

## Waterstofeconomie.

*Waterstof is geen energiebron, maar een energiedrager*

F.Udo, 26 aug 2018

### Inleiding

Het is vijf jaar geleden, dat met veel publiciteit en enthousiaste commentaren het Energieakkoord werd gesloten. Het verstoken van fossiele brandstoffen zou in hoog tempo vervangen worden door gratis wind en zonne-energie. Langzaam breekt er nu het besef door, dat energie uit oncontroleerbare bronnen nooit in staat zal zijn de plaats in te nemen van vraaggestuurde energie zonder dat grootschalige energieopslag beschikbaar komt. Het verbaast dan ook niet dat de media ons nu overspoelen met verhalen over technieken die energieopslag zullen gaan verzorgen. Nog recentelijk concentreerde de opslaghype zich vooral op de grootschalige inzet van accu's. Die hype is onder druk van de realiteit aardig geluwd. Sinds enige tijd wordt alle heil verwacht van wat men de waterstofeconomie noemt. Matthijsen<sup>i)</sup> heeft al een oordeel gegeven. Dit stuk geeft een strikt cijfermatige beschouwing daarover. De conclusies laten weinig ruimte voor waterstofoptimisme.

### 1. Windstroom in 2030

Er worden nu in het kader van het nieuwe klimaatakkoord vergaande scenario's opgesteld voor de vergroening van onze stroomvoorziening. Men zet hoog in op windenergie. Een gematigd scenario van het PBL voorziet 10GW wind op land en 10GW wind op zee in 2030. Hierbij moet worden aangetekend, dat door de geringe levensduur van zwaaiपालen het bestaande windvermogen in Nederland voor 2030 in zijn geheel vervangen moet worden.

Het CBS rapporteert 3245MW op land en 957MW op zee in 2018.

In de volgende 12 jaar zal de vraag naar stroom stijgen, want wij mogen geen gas meer gebruiken en de auto's hangen in 2030 allemaal aan de laadpaal.

Deze toekomstmuziek is niet in rekening gebracht, dus het stroomverbruik blijft in onze berekening constant tot 2030.

Stellen wij de gemiddelde capaciteitsfactor<sup>a)</sup> van de toekomstige Nederlandse zwaaiपालen op land en op zee samen op 30%, dan is de totale stroomproductie van 20GW windvermogen per jaar:

$$0,3 \times 20GW \times 8760uur = 52560GWh$$

De totale productie uit 20GW windvermogen is dan 44% van het totale Nederlandse stroomverbruik van 120000GWh. De klimaattafel energie denkt dat 44% windvermogen ingepast kan worden in het elektriciteitsnet, zodat de rest met het verstoken van biomassa en het plaatsen van zonnepanelen opgelost kan worden, maar in 2030 moeten de kolencentrales, die dit kunnen, volgens deze zelfde klimaattafel gesloten zijn....

Het aandeel van 44% wind in de elektriciteitsproductie is niet zonder grote verliezen in te passen in ons distributienet. Dit is eenvoudig uit te leggen.

Stel het opgestelde windvermogen is gelijk aan de stroomvraag, dan is de gemiddelde bijdrage van wind in het stroomnet gelijk aan de eerder gedefinieerde capaciteitsfactor van 30%. In dit geval varieert de instantane bijdrage van windstroom tussen 0% van de vraag bij windstilte en 100% van de vraag bij windkracht 6 of meer. Wordt het opgestelde windvermogen groter dan de vraag, dan wordt er bij harde wind teveel

---

<sup>a)</sup> Zwaaiपालen werken nooit continu op vol vermogen, want de productie van windstroom is onderworpen aan de grillen van de wind. De productie is nul bij windstilte en de molen levert vol vermogen bij windkracht 6 of meer. Het gemiddelde geleverde vermogen is dus een fractie van het nominale vermogen. Deze fractie is de capaciteitsfactor. Hierin moeten ook factoren als stilstand door onderhoud en reparatie in verdisconteerd worden.

stroom geproduceerd. Er zijn andere factoren in het distributienet, die de inpassing van wiebelstroom bemoeilijken, maar zonder compenserende maatregelen kan het maximum aandeel windstroom hoogstens gelijk zijn aan de capaciteitsfactor. Dit is dus in ons geval 30% en geen 44%.

Het aandeel van gas in de stroomvoorziening is dan nog steeds 70%, terwijl het rendement van de gascentrales serieus wordt aangetast.<sup>[ii]</sup>

Dit is alleen op te lossen door stroomoverschotten op te slaan en te gebruiken bij weinig wind.

Op deze manier kan een constante stroom (basislast) gegenereerd worden gelijk aan het totale vermogen vermenigvuldigd met de capaciteitsfactor. In 2030 zal dit dus zijn:  $0,3 \times 20\text{GW} = 6\text{GW}$ . Dit betekent, dat alle windstroom boven de 6 GW in de opslag verdwijnt en er weer uitkomt bij weinig wind.

De berekeningen gemaakt om te zien hoe windstroom via opslag tot basislast gepromoveerd kan worden laten zien, dat er veel opslag nodig is. De voorgestelde technieken zijn of niet mogelijk in Nederland (waterkracht) of zijn te duur (accu's). Deze berekeningen brengen verliezen bij de opslag *niet* in rekening <sup>[iii]</sup>.

*De omzetting van elektriciteit in gas is voor Nederland de enig mogelijke vorm van grootschalige opslag van windstroom.*

## 2. Waterstof

De productie van waterstof door elektrolyse van water wordt nu voorgesteld als de ultieme oplossing van het opslagprobleem voor windstroom.

*Het idee is om overtollige windstroom via elektrolyse van water om te zetten in waterstofgas en dat gas dan op te slaan voor de periode dat er niet voldoende wind is.*

Waterstof is geen energiebron, maar een energiedrager.

Per kilogram is waterstof een goed medium:

Brandstof	MJ/kg
Waterstof	141,80
Methaan	55,50

Bron Wikipedia

Puur waterstofgas is een onhandelbaar goedje en weegt maar 0,1 gram per liter bij normale temperatuur en druk (NTP). Het condenseert pas bij temperaturen onder de - 253 graden Celsius (20 Kelvin).

Het energetisch rendement van het elektrolyseproces is ongeveer 75% <sup>[iv]</sup>.

Dit betekent, dat 25% van de energie verloren gaat.

Deze waterstof moet onder hoge druk (300 tot 700 atmosfeer) worden opgeslagen.

Het verlies in die bewerking is 10 tot 20% van de energie-inhoud van het gas..

Bij omzetting naar elektriciteit van waterstof in een brandstofcel of klassieke turbine is het rendement maximaal 60%. De rest gaat net als bij verbrandingsmotoren op in warmte.

Het nadeel van brandstofcellen is het feit dat zij nog niet zonder platina in de elektroden kunnen. Dit maakt brandstofcellen duur, en de levensduur is beperkt.

Hieronder een uittreksel uit een verkoopbrochure.

<https://www.waterstof-centrum.nl/product/hh-2400w-pem-brandstofcel>

De HH - 2400W micro brandstofcel heeft een gepatenteerd ontwerp met vloeistofkoeling en thermisch beheer. Dit resulteert in een brandstofcel met een stabiele werking onder dynamische belastingen.

De beste materialen van toonaangevende leveranciers worden in het systeem geïntegreerd. Dat heeft geleid tot een levensduur van ca. **3.500 uur** op basis duurzaamheids testen. Testen hebben zowel op testbanken als in real-life omgevingen plaatsgevonden. De cel efficiency is **48%**.

Let wel: De levensduur is 3500 uur en het rendement is niet groot.

Bij een cyclus van 10 uur per dag stroomlevering moet het apparaat elk jaar vervangen worden.

Gasturbines hebben een veel langere levensduur en daarbij wordt de traagheid van de turbinerotor gebruikt voor de stabilisatie van het net. Hierbij is door het vele regelen het rendement verre van optimaal. Dit rendement stellen wij op 50%.

De verliezen in de cyclus [windstroom - waterstof – netstroom] zijn dus:

1. Elektrolyse van water. Rendement 75%
2. Compressie en opslag. Rendement 90%
3. Omzetting naar netstroom Rendement 50%

Er blijft  $0,75 \times 0,90 \times 0,50 = 34\%$  over van de oorspronkelijke hoeveelheid stroom.

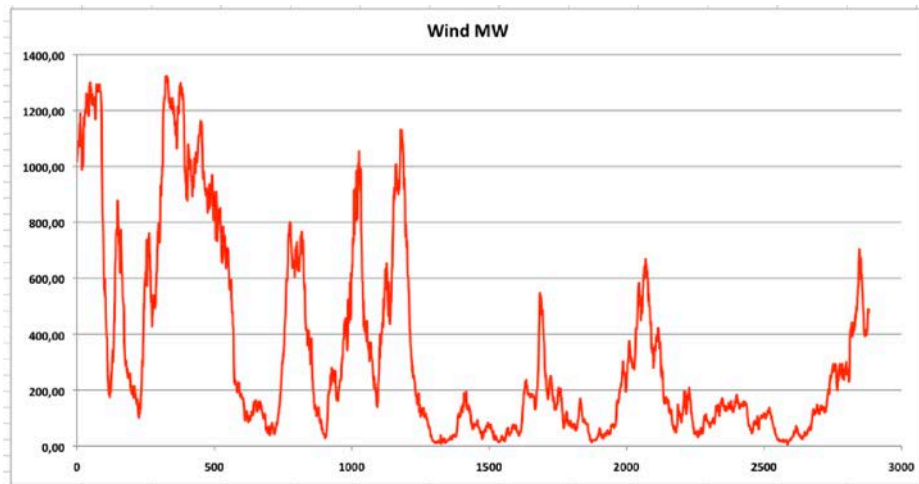
De waterstof cyclus kost dus veel stroom Als alle windstroom opgeslagen zou worden, dan blijft er maar een derde over. Het rendement kan drastisch verbeterd worden door alleen de overtollige windstroom op te slaan en de rest direct in het net te voeden.

### **3. Een voorbeeld van inpassing van windstroom in het net**

Het percentage overtollige windstroom is afhankelijk van het profiel van de windsterkten. Dit is bepaald uit de gegevens van de totale Ierse windstroomproductie gedurende de maand april 2011. Het geïnstalleerd vermogen was toen 1400MW.

De geleverde windstroom werd elke 15 minuten geregistreerd, dus er zijn  $30 \times 24 \times 4 = 2880$  meetpunten.

Grafiek 1: De windstroom geleverd door 1400MW windvermogen als functie van de tijd.



Deze grafiek maakt duidelijk, dat windstroom zonder bewerking niet geschikt is als stroombron voor het elektriciteitsnet.

In grafiek 2 hieronder zijn deze meetpunten gerangschikt naar aflopende windstroom op posities genummerd 1 tot 2880. Positie 1 is de 15' periode met maximum vermogen, positie 2880 is het punt met minimum vermogen.

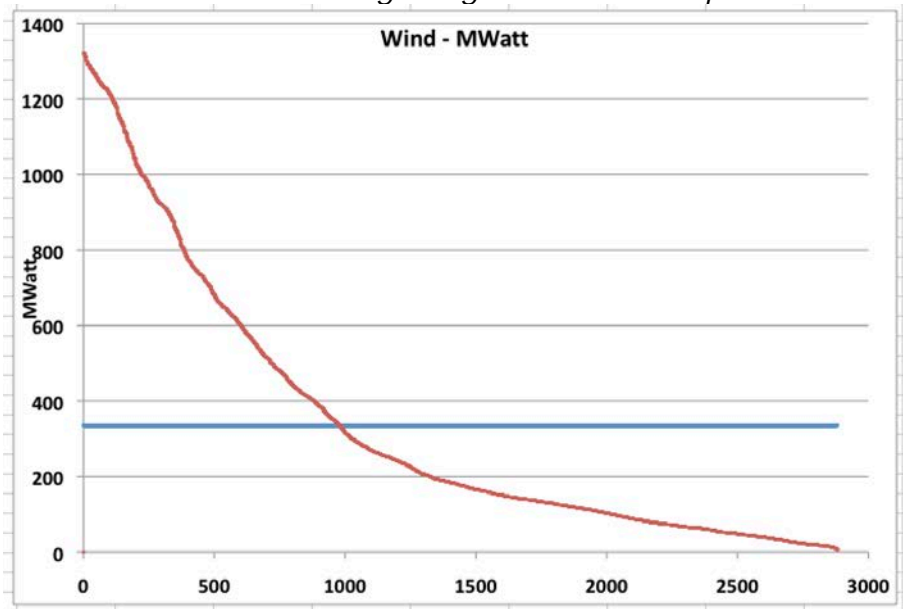
De verticale as is het windvermogen gedurende 15 minuten.

De rode lijn in grafiek 2 geeft het profiel van het geleverde windvermogen gedurende 30 dagen.

De blauwe lijn geeft het gemiddelde geleverde vermogen weer van 335MW.

Het gedeelte boven het gemiddelde is 42% van de totale productie.

Grafiek 2 De windstroom gerangschikt naar aflopende intensiteit.



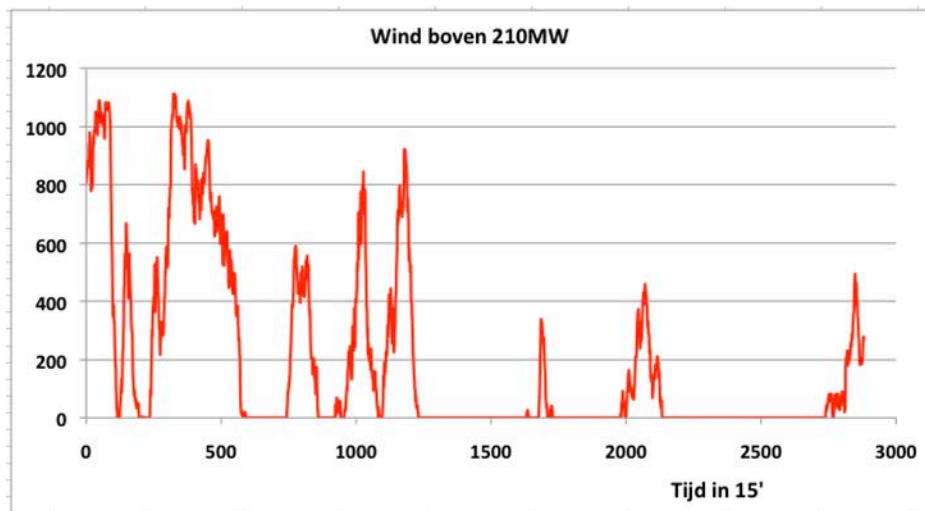
Door opslag in waterstof treden er verliezen op, dus er moet meer stroom beschikbaar komen om de dalen te vullen. Bij 34% rendement van de waterstofcyclus daalt de blauwe lijn van 335MW naar 210MW. Er is dus nu een continu vermogen van 210MW mogelijk, maar het uitgangsvermogen van zwaai-palen plus waterstoffabriek plus stroomgenerator zakt van 335MW naar 210MW continu.

De waterstofcyclus voor overtollige windstroom doet de netto stroomopbrengst dalen met een factor  $210/335 = 0,63$ .

*Dit is vrijwel een factor 2 beter dan het rendement van de waterstofcyclus voor de totale windstroom (34%).*

Hiermee zijn de variaties van de windstroom gecompenseerd door de pieken boven 210MW op te slaan en de dalen op te vullen met de stroom uit de opslag. Op deze manier wordt een continu vermogen van 210MW geproduceerd.

Het elektrolyseproces moet dan wel in staat zijn om de variaties in de overtollige windstroom te volgen zonder rendementsverlies. Grafiek 3 toont, dat dit geen eenvoudige opgave zal zijn.



Grafiek 3 *Het tijdsverloop van de ingangsstroom van het electrolyseproces.*

#### 4. Nederland in 2030

Terug naar ons toekomstbeeld van 20GW windvermogen.

De bruto opbrengst is 52560GWh windenergie. Dit wordt door de waterstofcyclus van de overtollige windstroom gereduceerd tot  $0,63 \times 52560 = 33100$ GWh. Dit is nu een constant vermogen van 3,8GW dat voorziet in 27,5% van het totale stroomvraag in Nederland per jaar.

*Met grootschalige toepassing van stroomopslag in waterstof moet in 2030 nog steeds 72,5% van ons stroomverbruik opgewekt worden door gascentrales. Het voordeel is, dat de windstroom is omgezet in vraaggestuurde stroom of basislast, zodat er inderdaad 27,5% bespaard kan worden op de gasrekening.*

*Theoretisch is opslag van windstroom in waterstof dus mogelijk, maar is het ook haalbaar?*

#### 5. De haalbaarheid.

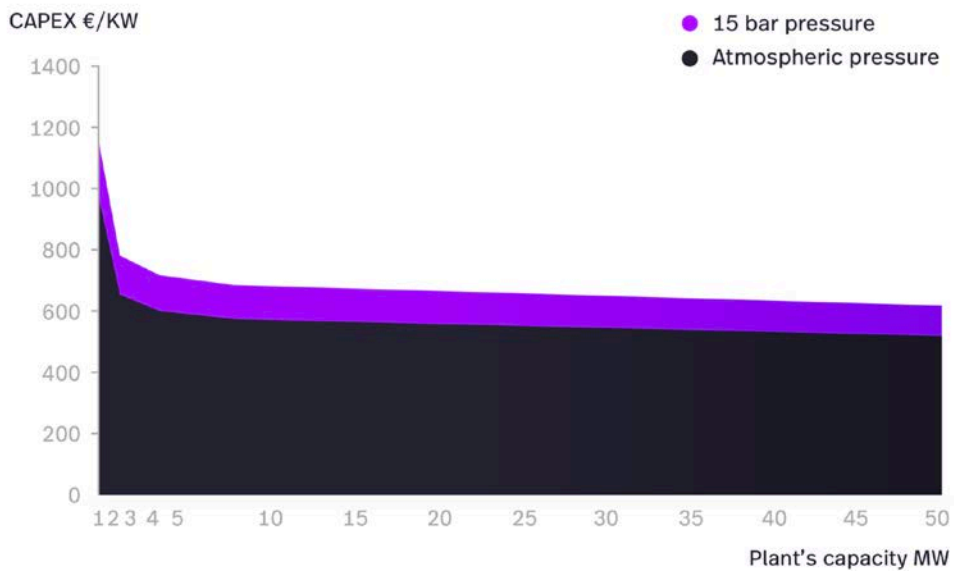
- Door de energieopslag zakt de opbrengst aan netstroom naar 63% van de opgewekte windstroom.
- Er moet naast de 20GW zwaaipalen een electrolysefabriek van ongeveer 16GW gebouwd en geëxploiteerd worden.

- c. De bijbehorende grootschalige opslag van waterstof onder hoge druk is nog een onopgelost probleem. Men denkt aan opslag in zoutkoepels, maar de haalbaarheid daarvan moet nog bewezen worden
- d. De energie investering in alle extra's moet van de opbrengst worden afgetrokken, dus de terugverdientijd van dit systeem zal (te) lang zijn.

Electrolysers zijn al lang op de markt.

De Noorse fabriek NEL levert standaard installaties tot 50MW ingangsvermogen

Daar leveren zij ook een kostenplaatje bij:



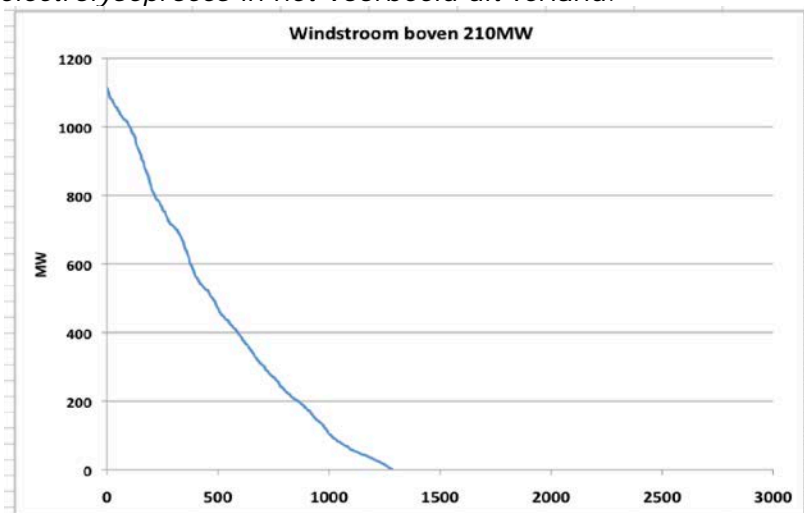
De prijs is ongeveer 700 euro/kW voor grote eenheden. De levensduur wordt door de fabrikant opgegeven als 60000 uur of 7 jaar.

Gezien deze levensduur moet de installatie wel in 5 jaar afgeschreven worden.

De input is de overtollige windstroom van de 20GW windvermogen, dus alle stroom, die geleverd wordt boven het constant vermogen van 3,8GW moet omgezet worden in waterstof. Die stroom is maximum  $20\text{GW} - 3,8\text{GW} = 16,2\text{GW}$

Dit vereist een piekvermogen van de waterstoffabriek van 16,2GW.

**Grafiek 4** geeft het profiel van de overtollige windstroom die als voeding dient voor de het electrolyseproces in het voorbeeld uit Ierland.



Het eerste wat opvalt, is dat de fabriek maar 50% van de tijd werkt en dat het gemiddelde vermogen de helft van de capaciteit is.

De waterstofproductie is dus maar 25% van de maximale hoeveelheid.

*De variaties van de windstroom zijn nu verplaatst naar het elektrolyse proces.*

De vaste kosten van de elektrolyse zijn hierdoor per eenheid waterstof met ruim een factor 4 toegenomen.

De waterstof enthousiast Van Wijk stelt in een van zijn vele voordrachten, dat waterstof uit elektrolyse fors goedkoper moet worden om groene waterstof als brandstof te kunnen gebruiken.

*In deze toepassing wordt waterstof minstens een factor vier duurder*

Een ruw overzicht van de kosten:

Investering 20GW wind	40 miljard euro <sup>(a)</sup>
Investering 16GW electrolyser	11 miljard <sup>(b)</sup>
Infrastructuur (transport,opslag)	5 miljard
Totaal	56 miljard euro

Afschrijving, kapitaalkosten en onderhoud bedragen per jaar 15% van de investering <sup>(c)</sup>.

De kosten per jaar zijn 15% van 56 miljard = **8,4 miljard euro per jaar**.

Dit zijn extra kosten voor het vergroenen van 27,5% van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. De besparing aan gas levert ongeveer 1,3 miljard per jaar op.

De prijs van de Nederlandse elektriciteit af centrale schommelt in 2018 rond 5 ct/kWh of 50 000 euro per GWh. (zie CBS statline)

De totale omzet van alle centrales is dus 6 miljard euro per jaar in 2018.

De kosten voor de Nederlandse stroom gaan van 6 miljard naar 13,1 miljard euro per jaar.

*De productiekosten van de Nederlandse elektriciteit verdubbelen door de vergroening van 27,5% ervan.*

---

(a) In deze schatting is 30% prijsverlaging in de periode 2018 tot 2030 verdisconteerd,

(b) De nominale levensduur is 60 000uur, maar dit geldt voor continue belasting, dus de afschrijvingstermijn kan groter worden dan de nominale levensduur.

(c) Dit is afgeleid uit de gepubliceerde gegevens van 600MW wind op zee.(Gemini)

## Appendix: Ammoniak opslag

Er kleven wat bezwaren aan de verwerking en grootschalige opslag van pure waterstof.

a. De lage dichtheid.

Zelfs samengeperst tot 500 atmosfeer weegt waterstof maar 50gram per liter, dus het benodigde volume per energie-eenheid is 15 maal hoger dan voor fossiele brandstof.

De suggestie van opslag in zoutkoepels is nog niet getest.

b. De lage viscositeit.

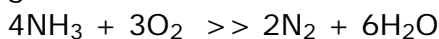
Iedere gasinstallatie lekt. De vraag is enkel hoeveel. We zeggen dat een installatie 'dicht' is als de lekken zo klein zijn dat ze ons niet meer storen, maar ze zijn er nog wel. Waterstof lekt meer dan andere industriële gassen. Omdat het zo'n klein molecuul is heeft het een zeer geringe viscositeit en het diffundeert ook overal door. Daardoor is er niet eens een gaatje nodig, want waterstof gaat ook dwars door solide materiaal naar buiten.

Voor de opslag van waterstof als energiedrager wordt gedacht aan de omzetting van waterstof in ammoniak.

Ammoniak wordt in de chemie al een eeuw geproduceerd en gebruikt, onder andere voor de productie van kunstmest. De productie vergt veel energie: Het binden van stikstofmoleculen met waterstof via het [klassieke Haber-Bosch proces](#) vereist een hoge druk (150-200 bar) en temperatuur (300-550 °C).

**Dit proces heeft een energetisch rendement van minder dan 20%.**

Ammoniak is onder juiste condities bruikbaar als (motor)brandstof en levert daarbij geen CO<sub>2</sub> of stikstofoxiden:



De omzetting is energetisch niet optimaal, want het kost een stuk meer energie om ammoniak te maken dan het bij verbranding oplevert.

Van wiebelstroom via waterstof en ammoniak opslag naar bruikbare stroom:

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. Productie van waterstof door elektrolyse:  | Rendement 75% |
| 2. Binding waterstof aan ammoniak:            | Rendement 20% |
| 3. Productie stroom uit ammoniak in centrale: | Rendement 50% |

**Het totaal rendement** wordt  $0,75 \times 0,20 \times 0,50 = 7,5\%$

De opslag van waterstof in de vorm van ammoniak is geen bruikbare optie.



---

## Noten

**i.** Hugo Matthijsen Groene panacee of ramp in wording?

<https://www.climategate.nl/2018/07/een-groene-waterstof-economie-of-een-ramp-in-wording/>

**ii.** In Ierland probeert men het tegen beter weten in.

Het aandeel wind in de Ierse stroomdistributienet was 23% in 2016.

De CCGT centrales hadden door het frequent op- en afregelen een uitstoot van 575 gCO<sub>2</sub>/kWh. Onder optimum condities is dit 350 gCO<sub>2</sub>/kWh. Mearns, E. (2018). *beyond-the-spin-of-green-energy-storage/*.

De totale CO<sub>2</sub> intensiteit van Ierse stroom was 483 gCO<sub>2</sub>/kWh in 2016 en stijgende.

Dit voorbeeld toont aan, dat brandstofbesparing door windstroom zonder opslag van stroom minimaal is..

**iii.** De berekeningen van Euan Mearns brengen het rendement van de opslag *niet* in rekening.

<http://euanmearns.com/is-large-scale-energy-storage-dead/>

<http://euanmearns.com/estimating-storage-requirements-at-high-levels-of-wind-penetration/>

<http://euanmearns.com/renewable-energy-storage-and-power-to-methane/>

**iv** Het energetisch rendement van een bestaande grote installatie is volgens een brochure van NEL industries gelijk aan 75%

**“World’s Largest Electrolyser Plant”**

H<sub>2</sub> capacity: 30 000 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> /hour

Power requirement 135MW = 4,5 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>

De energie inhoud van waterstof is 3,4kWh/m<sup>3</sup> bij NTP.