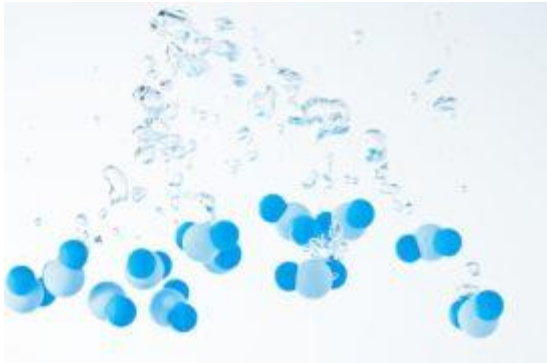


Waterstof als brandstof: over de energiedichtheid en kostprijs

[energie](#)

Waterstof zou een duurzaam alternatief kunnen zijn als brandstof voor verwarmen in klassieke cv-ketels. Dus waterstof als vervanger van aardgas. Maar welke energetische kenmerken heeft dit waterstofgas en is het net zo betaalbaar als het vertrouwde aardgas?



Door Maarten Legius

Het Nederlandse gasnetwerk, waar we al decennia uit Groningen gewonnen aardgas door pompen, blijkt ook geschikt te zijn voor waterstofgas. En ook zou na wat aanpassingen de [cv-ketel geschikt zijn om op waterstof te branden](#). Zo menen deskundigen. Voldoende reden om beide brandstoffen eens te vergelijken op de aspecten energiedichtheid en kostprijs.

Een gemiddeld gezin

Een gemiddeld gezin in Nederland verstoekt per jaar ongeveer 1500 m³ aardgas voor verwarming en warm water. [Als we waterstofgas als alternatief zien voor aardgas](#), is de voor de hand liggende vraag hoeveel m³ waterstofgas we nodig hebben voor dezelfde verwarmingsdoelstellingen. Daarvoor moeten we eerst weten hoeveel energie een kubieke meter waterstofgas bevat en dat vergelijken met een kubieke meter aardgas.



Energiedichtheid van waterstofgas

We hebben het dan over de energiedichtheid. De energiedichtheid (zie ook blauw kader hieronder over de begrippen *energiedichtheid*, *verbrandingswaarde* en *calorische waarde*) van een stof geeft aan hoeveel energie ligt opgeslagen in de stof of het materiaal, uitgedrukt per massa- of volume-eenheid. Vaste stoffen en vloeistoffen worden doorgaans per kg weergegeven en gassen per m³ of liter. Zo'n stof kan papier, hout, afval, aardgas, benzine of olie zijn. Maar laten we waterstofgas en aardgas eens bekijken en vergelijken.

Waterstof is een gas

Waterstof heeft in vloeibare toestand een enorm hoge energiedichtheid, namelijk 125 MJ per kg. Maar het vergt complexe technische processen om waterstof vloeibaar te maken, houden en transporteren. Om als een vloeistof te kunnen bestaan moet waterstof onder druk gezet worden en gekoeld tot de zeer lage temperatuur van 20,28 K (-252,87°C). Onder atmosferische omstandigheden (normale aardse temperatuur en druk, red.) manifesteert waterstof zich als gas. En dat is gelijk ook de enige vorm waarin het door ons bestaande gasnetwerk kan worden getransporteerd. (tekst loopt verder onder kader).

Geen artikelen van Gawalo missen?

Meld u dan nu aan voor onze nieuwsbrief en ontvang wekelijks de laatste ontwikkelingen!

Ik ga akkoord met het ontvangen van vakinformatie op mijn interessegebieden van de titels van Vakmedianet en heb kennis genomen van het [Privacy en Cookie Beleid](#) van Vakmedianet groep.

[Inschrijven]

Waterstofmoleculen in een liter

In gasvorm is de energiedichtheid substantieel lager dan in vloeibare vorm; wat logisch is gezien er veel minder moleculen per volume-eenheid in een gas zitten in vergelijking tot de stof in vloeibare vorm. Per liter waterstofgas is de energiedichtheid bij 1 bar druk slechts 11 kJ. Als we de druk verhogen, dus meer waterstofmoleculen in een liter stoppen, dan loopt de energiedichtheid op tot bijvoorbeeld 2.200 kJ bij 200 bar. Waterstof is overigens de stof met de hoogste energiedichtheid per kg, namelijk: 125.000 kJ/kg.



Wat is aardgas?

Wat is aardgas? En welke [eigenschappen van aardgas zijn belangrijk voor stooktechniek en verbrandingstechniek](#)? Aardgas ontstaat in de bodem als een fossiele brandstof. 'Fossiel' betekent dat het is ontstaan uit miljoenen jaren oude planten- en dierenresten. Het aardgas uit het Groningse Slochteren bestaat bijvoorbeeld voor 81,9% uit methaan (CH₄), voor 3,3% uit gasvormige koolwaterstoffen, 14% uit stikstofgas en 0,8% uit kooldioxide. Elk gasveld bevat gas met een iets andere samenstelling. Deze samenstelling leidt naar een bepaalde zogeheten calorische waarde. De calorische waarde van aardgas in het Nederlandse netwerk ligt tussen de 31,65 MJ/m³ en 35,17 MJ/m³.

Energiedichtheid van aardgas

Aardgas heeft onder atmosferische omstandigheden dus een energiedichtheid van 31,7 MJ per m³ (ofwel 31,7 KJ per liter). Als we dat vergelijken met de 10,7 MJ/m³ (ofwel 11 KJ per liter) van waterstofgas, bevat aardgas per volume-eenheid dus driemaal zoveel energie. Volgens deze som zou een gemiddeld gezin 1.500 m³ per jaar aardgas verstoken of circa 4.500 m³ aan waterstofgas (tekst gaat verder onder blauw kader).

Wat is energiedichtheid, verbrandingswaarde, calorische waarde ...

In de praktijk worden verschillende begrippen gebruikt voor calorische waarde, zoals energiedichtheid, energetische waarde, verbrandingsenthalpie of verbrandingswaarde. Het gaat altijd om de energie – vaak in de vorm van warmte – die vrijkomt bij de volledige verbranding van een stof. De verbrandingswarmte wordt bij vaste stoffen doorgaans weergegeven in joule per kilogram (J/kg) en bij vloeistoffen en gassen in joule per kubieke meter (J/m³).

Verbrandingswaarde of calorische waarde

De verbrandingswaarde is gedefinieerd als de hoeveelheid water die een bepaalde brandstof bij volledige verbranding en atmosferische omstandigheden kan verwarmen van 14,5 °C naar 15,5 graden °C. De verwarming van 1 gram water met 1 °C is 1 calorie (= 4,186 joule). Dit is een oude eenheid die niet in het SI-stelsel zit, maar wel verklaart waar de term calorische waarde vandaan komt.

Onderste en bovenste verbrandingswaarde

De aandelen waterstof (H) en koolstof (C) zijn in een brandstof bepalend voor de verbrandingswaarde. Dat is precies de reden waarom geschikte brandstoffen veel van deze stoffen bevatten. Bij verbranding komt vaak waterdamp vrij die verdampingsenergie bevat. De zogeheten 'onderste verbrandingswaarde' betreft de verbrandingswaarde inclusief de verdampingsenergie. De 'bovenste verbrandingswaarde' betreft de verbrandingswaarde inclusief de verdampingsenergie. In een moderne hr-ketel kan een deel van deze verdampingsenergie (50%) worden teruggewonnen. Omdat het rendement van een hr-ketel wordt gerelateerd aan de onderste verbrandingswaarde – in Europese richtlijnen worden de verliezen door de afvoer van verbrandingsgassen dus niet in het rendement meegerekend – kan het rendement van een hr-ketel hoger zijn dan 100.

Laagcalorisch en hoogcalorisch gas

Aardgas uit Groningen heeft een laagcalorische waarde, waarmee het afwijkt van de meeste gasvelden in de wereld. Dat komt doordat het gas een relatief groot aandeel (14%) stikstof bevat. Dit laagcalorische aardgas is de standaard geworden voor gasfornuizen en cv-ketels. Hoogcalorisch gas bevat veel minder stikstof, zodat uit dit gas meer energie kan worden gehaald. Ook in Nederland komt hoogcalorisch gas voor, in de kleine gasvelden op land en zee. Verder wordt vanuit Rusland en Noorwegen hoogcalorisch gas naar Nederland getransporteerd. Als hoogcalorisch gas bedoeld is voor gebruik door de consument, moet het worden gemengd tot de kwaliteit van het laagcalorische gas, bijvoorbeeld door het toevoegen van stikstof, waarmee de calorische waarde afneemt.

Waterstofgas vergeleken met aardgas

Daarmee zijn nog niet alle vragen beantwoord. Als consument zou je willen dat waterstofgas per kubieke meter ongeveer 3x goedkoper is dan aardgas, je hebt er immers 3x zoveel van nodig. Als fabrikant van cv-ketels zul je je afvragen wat die hogere transportsnelheden van gas in je toestel betekenen voor de componenten (buiten de andere eigenschappen van waterstofgas waar rekening mee gehouden moet worden). Als netwerkbeheerder gelden soortgelijke vragen. Want bij waterstofgas-klanten moet in vergelijking tot aardgas-klanten 3x het volume aan product worden afgeleverd. Dat heeft gevolgen voor de pompen, leidingen en instrumentatie in het gasnetwerk. Zie hieronder de eigenschappen van waterstof versus laag- en hoogcalorisch aardgas (klik om tabel groter te maken).

EIGENSCHAPPEN VAN AARDGAS EN WATERSTOF

| Brandstof | Laaggas, laagcalorisch | Laaggas, hoogcalorisch | Waterstof |
|--|---|---|--|
| Formule | C _n H _m | C _n H _m | H ₂ |
| Element | C, H | C, H | O, H |
| Onderste verbrandingswaarde (kWh/m ³) | 8,83 | 10,8 - 12,9 | 5 |
| Onderste verbrandingswaarde (kWh/m ³) | 10,7 | 12,8 - 14,1 | 10,7 |
| Onderste massa (kg/m ³) | 0,653 | 0,653 | 0,09 |
| Massaverhouding verbrandingswaarde in m ³ bij theoretische verbranding van 1 m ³ gas | 8,3 | 8,3 | 10,7/5,4 |
| Verbrandingsgassen in verbranding (°C) | 100 - 120 | 100 - 120 | 100 - 140 |
| Verbrandingsgaseigenschappen | <ul style="list-style-type: none"> • zeer licht ontvlambaar • afstroom vlam | <ul style="list-style-type: none"> • zeer licht ontvlambaar • afstroom vlam | <ul style="list-style-type: none"> • zeer licht ontvlambaar • afstroom vlam • sterke verbrandingsflam verspreid |
| Verbrandingsgastemperatuur (°C) | 1100-1200 | 1100-1200 | 1100-1200 |
| Stofverbrandingsgastemperatuur (°C) | 100 | 100 | 100 |
| Onderste explosiegrens (%) | 5 | 5 | 4 |
| Onderste explosiegrens (%) | 15 | 15 | 15 |

Sources: Sauer, Bertha, 1998

www.gasnet.nl

Gawalo

Kosten van aardgas en waterstofgas

Aardgas komt uit de bodem. De kosten die je daaraan kwijt bent worden onder meer bepaald door de kosten die gemaakt zijn om een veld te vinden, exploiteren en op de markt te brengen. Aardgas stroomt door de natuurlijke druk in een gasveld via een put naar de oppervlakte. Als de natuurlijke druk in een gasveld te laag is, zal met compressoren de druk worden opgevoerd. Eenmaal boven de grond worden aardgascondensaat (bijproduct, red.), water en andere bestanddelen uit het gas gefilterd en ontstaat er schoon gas.

Gasprijs, belastingen en toeslagen

De gasprijs bestaat voor consumenten uit aantal variabelen, die per regio, leverancier en netwerkbedrijf verschillen. Zo bestaat de gasprijs uit een combinatie van het leveringstarief, de netbeheerkosten en een regiotoeslag. De hoogte van de regiotoeslag is afhankelijk van de afstand van een woning tot Groningen, waar het Nederlandse aardgas vooral vandaan komt. De netbeheerkosten zijn voor het onderhoud van het gasnetwerk, de gasaansluitingen en de gasmeters. Op die prijs komen nog overheidsheffingen en belastingen, zoals btw. De overheidsheffingen en belastingen zullen de komende jaren stijgen om het gebruik van gas te ontmoedigen. Elektriciteit wordt echter goedkoper.



De prijs per m³ aardgas

Wat gas per kubieke meter kost voor een gezin met een gemiddeld verbruik van 1.500 m³ aardgas is eenvoudig te toetsen aan de hand van de vele vergelijkingssites op het gebied van energie. Voor de schrijver van dit stuk, met postcode 5261, geldt per jaar bij een maandelijks opzegbaar flexibel contract met daarin ook elektriciteit (3.500 kWh): 1217,25 euro voor alleen het gas (december 2018, red.). Dat is maar liefst ruim 0,81 euro per m³. Bij een jaar vast stijgt het bedrag naar bijna 0,85 euro per m³.

De prijs van waterstofgas

Zoals we eerder constateerden hebben we driemaal meer volume aan waterstofgas nodig in verhouding tot aardgas, voor dezelfde hoeveelheid energie. Dat betekent dat voor de consument de waterstofgasprijs inclusief alle belastingen en toeslagen op circa $0,85 / 3 = 28,3$ eurocent per m³ zou mogen liggen, als het tenminste een doelstelling is om niet meer geld uit te geven.

Productie van groene waterstof

Uiteraard willen we groen waterstofgas dat is gemaakt uit windstroom of zonnestroom, zodat we zeker zijn van het CO₂-vrij verwarmen van onze woningen. Enpuls (onderdeel van de Enexis Groep, red.) onderzocht in samenwerking met TNO en DNV GL [of de productie van groene waterstof economisch haalbaar is](#) en heeft in een rapport dat eind november 2018 is verschenen voor verschillende productiemethoden de prijs per kg berekend. In 2025 zou een productieprijs tussen de 2,40 en 2,70 euro per kg mogelijk moeten zijn. Een kuub waterstofgas weegt 90 gram, dus 11,1 kuub waterstofgas weegt 1 kg. Daarmee komt de kale productieprijs van waterstof uit op: $2,70 / 11,1 = 24,3$ eurocent. Dan zitten we weliswaar krap onder de prijs van aardgas, maar voor dat bedrag is het weliswaar geproduceerd, maar nog niet bij de consument afgeleverd en zijn er geen belastingen en overige kosten berekend.

Dossier Verwarmen met waterstof:

- [Wat is waterstof](#)
- [Waterstof als alternatief voor aardgas in cv-ketels](#)
- [Werkt een cv-ketel voor aardgas ook op waterstof?](#)
- [Waterstof vraagt kleine aanpassing aardgasnet](#)
- [Waterstof als brandstof: over de energiedichtheid en kostprijs \(dit artikel\)](#)
- [Grootschalige productie van groen waterstofgas in de planning](#)
- [Waterstof maak je straks voor 2,17 euro per kg](#)

Eerste publicatie door [Maarten Legius](#) op 12 dec 2018

Laatste update 18 dec 2020