurzamen en de gevolgen daarvan in de energieketen. Daarnaast is er aandacht besteed aan de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving en de verschillende opties daarvoor.

In beide scenario's is CO<sub>2</sub>-vrij gas de sleutel om CO<sub>2</sub> te reduceren in de verschillende sectoren. In verschillende openbare scenario's die de afgelopen jaren zijn geproduceerd wordt vaak biomassa gebruikt als sluitpost om uiteindelijk tot een CO<sub>2</sub>-neutraal systeem te komen. De financiële en energetische consequenties voor het gebruik van CO<sub>2</sub>-vrij gas zijn tot nu toe nog niet eerder op een integraal systeemniveau meegenomen. Deze exercitie is daar een eerste aanzet toe.

## Twee uiteenlopende scenario's: elektronen en moleculen

Er zijn twee scenario's opgesteld: elektronen en moleculen. Deze zijndoorgerekend met het Energie Transitie Model, in

combinatie met modellen Berenschot voor waterstof (hetzij uit wind/elektrolyse hetzij uit gas/pre-combustion CCS)<sup>3</sup>



Figuur 3. Hoofduitgangspunten van scenario's elektronen en moleculen.

## Uitgangspunten van onderscheidende variabelen in de scenario's

### Gebouwde omgeving

Dit is conform het rapport "Doorrekening gebouwde omgeving met het Energietransitiemodel" gepresenteerd door Berenschot in een EZK/BZK bijeenkomst in 2017:

- Volledige na-isolatie alle bestaande woningen en gebouwen; echter zonder extra voorzetgevels.
- Alle nieuw te bouwen woningen zijn voorzien van een elektrische waerpomp en hebben geen gasnet.
- Bestaande bouw die niet op waermenetten aangesloten (grootste deel) is in 2050 overgegaan op hetzij:
  - Hybride waerpomp (Moleculen scenario): dit is een flinke elektrificatie, maar geen volledige
  - All-electric waerpomp (Elektronen scenario): dit is een volledige elektrificatie

### Windenergie en waterstof

Windenergie sec is in beide scenario's behandeld als in het Energie Transitie Model (ETM) inclusief de standaard draaiuren voor wind daarin. Daarbij is een hoge kostenreductie aangenomen, dus nog extra ten opzichte van de kostendaling in de afgelopen jaren, voor windparken te bouwen in 2050. Dat geldt ook voor windparken voor waterstofopwekking, waarbij is gerekend met de elektrolyse-units als in het ETM, maar met hogere draaiuren voor de combinatie wind + elektrolyse (deze windparken staan verder op zee en hebben geen peakshaving).

### Bij CCS wordt zoveel mogelijk precombustion CCS ingezet.

Hierbij wordt waterstof gemaakt uit aardgas (hoogcalorisch of LNG) met afvang van CO<sub>2</sub> vrijwel aan de bron. Redenen:

- Flexibel; deze waterstof is overal flexibel toepasbaar in de industrie en voor CO<sub>2</sub>-vrije gascentrales
- Compatibel: sluit aan bij waterstof uit duurzame bronnen, scenario's lopen daardoor gelijk in infrastructuur

Post-combustion CCS heeft deze flexibiliteit en compatibiliteit veel minder.<sup>4</sup>

Energieverbruik wegtransport: personenvervoer altijd volledig elektrisch; wegtransport is op blauwe waterstof (moleculenscenario) dan wel een mix van 2/3 elektrisch en 1/3 groene waterstof (elektronenscenario)

<sup>3</sup> Modellen zijn compatibel met recente doorrekeningen voor road-map chemische industrie en studie CO<sub>2</sub>-vrije waterstof uit gas.

<sup>4</sup> Zie "CO<sub>2</sub>-vrije waterstof uit gas," Berenschot en TNO. 2017



## Andere modelmatige veronderstellingen

Beide scenario's zijn zeer verschillend op de hoofdmaatregelen die sterk worden ingezet. Enkele andere variabelen zijn conservatief aangenomen en worden gelijk behandeld in beide scenario's.

### Conservatieve aanname van transitie zonder a priori biomassa import in 2050

Er wordt in beide scenario's a priori geen grootschalige import van biomassa verondersteld. De biomassa-inzet komt van Nederlandse bodem en is derhalve qua omvang relatief beperkt. Dat is geen harde keuze, maar een aanname in de berekening.

Bij een wereldwijde energietransitie zullen alle landen ter wereld biomassa willen gebruiken. Bij een eerlijke verdeling ("fair share") kan Nederland wellicht niet een onevenredig groot aandeel claimen van de beperkte hoeveelheid mondiale biomassa; dit geeft een mogelijke beperking in het volume en dus een transitierisico. Ook kunnen mogelijk hoge wereldmarktprijzen voor biomassa ontstaan; dat geeft een moeilijk in te schatten prijsrisico wat lastig in een scenariomodel te verwerken is.

Om te vermijden dat onze transitie scenario's te afhankelijk hiervan worden, is in beide scenario's de gelijke en conservatieve veronderstelling gedaan van een energietransitie naar nul CO<sub>2</sub>-emissies, zonder a priori biomassa import.

Voor beide scenario's betekent dit dat een transitie naar nul CO<sub>2</sub>-emissies vanuit maatregelen op Nederlandse bodem. Dat geeft een basisprojectie met verzekerde realisering van de CO<sub>2</sub>-reductie. Mocht biomassa-import wel goed voorhanden zijn, laaggeprijsd en acceptabel, dan is dit een mogelijke meevaller in beide scenario's.

### Conservatieve groei-aanname van a priori aandeel warmtenetten

In beide scenario's is conservatief verondersteld dat het aandeel van warmtenetten groeit tot 10% van de verwarming in de gebouwde omgeving. Dat is geen harde keuze, maar een aanname in de berekening.

Warmtenetten kunnen niet overal worden gerealiseerd en zijn afhankelijk van voorhanden CO<sub>2</sub>-vrije warmtebronnen. De huidige warmtenetten lopen op restwarmte van centrales, die niet CO<sub>2</sub>-vrij is. Dit kan in de toekomst nog verminderen door het toenemend aandeel duurzame elektriciteitsproductie waardoor de centrales worden teruggedrongen in een back-up rol. Er is dus de challenge om de warmtebronnen te verduurzamen; hierover is nog veel onduidelijkheid. Industriële restwarmte kan wellicht meer bijdragen, in concurrentie met besparingen in de industrie zelf<sup>5</sup>. Ook is goed denkbaar dat geothermie (in onze berekeningen meegenomen voor glastuinbouw) ook doorbreekt voor bestaande bouw. Beide opties kennen nog onzekerheden.

Voor beide scenario's veronderstellen we het transitiepad voor de bulk van de gebouwde omgeving met individueel te nemen maatregelen: energiebesparing, elektrificatie (op CO<sub>2</sub>-vrije stroom!) en groen gas (met Nederlandse biomassa, zie eerdere aanname). Dat geeft een basisprojectie in beide scenario's met verzekerde zekere realisering van de CO<sub>2</sub>-reductie. Mochten warmtenetten bijvoorbeeld op geothermie wel goed voorhanden komen, dan is dit een mogelijke meevaller in beide scenario's.

<sup>5</sup> Waarbij CO<sub>2</sub>-reducties binnen de industrie wel meetellen voor ETS en rijksoverheid, maar restwarmtelevering (nog) niet

### CO<sub>2</sub>-vrij gas in beide scenario's cruciaal: vooral waterstof, uit verschillende oorsprong

In beide scenario's is het technisch mogelijk om te komen tot een volledig CO<sub>2</sub>-vrij energiesysteem. Daarbij is CO<sub>2</sub>-vrij gas, vooral waterstof, de sleutel.

In verschillende andere scenario's voor 2050 opgesteld de afgelopen jaren, wordt vaak geïmporteerde biomassa gebruikt als sluitpost om uiteindelijk tot een CO<sub>2</sub>-neutraal systeem te komen. Wij hebben er voor gekozen om dat hier niet te doen.

Het moleculen en het elektronen scenario hebben als uitgangspunt om de opslag-gebonden primaire energievraag in te vullen met CO<sub>2</sub>-neutraal gas, vooral waterstof.

In het elektronen scenario is dit voornamelijk te verklaren door het grote aandeel duurzame bronnen (zon en wind), waterstofproductie uit een omvangrijk vermogen aan wind en volledige elektrificatie van de gebouwde omgeving.

In het moleculen scenario komt de waterstof uit hoogcalorisch gas of LNG gesplitst met pre-combustion CCS, en er is post-combustion CCS in de staalindustrie. De gebouwde omgeving wordt verwarmd door hybride elektrificatie met groen gas. Er wordt geen windenergie omgezet in waterstof.

Verder wordt er in beide scenario's groen gas toegepast. Dit aandeel is geschat op 4 BCM<sup>6</sup>.

In het moleculen scenario wordt de totale groen gas productie in de gebouwde omgeving ingezet. In het elektronen scenario wordt het groene gas verdeeld over de vraag in alle sectoren.

#### Elektronen



- Zeer grootschalig inzetten op hernieuwbare bronnen zon en wind
- Waterstof uit wind + elektrolyse voor de industrie en gas (waterstof) centrales
- Toepassen van volledige elektrificatie oplossingen in de industrie incl. E-boilers
- Inzet all-electric warmtepompen in de bestaande gebouwde omgeving

#### Moleculen

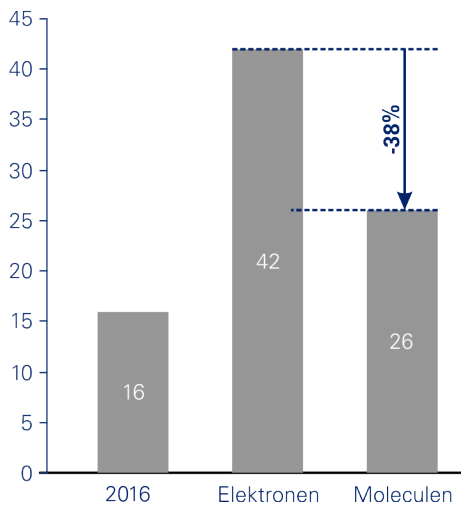


- Waterstof uit hoogcalorisch gas of LNG met pre-combustion CCS, voor industrie en gas(waterstof) centrales.
- Post-combustion CCS staalindustrie, AVI's
- Toepassen van besparende (hoog-COP) elektrificatie oplossingen in de industrie
- Hybridiseren in de bestaande gebouwde omgeving door middel van hybride warmtepompen en groen gas.

<sup>6</sup> Deze aanname is gebaseerd op een voorzichtige extrapolatie van het ECN scenario: Centralized Climate Action 2035, waarbij 3 BCM groen gas beschikbaar is in 2030. Grootschalige biomassa import wordt niet aangenomen.

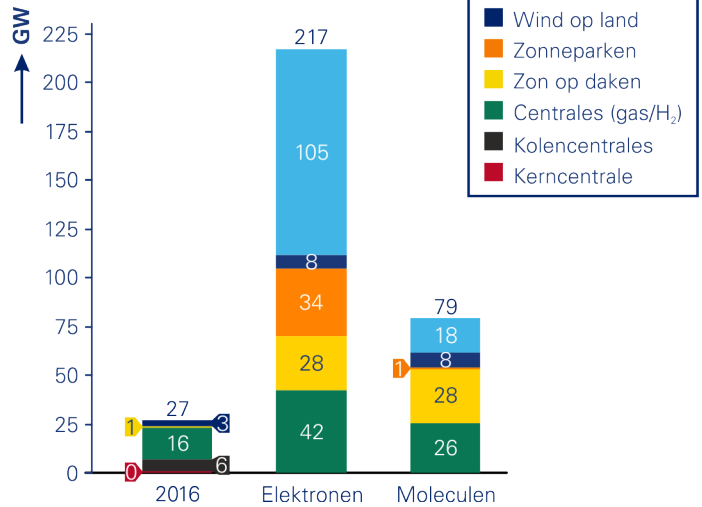
## Beide visies verschillen erg in het op te stellen productiepark

### Maximale piekvermogen (in GW)



**Figuur 4.** Maximale piekvermogen in GW.

### Opgesteld vermogen (in GW)



**Figuur 5.** Opgesteld vermogen in GW.

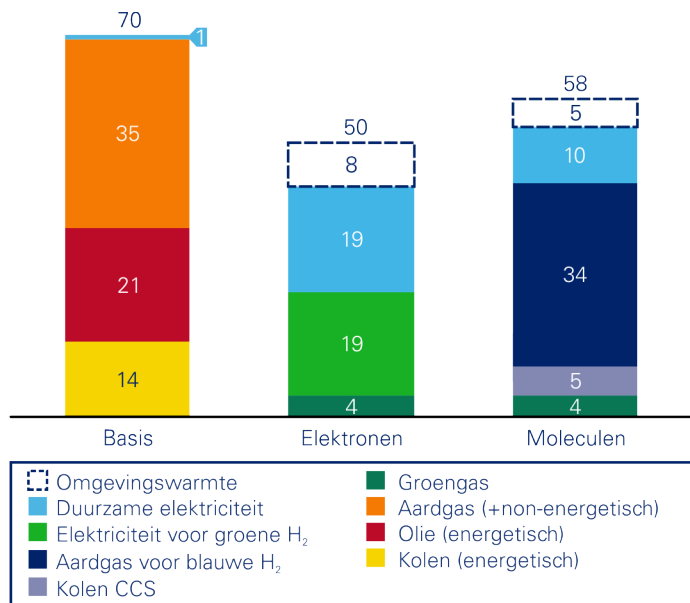
Het productiepark is in beide scenario's is gebaseerd op het maximaal benodigde piekvermogen (in de koudste winterweek) en de totale elektriciteitsvraag. Het aantal centrales in beide scenario's is gedimensioneerd op de piekvraag<sup>7</sup>. De rest van het productiepark op totale energievraag.

In het elektronen scenario zijn aanzienlijk meer windmolens op zee en zonneparken nodig. Dit opgestelde vermogen kan niet altijd draaien waardoor er fors meer vermogen nodig is. Daarnaast wordt voor de productie van groene waterstof ongeveer 40% van het windparkvermogen ingezet.

In het moleculen scenario staan minder centrales vanwege een lagere maximale piekvraag op de koudste dagen, vooral in de gebouwde omgeving. Dit komt omdat er minder is geëlektrificeerd. Daarnaast draaien de centrales meer uren in vergelijking met de centrales in het elektronen scenario.

<sup>7</sup> In het moleculen scenario is het vermogen windenergie op zee gelijk aan de totale piekvraag, zodat op windrijke dagen het hele piekvermogen door wind op zee gedekt kan worden.

**De huidige primaire gas-, kolen- en olievraag worden in 2050 voornamelijk ingevuld door duurzame elektriciteit, waterstof (blauw en groen) en groen gas**



**Figuur 6.** Verdeling primaire energievraag in 2050 ten opzichte van 2016 (miljard kuub aardgas equivalenten)<sup>8</sup>

In beide scenario's is er gas nodig voor om te voorzien in de primaire energievraag. De getallen in de grafiek zijn gebaseerd op de binnenlandse vraag, export is hierin niet meegenomen.

De gasvraag in het elektronen scenario is significant minder dan de gasvraag in het moleculen scenario.

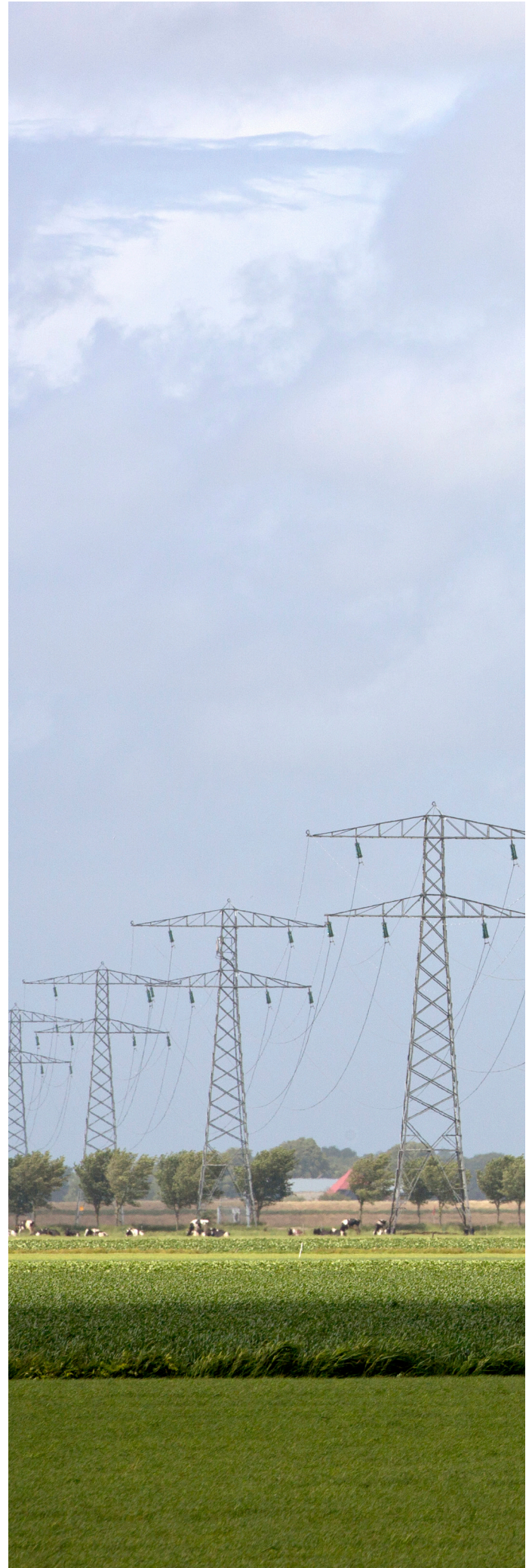
In het elektrificatie scenario is de gebouwde omgeving volledig geëlektrificeerd met de elektrische warmtepomp en worden in de industrie waar mogelijk elektrische boilers, Mechanical Vapour Recompression (MVR) en HT-warmtepompen ingezet. Resterende gas-, olie en kolenvraag worden vervangen door waterstof en groen gas.

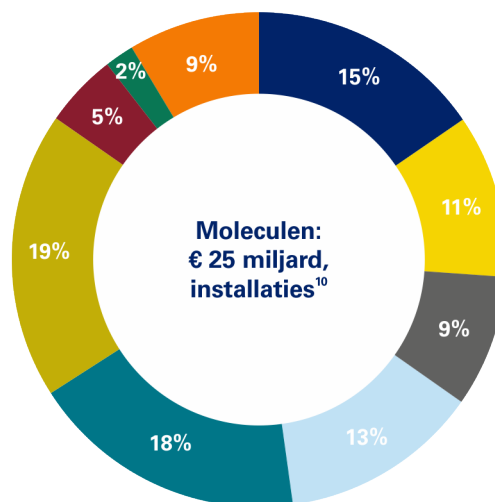
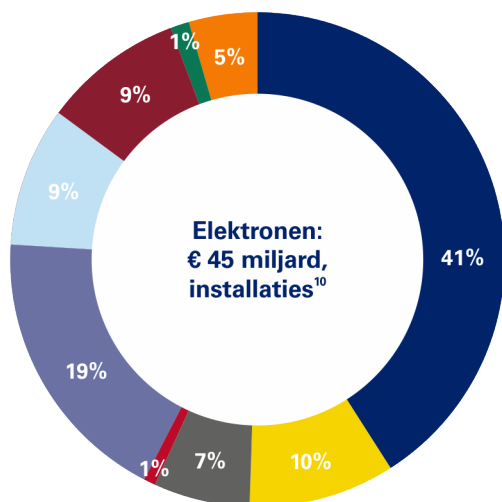
In het moleculen scenario wordt pre-combustion CCS toegepast bij hoogcalorisch gas of LNG. Bij kolen wordt uitsluitend post-combustion toegepast. CO<sub>2</sub>-afvangmethoden kosten tegelijkertijd veel meer energie.

In beide scenario's wordt dezelfde hoeveelheid groen gas toegepast (4 BCM). In het moleculen scenario wordt dit volledig in de gebouwde omgeving ingezet.

De inzet van waterstof in het moleculen scenario is met name een stuk hoger vanwege het hogere aantal draaiuren van de gascentrales.

<sup>8</sup> Conversieverliezen zijn meegenomen in de gepresenteerde categorieën.



**Vershil totale jaarlijkse kosten (alle sectoren) aanzienlijk tussen scenario's**Elektronen: totaal € 45 miljard per jaar<sup>9</sup>Moleculen: totaal € 31 miljard per jaar<sup>9</sup>**Elektronen: € 0 miljard, geen brandstof**

Installaties voor de productie van groengas, groene H<sub>2</sub> en elektriciteit verbruiken geen brandstof, maar produceren deze en hebben dus geen brandstofkosten.

Installaties voor blauwe H<sub>2</sub> productie verbruiken wel brandstof in de vorm van hoogcalorisch gas en hebben daarmee wel brandstofkosten, net zoals voor kolen CCS

**Moleculen: € 6 miljard, brandstof****Figuur 7.** Elektronen €45<sup>9</sup> miljard, alleen installaties.**Figuur 8.** Moleculen € 31<sup>9</sup> miljard, installaties en brandstof.**Groene waterstofproductie lijkt duurder dan blauwe waterstofproductie**

Het verschil in kosten tussen de scenario's is grotendeels te verklaren door de grote verschillen in de beide productieparken.

- In het elektronenscenario worden ongeveer twee derde van de kapitaal, beheer en onderhoudskosten gemaakt door wind en elektrolyse.
- Dit is in verhouding veel meer dan de kosten die moeten worden gemaakt voor blauwe CO<sub>2</sub>-vrije waterstof. Hiervoor zijn investeringen in productiecentrales en bijbehorende CO<sub>2</sub>-afvang nodig. Echter zijn deze een stuk lager vergeleken met de investeringen voor wind op zee en elektrolyse.

Aannames op het gebied van kostendalingen voor wind op zee en elektrolyse zijn op dit moment aan discussie onderhevig. Voor wind op zee hebben we al een kostenreductie voorzien van 50% ten opzichte van huidige kosten eind 2017. Naast deze kostendaling hebben we meer draaiuren berekend voor wind plus elektrolyse omdat deze windparken verder op zee staan, groter worden en geen peakshaving kennen.

Ondanks deze ingecalculerde kostendaling is het verschil nog steeds groot tussen beide scenario's en kost het in verhouding meer om groene waterstof te produceren in vergelijking met blauwe waterstof.

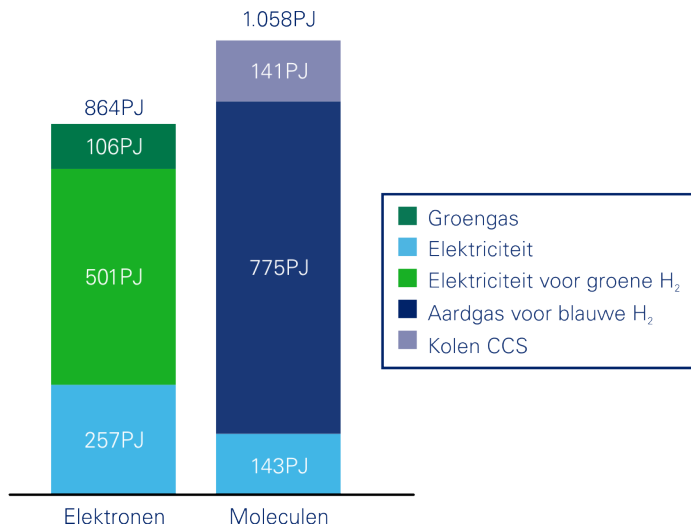
- Dit verschil kan kleiner worden als de kosten in de toekomst verder reduceren, vooral voor elektrolyse.
- Het verschil kan ook groter worden als we de investeringen in wind plus elektrolyse eerder proberen te doen, omdat er dan minder tijd is voor het realiseren van de benodigde kostenreductie.<sup>10</sup>

De kosten in het elektronen scenario worden mede veroorzaakt door de productie van groene waterstof nodig om via centrales elektriciteit op te wekken voor de momenten dat wind en zon niet toereikend zijn. Ongeveer 30% van de groene waterstof die wordt geproduceerd uit elektriciteit (wind op zee) wordt weer ingezet voor elektriciteitsproductie door middel van gas(waterstof)centrales.

<sup>9</sup> Totale energiesysteemkosten nu: €22 miljard (11 miljard installaties, 11 miljard brandstof)

<sup>10</sup> Installaties bestaat uit kapitaal-, beheer, operationele- en onderhoudskosten.

**Sector industrie: grote verschillen qua mix van energiedragers**



**Figuur 9.** Verdeling energiedragers naar primaire vraag in de industrie in 2050

In het elektronen scenario worden waar mogelijk de industriële processen geëlektrificeerd. Dit betreft in 2050 circa 30% van de industriële warmtevraag.

Daarnaast schakelen aardgas- en kolen gebruikers (de staalindustrie als majeure kolen gebruiker) over op waterstof uit wind.

In het moleculen scenario wordt in de industrie hoofdzakelijk waterstof uit hoogcalorisch gas toegepast (pre-combustion CCS).

Alleen in de metaalindustrie wordt post-combustion CCS ingezet vanwege de grote hoeveelheid kolen die daar worden gebruikt.

De verdeling van groen gas over de sectoren is in beide scenario's verschillend. In het moleculen scenario is groen gas nodig voor de gebouwde omgeving waardoor er niks overblijft voor de andere sectoren.

In het elektronen scenario is er geen groen gas nodig vanwege volledige penetratie in de gebouwde omgeving waardoor er meer groen gas kan worden ingezet in de industrie.

Door inzet van flexibiliteitsopties, met name power to heat is de primaire energievraag gedaald.

Nog niet onderzocht: verbeteringspotentieel industriële warmtehuishouding en vergaande elektrificatie

**Sector Gebouwde omgeving: hybride en all-electric**

De woningvoorraad groeit tot 8.477.200 in 2050 maar de energievraag in de gebouwde omgeving daalt de komende jaren door toepassing van (na-)isolatie en efficiëntere technieken.

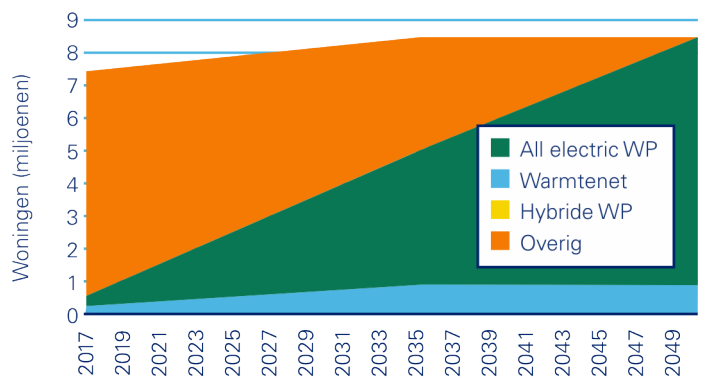
Het aantal elektrische apparaten in huishoudens is in 2050 fors toegenomen, maar door aanzienlijke efficiencyverbeteringen is de elektriciteitsvraag voor verlichting en apparaten ongeveer gelijk aan het niveau van 2015.

In beide scenario's worden per jaar ~60.000 nieuwbouw-woningen voorzien van Rc-waarde (isolatie) 5 en all-electric warmtepompen.

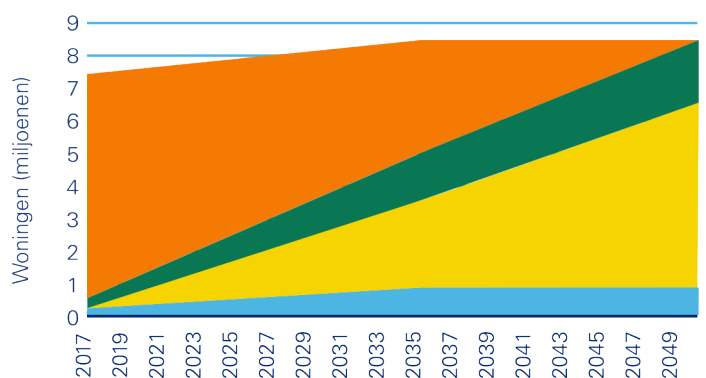
Per jaar worden er tot aan 2035, ~ 170.000 bestaande woningen geïsoleerd naar Rc-waarde 1,8. Vanaf 2035, ~135.000 woningen per jaar naar Rc-waarde 2,8.

Nieuwbouwwoningen worden gebouwd met vloerverwarming en bestaande woningen die naar hybride gaan krijgen convectoren, bestaande woningen die naar all-electric gaan krijgen vloerverwarming.

In het moleculen scenario worden geen losse HR-ketels meer geplaatst, alleen in combinatie met een warmtepomp. Penetratie van hybride warmtepompen tot aan 2050 is 180.000 per jaar.<sup>11</sup>



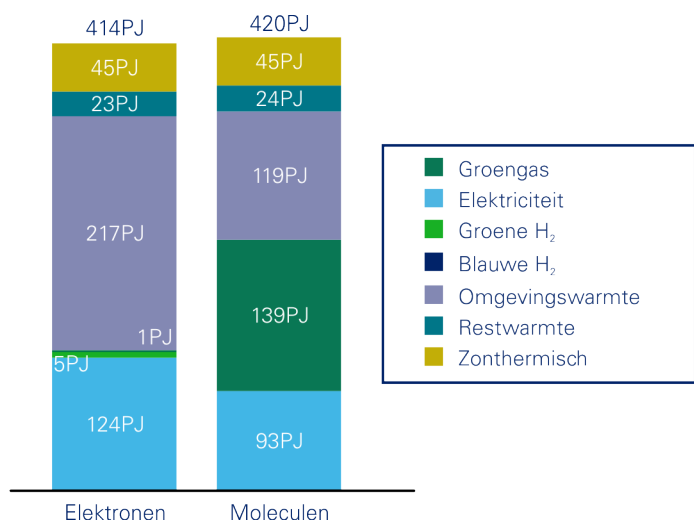
**Figuur 10.** Elektronen



**Figuur 11.** Moleculen

<sup>11</sup> Om een beter vergelijk te maken tussen elektrificatie en hybride zijn warmtenetten en geothermie voor LT warmte in beide scenario's gelijk gehouden en beperkt in omvang.

### Mogelijke energiedragers in de gebouwde omgeving



**Figuur 12.** Verdeling energiedragers naar finale vraag in de gebouwde omgeving in 2050. Erratum: dit figuur bevat ook visualisering van restwarmte en zon-thermisch.

De energievraag is in beide scenario's gelijk maar de verdeling van energiedragers behoorlijk verschillend.

Het elektrificatie scenario is efficiënter en heeft minder primaire vraag vanwege het grote aantal elektrische warmtepompen. Het aandeel omgevingswarmte (uit lucht of bodem) is hier ook een stuk hoger.

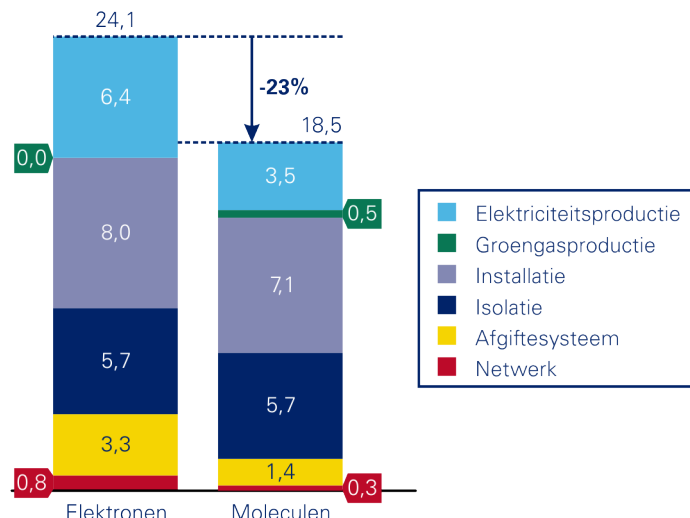
In het moleculen scenario zijn in de bestaande bouw hoofdzakelijk hybride warmtepompen toegepast die voor een gedeelte van het jaar (de koudere weken) op groen gas draaien.

In tijden van piekbelasting kan dus desgewenst van elektriciteit naar gas worden overgeschakeld.

In het moleculen scenario's zal de benodigde hoeveelheid CO<sub>2</sub>-vrij gas in de gebouwde omgeving in 2050 circa 4 BCM (aardgas equivalent) bedragen.

Het aantal gascentrales dat nodig is voor het opvangen van de piekvraag wordt hiermee met ongeveer 5GW gereduceerd ten opzichte van het elektronen scenario.

### Kostenverdeling in de gebouwde omgeving voor het energiesysteem



**Figuur 13.** Verdeling kosten gebouwde omgeving in miljarden euro's.

Voor de gebouwde omgeving is het moleculen scenario ongeveer 23% goedkoper dan het elektronen scenario.

De kosten die in de woningen en gebouwen moeten worden gemaakt spelen een grote rol bij de totstandkoming van de totale kosten in de gebouwde omgeving.

De kosten voor isolatie, de techniek (incl. PV op daken) en het afgiftesysteem domineren het kostenbeeld. De netwerkkosten zijn relatief laag vergeleken met de andere kosten die moeten worden gemaakt.

De grootste verschillen tussen de scenario's zitten met name in het afgiftesysteem. Daarnaast zit een klein verschil in de kosten van de techniek omdat een hybride warmtepomp goedkoper is dan een all-electric warmtepomp.

De toegerekende kosten van de energieproductie (elektriciteit en groen gas) zijn voor beide scenario's verschillend. **Zes miljard voor elektronen en vier miljard voor moleculen.**

# Belangrijkste conclusies





## De scenario's verschillen sterk, maar hebben beide een waterstof infrastructuur

### Elektronen scenario

- Veel extra centrales nodig om de piekvraag op te vangen, met gemiddeld weinig draaiuren
- Het benodigde windvermogen offshore is zeer groot (105 GW).
- De totale kosten liggen een stuk hoger vergeleken met het moleculen scenario
- Energie-efficiënter vanwege minder conversieverliezen en geen gebruik van CCS
- Er wordt geen gebruik gemaakt van fossiele brandstoffen
- *Essentieel is een waterstof infrastructuur, in dit scenario gevoed door offshore wind + elektrolyse*

### Moleculen scenario

- Minder extra centrales nodig, die elk gemiddeld meer draaiuren maken
- Extra benodigde windenergieparken zijn minder groot en beslaan een minder groot areaal
- De totale kosten vallen flink lager uit dan in het elektronen scenario
- Meer energieverbruik dan in het elektronenscenario, vooral door conversieverliezen en CCS
- De gasvraag (hoogcalorisch of LNG, voor blauwe waterstof) blijft vrijwel gelijk aan huidige niveau
- *Essentieel is een waterstof infrastructuur, in dit scenario gevoed door gas pre-combustion CCS*

## De scenario's zijn goed te combineren; het beeld is nog niet af

De scenario's sluiten elkaar niet uit; combinaties zijn goed denkbaar.

Twee voorbeelden:

- In het moleculen scenario staan vooral hybride warmtepompen, in het elektronen scenario all-electric warmtepompen. Deze kunnen ook volgtijdelijk (eerst hybride, dan all-electric). Zie illustratie, bijlage 1.
- Beide scenario's gebruiken waterstof; alleen de bron ervan verschilt (groen of blauw). Beide maken gebruik van dezelfde waterstofinfrastructuur (ombouw huidige gasinfra)<sup>12</sup>. Zie illustratie, bijlage 2.  
Zo kunnen we makkelijk overschakelen als waterstof uit wind en elektrolyse goedkoper wordt (of zelfs met import van waterstof uit zonne-energie uit het buitenland).

Tenslotte: mogelijkheden met duurzame warmte en restwarmte konden in dit kader nog niet goed worden verkend.

Deze mogelijkheden zijn nog niet voldoende helder, maar kunnen substantieel zijn

Bij voldoende bijdrage kan dit een extra bijdrage leveren waardoor de tegenstellingen tussen het 'elektronen' en 'moleculen' scenario worden verminderd.

Voorstel is om (na gedegen inventarisatie geothermie) een 'warmtescenario' te maken.

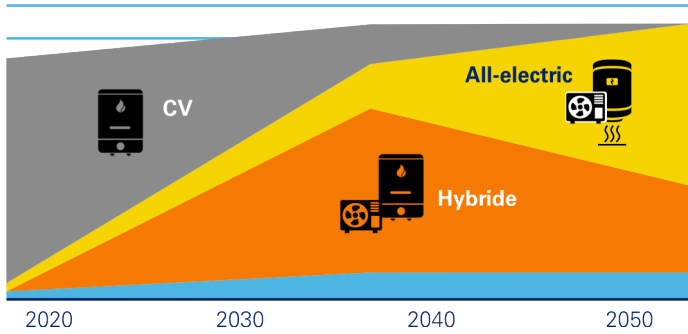
<sup>12</sup> Deze synergie in waterstof infrastructuur geldt alleen bij een keus voor pre-combustion CCS

**Bijlage 1.**

Illustratie synergie moleculen en elektronen scenario's

***Van hybride naar all-electric in de gebouwde omgeving: brug naar een schone gebouwde omgeving***

- Snelle en efficiënte reductie aardgasvraag en CO<sub>2</sub>-emissies met hybride WP
- Infasering van all-electric WP in tweede vervangingsronde (vijftienjarige cyclus)



**Figuur 14.** Hybride en all-electric zijn complementair. De opgave in de gebouwde omgeving is groot en divers; er is ruimte voor beide. De combinatie maakt meer snelheid.

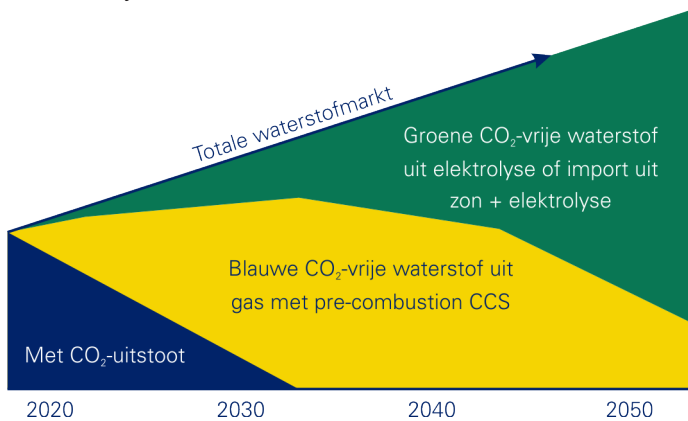
**Bron:** Presentatie Berenschot, brede bijeenkomst transitiepad lage temperatuurwarmte, 27 september 2017

**Bijlage 2.**

Illustratie synergie moleculen en elektronen scenario's

***Van blauwe naar groene waterstof: brug naar een schone waterstofeconomie***

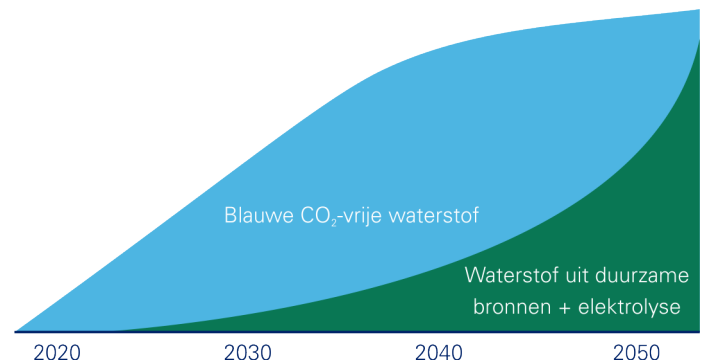
- Snel waterstofinfrastructuur, CO<sub>2</sub>-vrij, op basis van blauwe waterstof
- Ingroei groene waterstof (wind + elektrolyse) op dezelfde infrastructuur; mede afhankelijk van kostendaling wind en elektrolyse



**Figuur 15.** Groeipad voor duurzame waterstof (schematisch)

**Bron:** Eindrapport CO<sub>2</sub>-vrije waterstofproductie uit gas. Berenschot en TNO, 29 november 2017

Blauwe en Groene Waterstof zijn niet elkaars concurrenten: vraag naar waterstof zal zeer sterk stijgen; er is ruimte voor beide. De combinatie maakt meer snelheid.



**Figuur 16.** Illustratie jaarlijkse CO<sub>2</sub>-reductie (schematisch)

Van blauwe naar groene waterstof: effect cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie (carbon budget effect).

- Alleen groene waterstof: CO<sub>2</sub>-reductie komt laat
- Met kickstart blauwe waterstof: CO<sub>2</sub>-reductie start snel en cumulatief veel groter

### **Elektronen en/of Moleculen**

*Twee transitiepaden voor een CO<sub>2</sub>-neutrale toekomst*

Bert den Ouden  
Peter Graafland  
Jan Warnaars

*b.denouden@berenschot.nl*

*Scenarioanalyse financieel ondersteund door:*





# Berenschot

Berenschot is een onafhankelijk organisatieadviesbureau met 350 medewerkers wereldwijd. Al 80 jaar verrassen wij onze opdrachtgevers in de publieke sector en het bedrijfsleven met slimme en nieuwe inzichten. We verwerven ze en maken ze toepasbaar. Dit door innovatie te koppelen aan creativiteit. Steeds opnieuw. Klanten kiezen voor Berenschot omdat onze adviezen hen op een voorsprong zetten.

Ons bureau zit vol inspirerende en eigenwijze individuen die allen dezelfde passie delen: organiseren. Ingewikkelde vraagstukken omzetten in werkbare constructies. Door ons brede werkerrein en onze brede expertise kunnen opdrachtgevers ons inschakelen voor uiteenlopende opdrachten. En zijn we in staat om met multidisciplinaire teams alle aspecten van een vraagstuk aan te pakken.

## **Berenschot Groep B.V.**

Europalaan 40, 3526 KS Utrecht

Postbus 8039, 3503 RA Utrecht

030 2 916 916

[www.berenschot.nl](http://www.berenschot.nl)

[in /berenschot](https://www.linkedin.com/company/berenschot)