

Kwaliteitseisen voor waterstof t.b.v. het transportnet

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Report No.: ESNL.10332299, Rev. 0

Date: 25-05-2022



Project name: Onderzoek kwaliteit waterstof
Report title: Kwaliteitseisen voor waterstof t.b.v. het
transportnet
Customer: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat,
Bezuidenhoutseweg 73, 2595 AL Den Haag
Customer contact: W. J. C. Schaaf
Date of issue: 25-05-2022
Project No.: 10332299
Report No.: ESNL.10332299, Rev. 0

Kiwa Technology B.V.
Wilmersdorf 50
Postbus 137
7300 AC Apeldoorn

DNV Energy Systems
Flow and Fuel Advisory
Energieweg 17, 9743 AN
Groningen, The Netherlands

Prepared by: [Redacted]

Harm Vlan
(DNV)
[Redacted]

Mar ijn van Essen
(DNV)
[Redacted]

Erik Polman
(Kiwa)
[Redacted]

Suzanne van Greuningen
(Kiwa)

Verified by: [Redacted]

Sander Ge
(DNV)
[Redacted]

Mindert van Rij
(Kiwa)

Approved by: [Redacted]

Johan Knijp
(DNV)

SAMENVATTING

De Europese energiesector heeft de ambitie om de komende decennia een systeem van onderling verbonden nationale waterstofnetwerken (“backbones”) te realiseren, geheel analoog aan de huidige Europese aardgasinfrastructuur. Voor het welslagen van deze visie moeten vele technische-, economische- en juridische barrières worden geslecht. Eén daarvan is de nieuw te ontwikkelen Netwerkcodes, waarin beschreven staat wat de druk- en kwaliteitsspecificaties zullen zijn voor de toekomstige waterstofbackbone.

Dit rapport is door Kiwa en DNV opgesteld in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) met als doel te komen tot kwaliteitseisen voor waterstof ten behoeve van het landelijke waterstoftransportnet. De kwaliteitseisen richten zich op het minimale waterstofgehalte en de maximaal toegestane concentratie aan sporenelementen en verontreinigingen.

Voor de waterstofbackbone wordt in principe uitgegaan van één gasspecificatie (zowel entry als exit) voor de gehele markt.

Om een weloverwogen advies te kunnen formuleren, zijn verschillende aspecten zoals de wijze van productie, verontreinigingen vanuit de backbone, technische beperkingen van eindgebruikersapparatuur, en economische aspecten meegenomen. Aan een selecte groep stakeholders is gevraagd naar hun visie op de kwaliteitsaspecten van waterstof, de productie van- en de vraag naar waterstof en de ontwikkeling van de markt voor waterstof.

De kwaliteit van het waterstof is afhankelijk van de kwaliteit na productie en de kwaliteitseisen van de afnemer. De verschillende productiewijzen voor CO₂-vrije waterstof (inclusief de import van ammoniak) en de kwaliteit van het waterstof die deze productietechnieken oplevert zijn daarom uiteengezet. Daarnaast is de kwaliteit waterstof beschreven die voor het eindgebruik in verschillende toepassingen en industriële sectoren vereist is. Er is ook inzichtelijk gemaakt wat de prognoses zijn voor de verwachte productievolumes en de hierbij gebruikte productietechnieken.

Wat betreft de reiniging van gas is een technisch-economische afweging gemaakt van zuivering op verschillende locaties in de waterstofketen en de daarmee gepaard gaande kosten en de eventuele verontreinigingen, die desorberen van voormalige aardgastransportleidingen. Bij het advies is ook rekening gehouden met de binnen Europa lopende relevante trajecten waarbij kwaliteitscriteria voor waterstof worden ontwikkeld, omdat in de toekomst mogelijk een Europees waterstoftransportnetwerk zal komen.

Om tot deze kwaliteitseisen te komen zijn de volgende afwegingen meegenomen:

- waterstof wordt nu overwegend ingezet in chemische- en petrochemische processen en verbrandingstoepassingen;
- de productie van waterstof vindt momenteel nog hoofdzakelijk via de thermochemische route plaats. De verkregen zuiverheid hierbij is ca. 98 mol%;
- de productie van waterstof uit elektrolyse, waarbij een zuiverder waterstof wordt geproduceerd (hoger dan 99.9 mol%), zal op korte termijn (lees: tot 2025) slechts in beperkte volumes plaatsvinden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de verwachting is dat op lange termijn (lees: na 2025) de hoeveelheid waterstof geproduceerd vanuit elektrolyse zal toenemen;
- het is nu nog niet bekend wat de invloed van verontreinigingen uit voormalige aardgastransportnetwerken op de uitgaande waterstofkwaliteit is, waardoor op korte termijn zuiverheden van meer dan 99,5 mol% niet realiseerbaar lijken;

- op basis van de huidige beschikbare informatie is een kostenoptimalisatie uitgevoerd. Hieruit is gebleken dat de kosten voor 99.9% het laagst zijn, maar op korte termijn technisch niet realiseerbaar. Een zuiverheid van 98% geeft de laagste systeemkosten van de op korte termijn te realiseren scenario's/waterstof zuiverheden;
- de nu opgestelde internationale specificaties voor transportnetwerken zijn vrij uniform met betrekking tot de kwaliteitseisen. Veelal wordt een zuiverheid van 98 mol% aangehouden;
- de markt van brandstofcelvoertuigen is nu gering en zal geleidelijk verder groeien;
- uit de interviews met stakeholders is gebleken dat de grootverbruikers, die naar verwachting de komende jaren de grootste volumes aan waterstof uit de backbone zullen gaan gebruiken, een minimale zuiverheid van 98 mol% acceptabel vinden.

Op basis van voorgaande overwegingen wordt voor de waterstofbackbone een minimale waterstofzuiverheid van 98 mol% geadviseerd als initiële kwaliteitseis.

Echter, voor brandstofceltoepassingen is een hoge zuiverheid dan 98 mol% vereist en zijn er strenge eisen aan de maximaal in het gas aanwezige sporencomponenten. Voor de korte termijn betreft het hier hoofdzakelijk waterstoftankstations, waar het gas tot hoge drukken (700 bar) wordt gecompriëerd. Hiervoor is additionele reiniging nodig. In waterstoftankstation is al een waterscheider geplaatst om te voorkomen dat er vloeibaar water in de te tanken waterstof komt. Het is mogelijk om, naast het verwijderen van water, een additionele reinigingstrap te plaatsen voor de afvang van schadelijke sporencomponenten (met name zwavel). Onafhankelijk van de te stellen specificaties is het sowieso verstandig om een dergelijke 'polishing' stap te plaatsen om zo te kunnen voorkomen dat er schade aan de brandstofcellen kan optreden.

Op de lange termijn is de verwachting dat de markt (en daarmee samenhangende waterstofvraag) voor brandstofcelvoertuigen zal toenemen. In hoeverre de kwaliteitseisen voor waterstof dan nog steeds hetzelfde zijn is onbekend; toekomstige ontwikkelingen kunnen er mogelijk toe leiden dat brandstofcellen toleranter worden voor onzuiverheden.

Naar mate er meer waterstof met behulp van elektrolyse geproduceerd wordt en er meer kennis is opgedaan over het transporteren- en opslaan van waterstof en de mogelijkheden voor reiniging van waterstof, is de verwachting dat op termijn de kwaliteitseisen kunnen worden aangepast naar zuiverheden die hoger zijn dan 98 mol%.

Voorgesteld wordt om over drie jaar -na ingebruikname van het waterstoftransportnetwerk- de specificaties opnieuw vast te stellen, waarbij rekening wordt gehouden met:

- de ontwikkeling in de productie uit elektrolyse;
- de daadwerkelijke contaminaties afkomstig van het transportnetwerk;
- de ontwikkeling van de waterstofmarkt.

Het advies betreffende de kwaliteitseisen voor waterstof en het opnieuw opstellen van de specificaties -3 jaar na ingebruikname van het waterstoftransportnetwerk- sluit aan bij de vigerende Europese standaarden. Voor de periode tot 2025 wordt geadviseerd om de navolgend beschreven specificaties aan te houden.

Tabel: Voorgestelde specificaties waterstof in het transportnet voor zowel entry- als exitpunten (waardes op momentane basis)

Parameter	Eenheid	
Wobbe-index	MJ/m ³ (n)	44,85-48,35 ^A
Waterstof	mol%	≥ 98
Inerten	mol%	≤ 2 inert N ₂ , Ar, He
Koolwaterstoffen	mol%	<1,5 incl. CH ₄
Koolwaterstofdauwpunt	°C	≤ -2 bij 1 – 70 bar(a)
Waterdauwpunt	°C	-8 bij 70 bar(o)
Zuurstof	molppm	≤ 10
Koolstofdioxide	molppm	≤ 20
Totaal S gehalte (incl. H ₂ S)	molppm	≤ 3
Halogenen	molppb	≤ 50
Koolmonoxide	molppm	≤ 20
Mierenzuur	molppm	≤ 10
Ammoniak	molppm	≤ 10
Formaldehyde	molppm	≤ 10
Stofdeeltjes (> 5 µm)		Disclaimer ^B
Temperatuur (entry)	°C	5 - 30 ^C
Temperatuur (exit)	°C	5 - 30 ^C

A. De m³(n) wordt gedefinieerd bij 0°C (meetcondities) en 1013,25 mbar. De energie in MJ is herleid van de thermodynamische waarden van 25°C (verbrandingscondities) tot 0°C en bij 1013,25 mbar volgens ISO 6976

B. Disclaimer: Het waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoeppassing kan aantasten

C. Afhankelijk van de situatie ter plaatse (materialen, afnemers), kan van de maximale temperatuur worden afgeweken

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	II
INHOUDSOPGAVE	V
1 INLEIDING	1
2 WATERSTOFPRODUCTIE EN -ZUIVERING	4
2.1 Waterstofproductie in Nederland	4
2.2 Productie	5
2.3 Zuivering	10
2.4 Marktprognose	12
3 GEBRUIKERSTOEPASSINGEN	13
3.1 Specificaties gasverbruikstoestellen	13
3.2 Impact van de waterstofsamenstelling op gedrag van verbrandingstoestellen	13
3.3 Warmwaterketels	16
3.4 Gasmotoren	17
3.5 Brandstofcellen	18
3.6 Gasturbines	19
3.7 Feedstock en industriële verhittingsprocessen	19
4 NETASPECTEN	23
4.1 Vervuilingen	24
4.2 Reiniging	25
5 ECONOMISCHE ASPECTEN	26
5.1 Systeemkosten in relatie tot waterstofsificatie	26
5.2 Waterstofproductiekosten	30
6 (INTER)NATIONALE ONTWIKKELINGEN WATERSTOFSPECIFICATIES	32
6.1 Productspecificaties	32
6.2 Gasnetspecificaties	33
7 STAKEHOLDERANALYSE	37
7.1 Kwaliteitsaspecten	37
7.2 Productie en verbruik volumina van waterstof	39
7.3 Visie op de marktontwikkeling	40
8 SPECIFICATIES VOOR ENTRY- EN EXITPUNTEN	42
9 REFERENTIES	46

1 INLEIDING

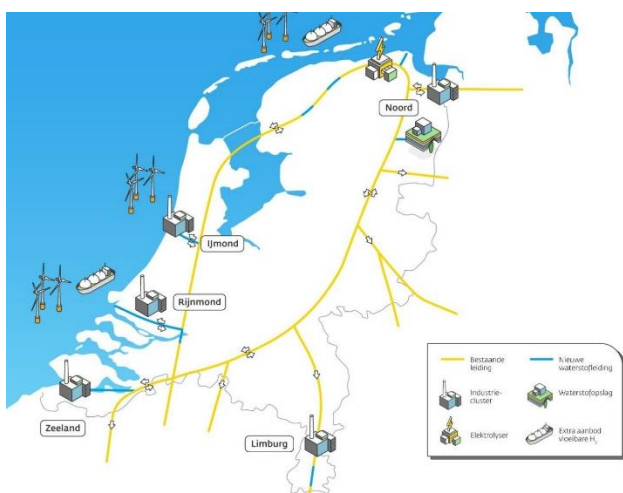
Aanleiding

De Europese energiesector staat voor de uitdaging het huidige energiesysteem, dat is gebaseerd op kolen, aardolie en aardgas, te vervangen door een systeem dat is gebaseerd op geproduceerde duurzame alternatieven. Naast verregaande elektrificatie is ook een grote rol voorzien voor waterstof als middel voor een kosteneffectief transport en -opslag en als bron van groene moleculen geproduceerd uit duurzame bronnen. De ambitie voorziet in een systeem van onderling verbonden nationale waterstofnetwerken ("backbones"), geheel analoog aan de huidige Europese aardgasinfrastructuur.

Primaire bronnen van waterstof zullen elektrolyzers zijn, gevoed door (overtollige) duurzame elektriciteit (wind, zon, etc.) en waterstof uit aardgas, al dan niet gecombineerd met koolstofdioxide opslag. Ook wordt import van duurzame waterstof verwacht via bulkcarriers, in vloeibare vorm of via draagmoleculen, zoals ammoniak. Primaire afnemer zal de industrie zijn (raffinage, kunstmest, staal), welke later uitgebreid zal worden met elektriciteitscentrales, de kleingebruikersmarkt en mobiliteit.

Transport van waterstof zal plaatsvinden via omgezette aardgasleidingen, nieuwe leidingen en -ad hoc- via weg- en watertransport. Opslag zal primair plaatsvinden in zoutcavernes en wellicht op termijn in lege aardgasvelden.

Voor het welslagen van deze waterstofvisie moeten vele technische-, economische- en juridische barrières worden geslecht. Eén daarvan is de nieuw te ontwikkelen Netwerkcodes, waarin beschreven staat wat de druk- en kwaliteitsspecificaties zullen zijn voor de toekomstige waterstofbackbone.



Figuur 1.1: De waterstofbackbone visie volgens Gasunie

Afwegen belangen producenten versus afnemers

Voor de nieuw te definiëren specificaties voor de waterstofbackbone gelden in principe dezelfde overwegingen als voor het huidige aardgasnet. Ruime gaskwaliteitsspecificaties zijn gunstig voor het aantrekken van nieuwe producenten, die minder kosten hoeven te maken voor de gasbehandeling. Met name voor kleine producenten kunnen kosten voor gasbehandeling showstoppers zijn. Gevolg is meer aanbod van waterstofvolumes, een lagere commodity prijs en een hogere leveringszekerheid.

Ruime waterstofspectificaties zijn daarentegen weer nadelig voor kleine afnemers. Deze moeten mogelijk investeren in additionele gasbehandeling en intelligentere verbruikstoestellen, om het verbruiksrendement hoog te houden.

Dit zijn alle barrières voor kleine gebruikers en distributienetwerk operators (DSO's) om over te stappen op waterstof. De centrale uitdaging in de definitie van de kwaliteitsspecificaties is dus het vinden van de juiste balans tussen de belangen en mogelijkheden van de producenten versus die van de afnemers.

Extra uitdagingen waterstof

Voor de waterstofbackbone wordt in principe uitgegaan van één gasspecificatie voor de gehele markt. De uitdaging is nu deze specificatie zorgvuldig te kiezen. Voor waterstof zijn de kwaliteitsspecificaties een nog belangrijker en uitdagender thema dan voor aardgas. Waterstof kent dezelfde problematiek als aardgas zoals Wobbe-index, calorische waarde, maar daar bovenop ook nog enkele extra uitdagingen die in verband staan met de toelaatbare onzuiverheden, zijnde:

- waterstof wordt in hoge volumes gebruikt als industriële feedstock voor de synthese van complexere moleculen met behulp van katalysatoren. Onzuiverheden kunnen leiden tot de-activatie van de katalysatoren, maar ook aan verlies van rendement. Daarnaast kunnen onzuiverheden de kwaliteit van het eindproduct verlagen;
- brandstofcellen, zoals die worden gebruikt in de mobiliteit, zijn erg gevoelig voor onzuiverheden;
- waterstof is een zeer licht molecuul en de Wobbe-index is daardoor extra gevoelig voor onzuiverheden. Dit is met name uitdagend voor turbines en branders;
- hergebruik van bestaande aardgaspijpleidingen en cavernes kan mogelijk resulteren in "uitgassing" en een extra bron zijn van waterstofvervuiling.

Al deze overwegingen zullen moeten worden meegenomen in de specificatie van de kwaliteitseisen van waterstof in de backbone.

Advisering waterstofsificatie

Kiwa en DNV hebben gezamenlijk een opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) aangenomen om met een advies te komen over de te hanteren waterstofsificaties in het hogedruk transportnetwerk.

Vanuit EZK zijn de volgende deelvragen omschreven:

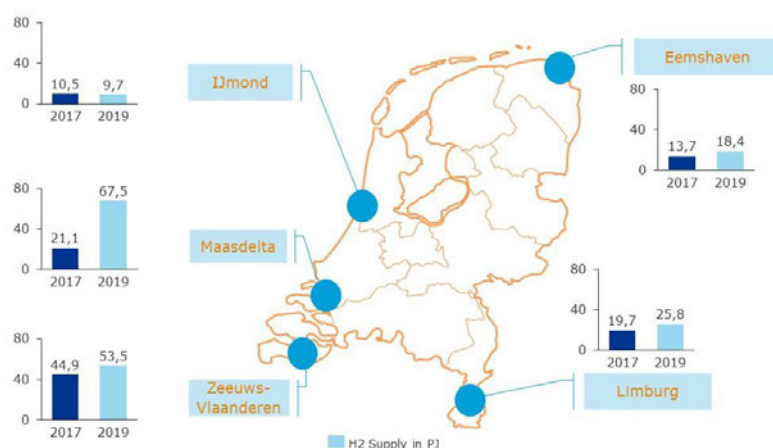
- welke verschillende gangbare productiewijzen voor CO₂-vrije waterstof zijn er en welke (range van) zuiverheid heeft het waterstof bij deze productietechnologieën, welke sporencomponenten kunnen hierin voorkomen en welke capaciteiten worden verwacht?;
- welke minimale zuiverheid waterstof hebben de verschillende eindverbruikers nodig?;
- welke sporenelementen (maximumlimiet) kan het gebruik van de waterstof, gerubriceerd per eindverbruikerscategorie, verhinderen?;
- wat zijn de kosten van zuivering gerelateerd aan de geprognosticeerde prijs van CO₂-vrije waterstof op de (middel-)lange termijn?;
- wat zijn de prognoses voor de volumes voor productie en eindverbruik van CO₂-vrije waterstof?;
- bij welke verschillende schakels en partijen in de waterstofketen (producent/invoeder, transporteur, eindafnemer) zou de zuivering kunnen plaatsvinden en welke technisch-economische afwegingen kunnen een rol spelen bij de keuze om zuivering op een specifieke plaats in de keten uit te voeren en welke mogelijke kosten zijn hiermee gemoeid?;
- hoe verhoudt het advies zich tot de relevante trajecten binnen Europa waarbij kwaliteitscriteria voor waterstof worden gemaakt en welke eisen zijn hierbij van toepassing?;
- wat zijn de verontreinigingen en de hoeveelheden verontreinigen, die vanuit aardgasnetwerken worden meegevoerd, hoelang zal dit duren en hoe kunnen de effecten hiervan worden geminimaliseerd?;
- wat is de consequentie van verontreinigen en sporencomponenten op de Wobbe-index?

Voor het beantwoorden van de voorgaand omschreven vragen is door een team van experts vanuit Kiwa en DNV gebruik gemaakt van de binnen de instituten aanwezige kennis en zijn (inter)nationale literatuurbronnen geraadpleegd. Tevens zijn een tiental interviews gehouden met relevante stakeholders, bestaande uit producenten, potentiële afnemers, commodity leveranciers en Hynetwork Services. De keuze voor de te interviewen stakeholders is gemaakt door EZK.

2 WATERSTOFPRODUCTIE EN -ZUIVERING

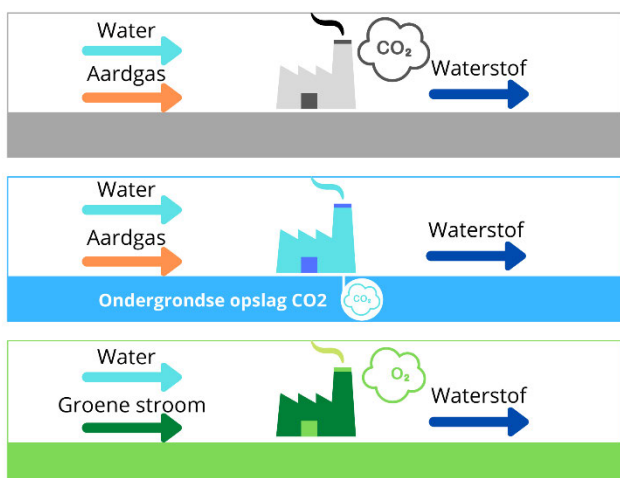
2.1 Waterstofproductie in Nederland

In Nederland wordt waterstof met name gebruikt als grondstof voor de chemische industrie (bijvoorbeeld bij de productie van kunstmest). De huidige jaarlijkse waterstofvraag is 16 miljard $\text{m}^3(\text{n})$, overeenkomend met 180 PJ [1,2]. Nagenoeg al deze waterstof wordt geproduceerd nabij de eindgebruikerstoepassingen in de grote chemische clusters, zoals weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: Geschatte waterstof gebruik in Nederland [1]

Het grootste deel van het waterstof wordt geproduceerd uit aardgas (9 miljard $\text{m}^3(\text{n})$), het overige waterstof komt vrij als bijproduct van industriële processen [2,3]. Omdat er bij de waterstofproductie uit aardgas koolstofdioxide vrijkomt, wordt dit grijze waterstof genoemd. Als de vrijgekomen koolstofdioxide wordt afgevangen, opgeslagen of hergebruikt dan is er sprake van blauwe waterstof. Waterstof kan ook geheel koolstofdioxide-vrij geproduceerd worden, dan wordt gesproken van groene waterstof.



Figuur 2.2: Diverse waterstofproductie routes [4]

Zoals eerder gememoreerd, is waterstof in de chemische clusters vooral een grondstof voor de productie van andere chemicaliën. Een drietal processen is daarbij verantwoordelijk voor het merendeel van het verbruik:

- de productie van kunstmest. Hierbij worden stikstof en waterstof omgezet in ammoniak;
- raffinageprocessen, voor de ontzwaveling van brandstoffen en het kraken van aardoliefracties;
- methanolproductie, waarbij waterstof en koolstofdioxide worden omgezet in methanol.

Elk van deze processen stelt specifieke eisen aan de kwaliteit van de waterstof. Veelal worden in deze processen katalysatoren gebruikt, die gevoelig zijn voor bepaalde componenten in de waterstofvoeding. Om aan de kwaliteitseisen van de chemische processen te voldoen, wordt de geproduceerde waterstof op kwaliteit gebracht door zuiveringstappen. Omdat het om verschillende processen op verschillende plaatsen in Nederland gaat die op dit moment nog niet onderling verbonden zijn, is er geen algemene uitspraak te doen over de zuiverheid van het waterstof die daar vereist wordt.

2.2 Productie

Waterstof kan op een aantal manieren worden geproduceerd. Er dient te worden opgemerkt dat alle productieprocessen -zowel met als zonder koolstofdioxide-uitstoot naar de atmosfeer- kunnen worden uitgevoerd en dat daarbij het onderscheid tussen grijze-, groene- en blauwe waterstof niet afhangt van deze methoden. Als bijvoorbeeld waterelektrolyse met grijze stroom wordt uitgevoerd, mag de geproduceerde waterstof niet als groen geclassificeerd worden. Aan de andere kant wordt waterstof geproduceerd uit groengas wel gezien als groene waterstof.

Op hoofdlijnen zijn er een vijftal mogelijke varianten die verwacht worden de komende jaren dominant te zijn. Deze worden in de navolgende paragrafen kort verklaard.

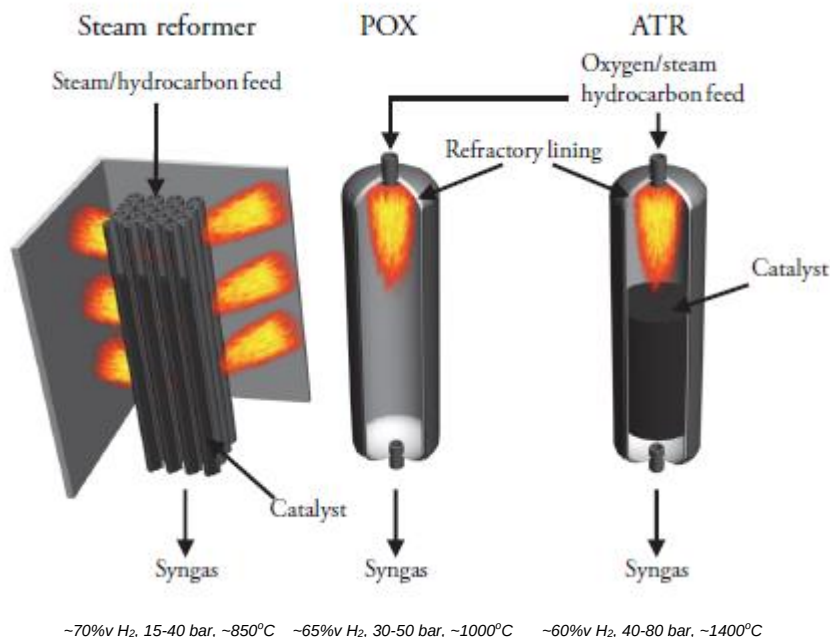
2.2.1 Thermochemisch

Bij de productie van waterstof uit koolwaterstoffen wordt eerst synthesesgas gemaakt met behulp van een katalysator. De katalysator is gevoelig voor vergiftiging door chloor- en zwavelhoudende componenten. Deze componenten worden daarom in een voorbehandelingsstap uit de grondstofstroom gehaald. Synthesegas (syngas) is een mengsel van hoofdzakelijk waterstof, koolstofmonoxide en koolstofdioxide. Door middel van de zogenaamde watergas shift reactie (WGS, zie figuur 2.3) wordt koolstofmonoxide met water omgezet naar waterstof en koolstofdioxide. Vervolgens wordt de waterstofstroom op de gewenste kwaliteit gebracht in een zuiveringsstap.



Figuur 2.3: Overzicht processtappen thermochemische productie van waterstof

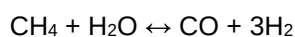
Voor de productie van syngas op industriële schaal zijn een drietal reactoren het meest voorkomend, weergegeven in figuur 2.4. De drie typen verschillen in benodigde grondstoffen en warmtehuishouding en worden navolgend verder besproken.



Figuur 2.4: Syngas reactoren [5,6]

Steam Methane Reforming

De meest gebruikte grondstof voor het maken van waterstof is methaan (aardgas). Voor methaan is het Steam Methane Reforming (SMR) proces de meest gebruikte methode. In een SMR worden methaan en water onder hoge temperatuur omgezet in syngas bestaande uit waterstof en koolstofmonoxide:



De reactie is endotherm, wat betekent dat continu warmte moet worden toegevoegd om de reactie gaande te houden. Typische temperaturen in de reactor zijn 500-900°C bij een druk van 15-40 bar en in de aanwezigheid van een nikkelkatalysator. De benodigde warmte wordt geleverd door het verbranden van aardgas of rest-gassen verderop in het proces. Een SMR-reactor bestaat uit een aantal buizen waardoorheen het mengsel van stoom en aardgas langs de katalysator wordt geleid terwijl aan de buitenkant van de buizen warmte wordt toegevoerd vanuit de branders.

Een typische samenstelling van de uitgaande stroom vanuit de SMR-reactor is in tabel 2.1 weergegeven. Exacte samenstellingen worden per proces verder geoptimaliseerd.

Tabel 2.1: Samenstelling syngas na de SMR-reactor [7,8]

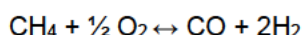
COMPONENT	FRACTIE IN SMR SYNGAS (DROOG MOL%)
H ₂	63-66
CO	8-16
CO ₂	7-14
CH ₄	3-8
N ₂	0-3

Vanuit het EMPIR-project [7] en Hy4Heat-project [8] is onderzoek gedaan naar mogelijke andere componenten die aanwezig kunnen zijn in de uitgaande stroom van de SMR-reactor. Als in het voedingsgas stikstof, argon en hogere koolwaterstoffen aanwezig zijn, dan kunnen deze ook in de uitgaande stroom verwacht worden. In de reactor kan mierenzuur, ammoniak of formaldehyde gevormd worden. Deze kunnen op $\mu\text{mol/mol}$ niveau voorkomen, naast het water dat als reactant ook aanwezig is. Zuurstof wordt niet aangetroffen in de uitgaande stroom. De uitgaande stroom uit de SMR- en WGS-reactoren wordt vervolgens gezuiverd tot de gewenste waterstofzuiverheid. In het EMPIR-project wordt geconcludeerd dat -na zuivering- het zeer onwaarschijnlijk is dat componenten zoals formaldehyde, mierenzuur en ammoniak in het waterstof voorkomen [7,8].

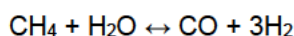
Auto Thermal Reforming

In een SMR komt circa 40% van de koolstofdioxide als lagedruk restgas vrij. Om blauwe waterstof te produceren via SMR moeten relatief hoge kosten worden gemaakt voor de afvang van koolstofdioxide. Dit is één van de redenen waarom het Auto Thermal Reforming (ATR) proces momenteel meer aandacht krijgt. Het voordeel van dit proces is dat alle koolstofdioxide onder hoge druk vrij komt en daarmee eenvoudiger afgevangen kan worden.

Het Auto Thermal Reforming proces bestaat uit 2 reacties. Ten eerste wordt methaan, of een ander lage koolwaterstof, in een exotherme reactie partieel geoxideerd:



De warmte die hierbij vrijkomt, wordt gebruikt voor dezelfde katalytische reactie als in de SMR plaatsvindt:



De reacties vinden plaats rond de 1000°C bij een druk van 35 bar. Door de eerste reactie komt bij een ATR proces meer koolstofmonoxide per mol waterstof vrij vergeleken met een SMR. In deze stap is zuurstof nodig. De zuurstof kan zuiver worden aangeleverd of vanuit een luchtstroom, waardoor meer inerten (stikstof) in het mengsel komen. In de praktijk wordt gebruik gemaakt van zuivere zuurstof om daarmee de bruikbaarheid van de Pressure Swing Adsorber (PSA, zie ook paragraaf 2.3) restgassen te vergroten voor voorverwarmingsprocessen.

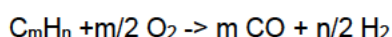
Typische syngas composities vanuit de ATR-reactor zijn weergegeven in tabel 2.2. Vervolgens wordt in de Water Gas Shift reactor de koolstofmonoxide verder omgezet in waterstof en koolstofdioxide (zie tabel 2.3) en wordt de waterstofstroom op kwaliteit gebracht met een PSA.

Tabel 2.2: Samenstelling syngas na de ATR-reactor [9]

COMPONENT	MET ZUURSTOF GEVOEDE ATR (DROOG MOL%)	MET LUCHT GEVOEDE ATR (DROOG MOL%)
H ₂	63-66	35-60
CO	27-30	13
CO ₂	5-6	8-10
CH ₄	0.3-1.4	0.4
N ₂	0.7 ¹	21-41
Ar	0.61	0.39-0.45

Partiële oxidatie

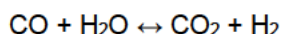
Vergassing of Partial Oxidation (POx) wordt gebruikt om syngas te maken uit laagwaardige koolwaterstoffen zoals resten uit het raffinageproces, petroleum, kolen of (droge) biomassa stromen. De basis reactie is:



Hierbij worden de grondstoffen onder een ondermaat zuurstof vergast tot koolstofmonoxide en waterstof. Typische reactoren worden bedreven rond de 20-40 bar en temperaturen tussen de 1440 en 1600 °C. Bij deze reactie wordt geen katalysator gebruikt, waardoor de voorbehandelingstap zoals die bij SMR en ATR nodig is, niet uitgevoerd wordt. Gezien de ruime variatie aan grondstoffen voor dit proces zijn hierbij veel onzuiverheden te verwachten, zoals bijvoorbeeld hogere koolwaterstoffen (bv. teer), stikstofoxiden, cyaniden, zware metalen en zwavelhoudende componenten. De uitgaande stroom wordt daarom vaak gezuiverd voordat deze in verdere reacties gebruikt kan worden. Gezien de grote variëteit grondstoffen in de vergassingsprocessen is het niet mogelijk een eenduidige samenstelling van de uitgaande waterstofstroom te geven.

Water-gas-shift

Elk van de drie syngas productiemethoden (SMR, ATR en POx) wordt gevolgd door de water-gas-shift (WGS) reactor (zie ook figuur 2.3). In deze reactie wordt koolstofmonoxide gevormd tijdens de syngas productie verder omgezet in meer waterstof en koolstofdioxide:



Bij deze reactie komt warmte vrij. Vaak wordt het proces in twee (temperatuur) stappen uitgevoerd, waarmee het evenwicht zoveel mogelijk aan de rechterkant komt te liggen. Tabel 2.3 geeft de typische samenstelling na de WGS reactor voor SMR en ATR (met zuivere zuurstof).

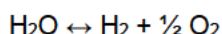
¹ Voor syngas na CO₂ capture (indicatief)

Tabel 2.3: Samenstelling gas na water-gas-shift reactie [9]

COMPONENT	SMR (DROOG MOL%)	ATR (DROOG MOL%)
H ₂	70-80	72
CO	0,1-3	0,2-1,4
CO ₂	15-25	27
CH ₄	3-6	0,2-2,4
N ₂	0-0,2	0,7
Ar	0	0,61

2.2.2 Elektrolyse

Met behulp van elektriciteit kan water worden gesplitst in waterstof en zuurstof. Deze zogenaamde waterelektrolyse wordt beschreven door de volgende reactievergelijking:



De reactie vindt plaats in een elektrolysecel, waarbij de anode en kathode gescheiden worden door een elektrolyt. De keuze van het elektrolyt bepaalt de elektrolysemethode. In de praktijk van waterelektrolyse komen twee vormen veel voor: Proton Exchange Membrane (PEM) en Alkaline (AEL). In het eerste geval (PEM) vormt een polymeermembraan de scheiding tussen de twee elektroden. Bij AEL is dit een oplossing met kalium- of natriumhydroxide. Naast elektriciteit is gezuiverd water nodig, typisch met een geleidbaarheid <5 µS/cm voor AEL en 1 µS/cm voor PEM.

Door de beperkte permeatie van onzuiverheden (zuurstof, water) door het membraan, levert PEM-elektrolyse zuivere waterstof (99.99+%) nadat het gas gedroogd is. Temperature- of Pressure Swing Adsorption (TSA en/of PSA) worden gebruikt voor het verwijderen van water uit de productstroom. Eventueel zuurstof wordt met een katalytische deoxidiser met waterstof omgezet in water en daarmee verwijderd.

Tabel 2.4: Verontreiniging na elektrolyse zonder TSA/PSA.

Na zuivering met TSA voldoet het waterstof aan de ISO 14867 standaard [9, 10].

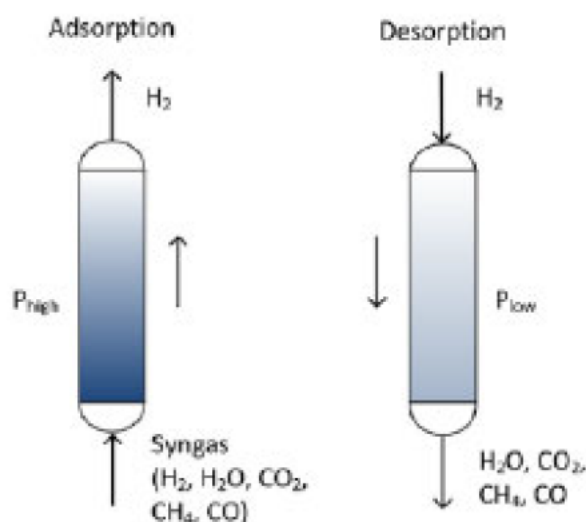
COMPONENT	PEM (ppm)	ALKALINE (ppm)
H ₂ O	>100	>100 (kan K ⁺ of Na ⁺ ionen bevatten)
O ₂	18-500	50
CO ₂	0,2-5,4	
Inerte gassen	Binnen de ISO 14867 standaard	

2.3 Zuivering

Er zijn diverse bewezen technieken, die door de raffinaderijen en de procesindustrie worden gebruikt voor de zuivering van waterstof. Tevens zijn er de laatste jaren ontwikkelingen op het gebied van zuiveringstechnieken die kunnen leiden tot zeer hoge waterstofgehalten. In de navolgende paragrafen zijn de drie meest toegepaste technieken nader beschreven.

Pressure Swing Adsorptie

Pressure Swing Adsorption (PSA) is de huidige industriestandaard voor het zuiveren van waterstof uit SMR of ATR processen. Gesimplificeerd wordt in deze zuiveringstechnologie de te zuiveren stroom over een kolom geleid met adsorptiemateriaal. Typische adsorptiematerialen zijn zeoliet 5A, silica gels, alumina of actieve kool. De onzuiverheden adsorberen met verschillende snelheid aan deze materialen, waarbij het waterstof het minst snel adsorbeert. De onzuiverheden blijven dus achter in de kolom, die daarmee langzaam gevuld wordt. Als de kolom verzadigd is met onzuiverheden wordt deze schoongemaakt door de druk in de kolom te verlagen en de stroom om te keren.



Figuur 2.5: Schematische weergave van het PSA proces [9].

Om een continuproces te realiseren wordt in de praktijk een 4-tal (of meer) kolommen gebruikt die afwisselend adsorberen of geregenereerd worden.

Afhankelijk van de doorstromsnelheid, procescondities en gebruikte adsorptiematerialen kan een PSA waterstofzuiverheden realiseren tussen de 98-99.9999 mol%. Momenteel worden de PSA's gedimensioneerd op de zuiverheidseisen van het waterstof verder op in het proces. Deze liggen meestal boven de 98%. Uit de PSA komt naast de zuivere waterstof stroom een afvalgasstroom ('tail gas'). In de onderstaande tabel is een typische tailgas samenstelling weergegeven.

Tabel 2.5: Typische tailgas samenstelling [11].

COMPONENT	RANGE (MOL%)
KOOLSTOFDIOXIDE	50-55
WATERSTOF	24-26
METHAAN	15-20
WATER	0-5
KOOLSTOFMONOXIDE	0-2

De tailgas stroom wordt gebruikt als brandstof in eerdere processtappen. Een deel van het waterstof blijft achter in de kolom en wordt met de restgassen meegevoerd. De zogenaamde recovery rate (percentage van de oorspronkelijke waterstof dat in de gezuiverde stroom terecht komt) ligt in de orde van 80-90% van de inkomende gasstroom.

Membranen

Membranen bestaan uit holle polymere fibers, die in parallel zijn geplaatst in een module. De capaciteit kan worden verhoogd door het aantal membraanmodules te verhogen. Het principe berust op het verschil in selectieve permeabiliteit (mate van doorlaatbaarheid) van de verschillende gasvormige componenten. Hierdoor zal de ene component -afhankelijk van de partiele dampspanning- eenvoudiger door het membraan worden doorgelaten dan het andere component. Met name lichte moleculen en sterk polaire gassen hebben een hoge relatieve permeabiliteit en zullen eenvoudig uit de inkomende gasstroom kunnen worden verwijderd, zoals is gevisualiseerd in figuur 2.6.

Low permeability	High permeability
$C_3H_8 \Rightarrow C_2H_6 \Rightarrow N_2 / CH_4 \Rightarrow CO \Rightarrow Ar \Rightarrow O_2 \Rightarrow H_2S \Rightarrow CO_2 \Rightarrow H_2O \Rightarrow H_2 \Rightarrow He$	

Figuur 2.6: Relatieve component permeabiliteit voor polymere fibers [12]

Dergelijke systemen werken veelal bij 10-40 bar, waarbij zuiverheden van >99.5% kunnen worden bewerkstelligd. De recovery rate ligt in de orde van 80-90%.

Cryogene destillatie

Cryogene destillatie of lage temperatuur scheiding is een volwassen technologie, die met name in raffinaderijen wordt toegepast. Het proces vindt plaats onder zeer lage temperaturen (lager dan -150 °C) [12]. De scheiding berust op het verschil in kookpunt van de componenten in een gasmengsel. Het waterstof heeft een zeer laag kookpunt (-252,9°C), waardoor het, na koeling, in de gasfase blijft terwijl de (meeste) andere componenten condenseren en kunnen worden afgevangen.

Low boiling point	High boiling point
$He \Rightarrow H_2 \Rightarrow N_2 \Rightarrow O_2 \Rightarrow CH_4 \Rightarrow C_2H_6 \Rightarrow CO_2 \Rightarrow C_3H_8 \Rightarrow C_4H_{10}$	

Figuur 2.7: kookpunten van diverse gasvormige componenten [12]

Afhankelijk van de inkomende gassamenstelling kunnen zuiverheden van circa 99% worden gehaald, waarbij het waterstof onder hoge druk wordt geproduceerd. Typische recovery rates zijn 80-90%. Nadeel is dat water koolstofdioxide en waterstofsulfide voor dienen te worden verwijderd om dichtvriezen (water en koolstofdioxide) en corrosie (waterstofsulfide) te voorkomen.

2.4 Marktprognose

Zoals eerder gememoreerd, wordt op dit moment de markt voor waterstofproductie gedomineerd door Steam Methane Reforming (SMR), dat veelal wordt gebruikt in industriële processen.

Gedreven door de overheidsdoelstellingen om te verduurzamen bestaan de aangekondigde waterstofprojecten grotendeels uit productie door middel van elektrolyse. Daarnaast is het mogelijk dat de bestaande (fossiele) waterstofproducenten op zoek gaan manieren om te verduurzamen.

De productie van waterstof door middel van elektrolyse is nog volop in ontwikkeling en de capaciteiten van de productie-installaties zijn veel in de orde van grootte van <1MW. De laatste jaren werken de producenten van electrolyzers aan een verdere industrialisering en standaardisering van hun producten. Het gevolg hiervan is dat de huidige capaciteit van state-of-the-art electrolyzers aan het stijgen is naar 10MW. Een voorbeeld hiervan is de 10MW PEM electrolyzer die door Shell recentelijk op de Rheinland site in de buurt van Keulen in gebruik is gesteld [13]. In de komende jaren is de verwachting dat de eerste golf van projecten een vergelijkbare omvang hebben. In Nederland zijn bijvoorbeeld de projecten van VoltH2 [14] en Djewels [15] daar voorbeelden van.

In het klimaatakkoord is een ambitie gedefinieerd om in 2022-2025 de huidige elektrolysecapaciteit op te schalen naar 500 MW en vervolgens in 2026-2030 verder op te schalen naar 3-4 GW [16]. Deze opschaling wordt voornamelijk gedaan door de bestaande modules in serie te schakelen. Uitdaging hierbij is of de fabrikanten in korte tijd de lessen uit de huidige electrolyzers kunnen vertalen naar het opschalen van de productie. Een laatste stap is een verder opschaling naar 3-4 GW-projecten in 2030. Hiervan zijn NorthH2 [17] en SeaH2Land [18] voorbeelden. De enige uitzondering op bovenstaande is het H2-Gateway project in de haven van Den Helder [19]. Hier wordt gewerkt aan een project om op basis van aardgas grootschalig 'blauwe' waterstof te produceren en de koolstofdioxide af te vangen.

Momenteel is de grijze waterstof goedkoper dan de groene waterstof. De mogelijke toekomstige afname in productiekosten van groen gas (zie ook §5.2), hernieuwbare elektriciteit en de wens om fossiele brandstoffen te vervangen door CO₂ vrije gassen, zal naar verwachting op lange termijn leiden tot een toename in groene waterstofproductie ten opzichte van grijze- en blauwe waterstof [20].

Daarnaast zal in de toekomst naar alle waarschijnlijkheid grote hoeveelheden waterstof vanuit het buitenland geïmporteerd moeten worden om aan de vraag en leveringszekerheid te voldoen [21,22]. Op grote afstanden kan dat bijvoorbeeld door middel van een pijpleiding of een schip gebeuren. Voor het langeafstand transport met behulp van schepen wordt naast vloeibaar waterstof [23] ook gekeken naar ammoniak. Ammoniak heeft als voordeel dat het een compactere energie drager is vergeleken met waterstof². Daarnaast is vloeibaar ammoniak te transporteren bij hogere temperaturen (-33°C t.o.v. -253°C voor waterstof) of lagere drukken (10 bar t.o.v. 350-700 bar voor waterstof) wat het transport minder energie intensief en goedkoper maakt [24]. Tot slot is de verwachting dat ammoniak ook als scheepsbrandstof kan worden ingezet al moet de kanttekening gemaakt worden dat de toxiciteit van ammoniak een aandachtspunt is [25]. Eenmaal aangekomen op de bestemming, wordt het vloeibare ammoniak weer naar waterstof geconverteerd (via ammoniak cracking) of direct in een industrieel proces gebruikt worden (bijvoorbeeld kunstmestproductie). Het gasmengsel dat geproduceerd wordt uit ammoniak bevat waterstof, stikstof (1:3 met waterstof) en max. 100 ppm ammoniak [26]. Een moleculaire zeef wordt gebruikt om het gasmengsel uit de ammoniak cracker te drogen en het ammoniak gehalte tot 1 ppm te brengen.

² Vloeibaar waterstof heeft een energiedichtheid van 8.49 MJ/liter en vloeibaar ammoniak een dichtheid van 12.7 MJ/liter, beide gebaseerd op laag calorische waarden

3 GEBRUIKERSTOEPASSINGEN

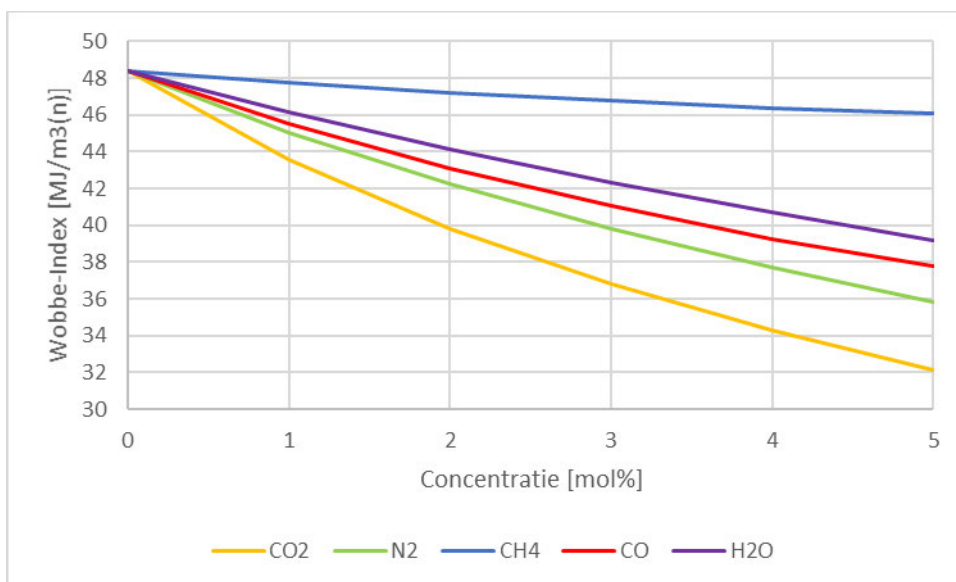
3.1 Specificaties gasverbruikstoestellen

De uitrol van een nieuwe waterstofinfrastructuur gecombineerd met een nieuwe markt voor waterstofstoestellen geeft een kans om waterstofkwaliteit (qua Wobbe range en onzuiverheden) te definiëren die past bij de te ontwerpen (of al ontworpen) waterstofapparatuur. Een goede aansluiting tussen brandstofsamenstellingen en apparatuur voorkomt in de toekomst discussies omtrent gaskwaliteit. Dit hoofdstuk beschrijft -voor zover op dit moment bekend- de benodigde specificaties voor waterstof (bij aflevering) die relevant zijn voor de diverse typen gasverbruikstoestellen, inclusief brandstofcellen.

3.2 Impact van de waterstofsamenstelling op gedrag van verbrandingstoestellen

3.2.1 Wobbe-index

De ontwikkeling van verbruikstoestellen op waterstof is momenteel nog volop gaande. Ten tijde van het schrijven van dit document lopen enkele pilotprojecten, waarbij 99,5% zuivere waterstof wordt gebruikt. Voor de verbrandingstoestellen geldt dat met name de Wobbe-Index van invloed is op het gedrag van het toestel. Door de aanwezigheid van met name methaan, stikstof, koolstofdioxide en koolstofmonoxide kan deze sterk variëren, zoals grafisch is weergegeven in figuur 3.1. Uit de figuur is te herleiden dat de aanwezigheid van alle componenten een verlaging van de Wobbe-Index tot gevolg heeft. Het vermogen van het toestel daalt evenredig door de verlaging van de Wobbe-index. Daarnaast neemt de verbrandingsluchtovermaat toe bij afname van de Wobbe index, hetgeen invloed heeft op de verbrandingsprestaties en efficiëntie van het betreffende gebruiksapparaat. Dit treedt op bij alle gebruiksapparatuur die geen regelsysteem toepassen en wordt navolgend nader toegelicht.



Figuur 3.1: Effect op de Wobbe-index [0,25] door bijmenging van verschillende onzuiverheden aan waterstof.

Er is een voordeel met betrekking tot het behouden van een breed aanbod aan waterstof als de eindgebruikerstoepassingen al ontworpen zijn voor de verwachte range aan samenstelling. Dit betekent dat - voor de verwachte variatie in Wobbe - de eindgebruikersapparatuur veilig moet functioneren en de doelmatigheid van de toepassing moet worden behouden. In de navolgende paragrafen worden de deze aspecten besproken voor de verschillende categorieën eindgebruikersapparatuur.

De uitsluiting in ISO 14687:2019 [10] van koolstof houdende componenten vormt een ernstige belemmering voor industrieel geproduceerde waterstof (zie paragraaf 6.1), waardoor de meest ruime waterstofs specificatie -op componentniveau- is gegeven in de PAS4444 [27]:

- Waterstof: > 98 mol%
- Stikstof + argon + helium: < 2 mol%
- Methaan + koolstofdioxide + koolwaterstoffen: < 1 mol%

Hieruit volgt een variatie in de Wobbe-Index van 7,38 MJ/m³(n):

- 98 mol% waterstof + 1 mol% koolstofdioxide + 1 mol% stikstof: 40,97 MJ/m³(n);
- 100 mol% waterstof: 48,35 MJ/m³(n).

Indien men deze range aan samenstelling neemt, zonder de beperking van de Wobbe-Index die in PAS4444 wordt genoemd, dan geeft dit voorbeeld een variatie in Wobbe-Index van ca.15%. Zoals voorgaand is genoemd, leidt dit bij het gros van de eindgebruikersapparatuur tot een variatie in vermogen/thermische input van 15%³. Naast een verandering in de thermische input, zal een variatie in Wobbe-Index ook gepaard gaan met een verandering in het restzuurstof percentage in de rookgassen. Een daling in de Wobbe-Index leidt tot een verhoging van het restzuurstof percentage in het rookgas met als mogelijk gevolg vlaminstabiliteit en een rendementsverlaging. Afhankelijk van het toestel zullen eindgebruikerstoepassingen hier in meer- of mindere mate last van hebben. Zonder maatregelen, hetzij aan de toestelconstructie, hetzij aan de gassamenstelling, kan dit leiden tot een substantieel verlies van de doelmatigheid van het toestel⁴. In gasverbruiksapparatuur zonder gasluchtverhoudingsregeling, leidt deze variatie in de gassamenstelling ook tot een variatie in gas/luchtverhouding, met mogelijke gevolgen voor het ontwerp ervan.

Er dient te worden opgemerkt dat het aannemen van een opzettelijk brede range van samenstelling, zonder perspectief dat het ook daadwerkelijk gedistribueerd zal worden, kan resulteren in veel ontwikkelingsactiviteit bij de fabrikanten. Dit zal leiden tot een hogere consumentenprijs ten gevolge van de (extra) benodigde constructieve maatregelen, terwijl deze in de praktijk niet zullen voorkomen. Daardoor is een concreet beeld van de toekomstige waterstofkwaliteit nodig om de eisen aan eindgebruikersapparatuur te kunnen stellen. Om voorgaand omschreven redenen is in de PAS4444 de absolute bandbreedte voor de Wobbe beperkt tot 4 MJ/m³(n). Naar verwachting zal deze eis worden overgenomen in veel Europese landen. Voorgesteld wordt om deze ook over te nemen in de Nederlandse specificatie, zodat hiermee wordt voorkomen dat er specifieke toestellen voor de Nederlandse markt moeten worden ontwikkeld.

³ Opgemerkt wordt dat de variatie in samenstelling die in ISO 14687:2019 (Tabel 2.1, boven) tot een variatie in Wobbe Index leidt van ca. 12%.

⁴ Voor niet geregelde toestellen hebben Wobbevariaties ook impact op de efficiency

In de navolgende bespreking van de individuele gastoeepassingen wordt de analyse van het gedrag van eindgebruikersapparatuur aan de hand van de voorgaand opgetekende samenstelling behandeld.

Variërende fracties inerten in waterstof leidt tot variaties in dichtheid en calorische waarde en daarmee de Wobbe-index. Voor niet-geregelde apparatuur heeft dit tot gevolg dat de gas/lucht verhouding verandert. Bijvoorbeeld, in aanwezigheid van inerten (bijv. stikstof en koolstofdioxide) daalt de calorische waarde en neemt het restzuurstof percentage in het rookgas toe. Bij verdere toename van de inerten kan leiden tot vlaminstabiliteit en uiteindelijk afblazen en/of emissie van onverbrand waterstof.

De mate waarin de variaties in thermische input en gas/luchtverhouding de constructie van eindgebruikersapparatuur beïnvloeden en hoe die in het ontwerp kunnen worden opgevangen is aan de toestelfabrikanten. Echter, zoals boven is gememoreerd, is een alternatief de entrys specificaties smaller te maken door:

- een verhoging van het waterstofgehalte van 98% naar 99%. Dit resulteert in een bandbreedte in de Wobbe van 4,8 MJ/m³(n), ofwel ca. 10%;
- beperking van de Wobbe Index zelf, zoals in PAS4444 is opgenomen;
- het centraal bijmengen van stikstof. Hiermee wordt de Wobbe wel verlaagd, maar zal de variatie, ten gevolge van andere componenten in de waterstof, kunnen worden gereduceerd tot 7-8%⁵.

Er dient te worden opgemerkt dat centrale bijmenging van stikstof ook een gunstige invloed op de emissies aan stikstofoxiden (NO_x) kan hebben. Afhankelijk van wat de daadwerkelijk verwachte waterstofkwaliteit dient uit een kosten/baten analyse te blijken wat de laagst maatschappelijke kosten zullen zijn. Hiervoor is echter meer informatie nodig dan momenteel beschikbaar is.

3.2.2 Stikstofoxiden (NO_x) emissies

De adiabatische vlamtemperatuur van waterstof is ca. 2250 °C, terwijl deze voor G-gas ca. 1940 °C is. Door deze hogere vlamtemperatuur vindt verhoogde NO_x-vorming plaats. De vorming van thermische NO_x is sterk afhankelijk van de vlamtemperatuur en om deze reden zijn NO_x-verlagende maatregelen gericht op het verlagen van de vlamtemperatuur. Bijvoorbeeld, in volledig voorgemengde toestellen wordt NO_x-vorming gereduceerd door verbranding plaatst te laten vinden met een hogere luchtvermaat in de gehele vlam ("brandstofarme condities"). Hoe hoger de luchtvermaat, hoe lager de vlamtemperatuur, maar ook het rendement van het toestel. Voor diffusiebranders vindt een deel van de verbranding plaats bij stoichiometrische condities (volledige verbranding) bij hoge temperatuur. Voor deze branders zijn daarom andere oplossingen nodig om aan de eisen met betrekking tot NO_x te kunnen voldoen, zoals rookgasrecirculatie. Het toepassen van rookgasrecirculatie vergt extra middelen waardoor toestellen duurder worden. Zoals eerder is gememoreerd, is een mogelijkheid om in een waterstofs specificatie een minimale hoeveelheid inert gas (bijvoorbeeld, stikstof) toe te voegen. Dit heeft een verlagende werking op de NO_x-emissie, waardoor andere technische oplossingen zoals rookgasrecirculatie mogelijk kunnen worden vermeden. Het verdient aanbeveling de kosten en baten van deze bijmenging te onderzoeken, alsook de hoeveelheid aan inert gas dat minimaal nodig is voor een acceptabele NO_x-uitstoot.

⁵ Centrale stikstofbijmenging valt buiten de scope van dit onderzoek en is derhalve niet verder onderzocht.

3.3 Warmwaterketels

Deze categorie beslaat toestellen, die worden gebruikt voor industriële lage temperatuur processen ($T < 100^{\circ}\text{C}$), warm tapwater en voor ruimteverwarming (bijv. voor kantoren). Momenteel gebruiken dergelijke ketels aardgas als brandstof en het is aannemelijk dat de warmtevraag voor lage temperatuur processen, verwarming en warm water vanuit eindgebruikers zal blijven bestaan bij een transitie van aardgas naar 100% waterstof.

Industriële, commerciële en huishoudelijke warmwater ketels verschillen hoofdzakelijk in grootte, waarbij industriële en commerciële ketels door het grotere benodigde verwarmingsvermogen groter zijn dan de huishoudelijke ketels. Bij branders in zowel industriële als huishoudelijke ketels speelt de Wobbe index een belangrijke rol. Een verandering in de Wobbe Index van het gas geeft een even grote verandering in het vermogen dat het toestel levert. Daarnaast heeft een verandering in de Wobbe index voor niet geregelde toestellen een verandering in de gas-luchtverhouding tot gevolg. Branders worden daarom ontworpen en afgesteld voor een bepaalde Wobbe Index range. Wanneer een gas met een Wobbe Index waarde buiten deze range in de ketel wordt verbrand, dan dit mogelijk leiden tot vlaminstabiliteit en het uitdoven van de vlam.

In moderne aardgasgestookte huishoudelijke CV-toestellen worden volledig voorgemengde branders gebruikt. Het gas/lucht mengsel wordt in volledig voorgemengde branders homogeen gemengd voordat het in de brander wordt verbrand. Een aantal van de in ontwikkeling zijnde huishoudelijke toestellen voor 100% waterstof maakt gebruik van volledig voorgemengde branders [28]. Naast toestellen met een volledig voorgemengde brander zijn er ook toestellen in ontwikkeling die gebruik maken van diffusiebranders⁶. DNV heeft in haar lab twee moderne huishoudelijke toestellen omgebouwd van aardgas naar 100% waterstof [29]. Beide toestellen waren voorheen uitgerust met volledig voorgemengde branders, maar zijn omgebouwd naar diffusiebranders. Er dient te worden opgemerkt dat het merendeel van de industriële en commerciële aardgasketels zijn uitgerust met diffusiebranders, meestal in de vorm van ventilatorvoorzetbranders.

Door de hoge verbrandingssnelheid van waterstof/luchtmengsels ten opzichte van aardgas/lucht mengsels, is het risico op vlaminslag in voorgemengde toestellen hoog⁷. Om de verbrandingssnelheid te verlagen en daarmee het risico op vlaminslag, vindt de verbranding onder luchtvermaat (brandstofarm) plaats. Echter deze omstandigheden hebben andere uitdagingen met betrekking tot o.a. een betrouwbare ontsteking, vlamlift, onverbrande emissies (alhoewel hier meestal niet CO-houdend) en rendement. Het gebruik van diffusiebranders maakt aanvullende mitigerende maatregelen -zoals rookgasrecirculatie- voor de reductie van NO_x-emissies, noodzakelijk.

Het is momenteel onduidelijk in hoeverre de branders voor 100% waterstof geschikt zijn voor onzuiverheden, maar in het algemeen is de verwachting dat deze branders net zo robuust zijn ten aanzien van de in waterstof aanwezige sporencomponenten zoals zwavelhoudende stoffen en koolmonoxide als aardgas branders. De aanwezigheid van onzuiverheden zoals stikstof en CO₂ heeft tot gevolg dat de Wobbe index wordt verlaagd. Dit heeft een daling van het vermogen en een toename van de luchtvermaat tot gevolg. De grote uitdagingen bij toestel (en brander) fabrikanten is om toestellen dusdanig te ontwerpen dat deze toestellen een vermogensverlies beperken, vlaminstabiliteit voorkomen en emissies onder de wettelijke norm blijven. PAS4444 beperkt deze uitdaging door de Wobbeband van 4 MJ/m³(n) voor te schrijven.

⁶ In niet-voorgemengde branders (ook wel diffusiebranders genoemd) worden de lucht en brandstof afzonderlijk aangevoerd en de menging vindt stroomafwaarts van de branderkop plaats.

⁷ Vlaminslag wordt veroorzaakt doordat de uitstroomsnelheid van het gas lager is dan de verbrandingssnelheid waardoor de vlam naar de brander kruipt en op ten duur inslaat (in de brander kruipt en kan uitdoven)

3.4 Gasmotoren

Aardgasgestookte gasmotoren worden gebruikt voor het produceren van elektriciteit en/of warmte in de gebouwde omgeving (bijvoorbeeld in de tuinbouw, commerciële sector, zwembaden, overheidsgebouwen) en soms als noodstroomgenerator (bijv. in ziekenhuizen). Het betreft vaak stationaire motoren die op een vast toerental bij optimale belasting en efficiëntie kunnen draaien. Daarnaast zijn er CNG (of LNG) motoren, die als aandrijving in voertuigen worden gebruikt.

Waterstof kan als brandstof worden gebruikt voor zowel stationaire gasmotoren alsook die in voertuigen. Voor met name verbrandingsmotoren in voertuigen zijn brandstofcellen thans een concurrent, welke o.a. efficiënter (kunnen) zijn maar ook duurder zijn, een kortere levensduur hebben en een hogere waterstofzuiverheid vereisen.

Vanwege lagere klopvastheid en andere motorische aspecten kan waterstof niet zondermeer worden toegepast in bestaande aardgasgasmotoren. “Dedicated” waterstofmotoren zijn niet nieuw maar worden bij ons weten thans (nog) nauwelijks commercieel geproduceerd of toegepast in de praktijk. Een beperkte rondgang op internet laat zien dat een aantal motorfabrikanten [30-33] verbrandingsmotoren voor 100% waterstof ontwikkelen, waarbij in elk geval één fabrikant zeer recentelijk dual-fuel waterstof/diesel motoren te koop aanbiedt [33]. Wat de toekomstige beschikbaarheid van apparatuur betreft; in hoeverre motoren voor waterstof op grote schaal zullen worden geproduceerd hangt vanzelfsprekend van marktontwikkelingen af.

Ten aanzien van brandstofkwaliteit zijn er twee aspecten waar de kwaliteit het motorgedrag raakt. Het eerste aspect betreft de variatie in gassamenstelling -en daarmee de variatie in Wobbe-index en calorische waarde- wat effect heeft op de gas/luchtverhouding en het vermogen van de motor. Een grote variatie in deze eigenschappen stelt eisen aan o.a. de dimensionering van de brandstofdoseersystemen en de bijbehorende regelsystemen (met name voor de gas/luchtverhouding) waar de fabrikanten rekening mee zullen moeten houden. Bij regelsystemen moet men ook rekening houden met de snelheid van variaties in brandstofkwaliteit; niet alle systemen kunnen even snel reageren. Het andere aspect betreft sporenelementen, waarvoor het nabehandelingssysteem voor het verminderen van de NO_x-emissies gevoelig zou kunnen zijn, zoals bijvoorbeeld voor zwavelhoudende elementen. In het Hy4heat project zijn gasmotorfabrikanten benaderd, zij merken op dat voor waterstofmotoren die gebruik maken van SCR (Selective Catalytic Reduction) een zwavellimiet van 10 ppm (op massabasis) wenselijk is [8]. Behoudens het vraagstuk betreffende CO₂-bemesting wordt aanbevolen de Ministeriële Regeling (aard)gaskwaliteit te volgen bij het specificeren van sporenelementen in waterstof. De reden hiervoor is dat de schadelijke gevolgen van sporenelementen op waterstofverbrandingsapparatuur gelijk zullen zijn aan die van de huidige aardgasapparatuur. In het Hy4heat project wordt niet gesproken over limieten voor eventueel andere sporenelementen die aanwezig kunnen zijn in waterstof.

In de tuinbouw dient zich een meer principiële vraagstuk aan voor het eenvoudig vervangen van aardgasmotoren door een waterstofequivalent. De uitlaatgassen van de motoren worden op grote schaal ingezet voor CO₂-bemesting, een functionaliteit die waterstofmotoren niet bezitten. Hierdoor verliest een gasmotor een belangrijk deel van zijn doelmatigheid en zal er in de tuinbouw naar alternatieve oplossingen moeten worden gezocht. Dit geldt ongeacht welke specificatie voor waterstof wordt gekozen.

Daarnaast worden in kassen ook wel zgn. CO₂-kanonnen toegepast, als alternatief voor de uitlaatgassen van gasmotoren. Deze betrekken thans ook de CO₂ uit aardgasverbranding. Deze toepassing verliest ook zijn functionaliteit bij inzet van waterstof als vervanging voor aardgas. Evenals voor gasmotoren moet de CO₂ elders worden betrokken bij het wegvallen van hun aardgasvoorziening.

3.5 Brandstofcellen

Brandstofcellen kunnen worden gebruikt voor het opwekken van elektriciteit of als WKK-toepassing. Naast Proton Exchange Membrane (PEM) brandstofcellen kunnen hiervoor hoge en middelhoge temperatuur brandstofcellen voor gebruikt worden, waaronder de Solid Oxide brandstofcel (SOFC), Molten Carbonate brandstofcel (MCFC) en de Fosforzuurbrandstofcel (FAFC) [34]. Voor (relatief) kleinschalige eindgebruikstoepassingen zijn PEM-brandstofcellen het meest gangbaar, deze worden bijvoorbeeld in moderne waterstof personenauto's gebruikt. Daarnaast richten een aantal vrachtwagenfabrikanten zich op de inzet van PEM-brandstofcellen in trucks.

Daar waar verbrandingsapparatuur relatief robuust is voor onzuiverheden, zijn brandstofcellen (afhankelijk van het type) zeer gevoelig voor onzuiverheden in de brandstof (waterstof) en lucht. In de tabellen 3.1 en 3.2 zijn de specificaties voor zowel het waterstof als de lucht opgetekend. De opgetekende sporencomponenten kunnen vrijkomen bij reforming en partiele oxidatie (zie hoofdstuk 2).

Tabel 3.1: Waterstofspectificaties brandstofcel [ref: Nedstack, 10]

Component	Maximale concentratie ^{A)}
Koolstofmonoxide (CO)	0,2 ppm
Koolstofdioxide (CO ₂)	0,1%
Totaal zwavel	0,004 ppm
Kwik (Hg)	0,004 ppm
Formaldehyde (HCHO)	0,01 ppm
Mierezuur (HCOOH)	0,2 ppm
Ammoniak (NH ₃)	0,1 ppm
Natriumhydroxide (NaOH)	0,1 ppm
Totaal halogenen (-CL, -Br, -I)	0,05 ppm
Stikstof (N ₂)	0,05%
Zuurstof (O ₂)	0,05%
Vaste deeltjes	1 µg/l (20 °C, 1 bar)

A) Bij waterstof recirculatie dient accumulatie van deze componenten te worden voorkomen

Tabel 3.2: Luchtspectificaties brandstofcel [ref: Nedstack, 10]

Component	Maximale concentratie ^{A)}
Koolstofmonoxide (CO)	25 ppm
Totaal zwavel	0,01 ppm
Stikstofdioxide (NO ₂)	0,3 ppm
Ammoniak (NH ₃)	0,1 ppm
Vaste deeltjes	PM2,5 en PM10 conform WHO richtlijnen Totaal: <1 µg/l (20 °C, 1 bar)

A) Accumulatie van deze componenten dient te worden voorkomen

Het feit dat de waterstofspectificatie voor brandstofcellen streng is en er niet op voorhand kan worden gegarandeerd dat er geen onzuiverheden vanuit het gassysteem meekomen, houdt in dat er te allen tijde een extra reiniging voor de brandstofcel dient te worden geplaatst. Hierdoor zal de business case voor dit type toestellen mogelijk onder druk komen te staan. Navraag bij leveranciers van dergelijke systemen heeft opgeleverd dat de additionele kosten voor reiniging maximaal 5-7% van de totale kosten mogen bedragen⁸.

⁸ Referenties bij de auteurs bekend

Uit gesprekken met enkele leveranciers is verder gebleken dat zij niet verwachten dat brandstofcellen op huishoudelijke schaal zullen worden toegepast, maar dat de toepassing meer op buurt- of wijkniveau (lees: minimaal 100 kW) zal komen te liggen. Op dergelijke schaal is het mogelijk om de voordelen van brandstofcellen -zowel technisch als economisch- uit te nutten. Voor de waterstofproductie worden elektrolyzers voorzien, die met korte-, directe gasleidingen aan brandstofcel zullen worden gekoppeld.

3.6 Gasturbines

Er zijn momenteel gasturbines beschikbaar die gebruik kunnen maken van 100% waterstof op basis van diffusieverbranding [35]. Diffusiesystemen in gasturbines gaan gepaard met het bijmengen van stikstof of water/stoom voor het verlagen van de NO_x-uitstoot. Het gebruik van diffusiesystemen heeft verschillende nadelen, waaronder een lagere efficiëntie, hoge kosten en hogere NO_x ten opzichte van “arme” voorgemengde systemen. Verder onderzoek en ontwikkeling richt zich daarom onder andere op de Dry Low NO_x (DLN) technologie. Deze technologie wordt ook gebruikt in moderne aardgasgestookte turbines, waarbij (brandstof) arm voorgemengde verbranding plaatsvindt.

Momenteel zijn er geen arm voorgemengde systemen, die gebruik kunnen maken van 100% waterstof. Er liggen hier uitdagingen voor zelfontsteking, vlaminslag, thermo-akoestische trillingen, hogere vlamtemperatuur en bijbehorende problemen met betrekking tot de NO_x-uitstoot en levensduur. Afhankelijk van de gebruikte techniek en de leverancier laten pilots en/of demonstraties met arm voorgemengde turbines zien dat bijmengen van tientallen procenten waterstof (tot ca. 60%) aan aardgas mogelijk is. Gasturbine leveranciers voorzien dat het gebruik van mengsels waterstof en aardgas in de toekomst zal toenemen, vandaar dat ontwikkelingen zich daarop richten. Demonstraties met stikstof/waterstofmengsels zijn uitgevoerd tot circa 80-85% waterstof [36]. EUTurbine heeft het doel gesteld om bij 2030 gasturbines te ontwikkelen voor 100% waterstof [37].

De uiteindelijk benodigde waterstofsamenstelling voor gasturbines is dan ook momenteel nog niet te geven en zal afhankelijk zijn van het ontwerp van de turbine. De verwachting is dat de fabrikanten de waterstofsamenstelling zullen volgen. Omdat DLN turbines gevoelig zijn voor instabiliteit van de verbranding, zullen (temporele) variaties in gassamenstelling -en daarmee in de Wobbe-index- en gas/luchtverhouding een potentieel knelpunt zijn.

3.7 Feedstock en industriële verhittingsprocessen

Momenteel is aardgas een van de grootste energiebronnen voor de Nederlandse industrie. Aardgas wordt gebruikt voor het produceren van elektriciteit, warmte of als grondstof in een breed scala aan industriële processen. Grofweg is de industrie onder te verdelen in drie processen: indirecte verhittingsprocessen, directe verhittingsprocessen en feedstock processen.

Indirecte verhittingsprocessen

Bij indirecte verhittingsprocessen is er een scheiding tussen de verbrandingsproducten en het te verwarmen product. Vaak wordt bij deze processen stoom, water of olie verwarmd en naar het product getransporteerd om het op een gewenste temperatuur te brengen. Bijvoorbeeld de productie van stoom en warmwater, maar ook drogen, destillatie en chemische omzetting. Het temperatuurbereik voor deze processen ligt ruwweg onder 600°C. Om problemen met NO_x-emissie, vlamstabiliteit, oververhitting van het brander oppervlak en veiligheidsaspecten te voorkomen, zullen de huidige branders hergebruikt dan wel vervangen moeten worden. Momenteel zijn er geen waterstofbranders commercieel verkrijgbaar. Binnen het TKI project “Waterstof als brandstof voor industriële verhitting” [38] wordt o.a. experimenteel gekeken naar brander systemen op pure waterstof. Hierbij wordt rookgasrecirculatie toegepast als mogelijke NO_x verlagende maatregel. De thermische

efficiëntie voor rookgastemperaturen onder het waterdauwpunt is voor waterstof branders gelijk aan aardgas branders. Echter, zoals hierboven al is vermeld, is de vlamtemperatuur van waterstof hoger dan voor aardgas, waardoor de rookgastemperatuur mogelijk boven het waterdauwpunt kan komen met als gevolg een daling in efficiëntie. Andere apparatuur zoals warmtewisselaars en droogtrommels die in direct contact komen met de hete verbrandingsgassen kunnen mogelijk gevoelig zijn voor de hogere rookgastemperatuur (t.o.v. aardgas) en onzuiverheden in de waterstof. Daarnaast kan de efficiëntie van het droogproces afnemen doordat er een factor twee meer water in de rookgassen zit. Ook dient rekening gehouden te worden met de toename van de dauwpunt temperatuur waardoor bij hogere temperaturen al condensatie van de rookgassen in de schoorsteen kan plaatsvinden.

Directe verhittingsprocessen

Directe verwarming stelt het product direct bloot aan de vlam en/ of verbrandingsproducten (rookgassen). Typische directe verhittingsprocessen zijn bijvoorbeeld glasproductie, calcinatiëprocessen, metaalproductie en productie van keramiek. De directe interactie tussen de verbrandingsproducten en het eindproduct maakt dat deze verhittingsprocessen gevoeliger zijn voor veranderingen in de gassamenstelling wat mogelijk een negatief effect kan hebben op de productkwaliteit.

Bijvoorbeeld, bij de verbranding van waterstof komt veel meer water vrij dan bij de verbranding van aardgas wat van grote invloed kan zijn op processen en de ovenwandbekleding (vuurvast materiaal). Daarnaast kan de toegenomen hoeveelheid water een schuimlaag op een glasbad vormen waardoor de warmteoverdracht wordt verminderd en daarmee een directe invloed op de productkwaliteit kan hebben. Momenteel wordt er binnen het TKI project "Waterstof als brandstof voor industriële verhitting" [38] gekeken naar branders voor directe verhittingsprocessen. In dit project wordt gekeken naar de geschiktheid van bestaande branders om op waterstof te kunnen branden. Er zijn namelijk geen waterstofbranders commercieel beschikbaar. Daarnaast is het effect van onzuiverheden in waterstof op de productkwaliteit onbekend. De verwachting is dat door de directe interactie tussen verbrandingsproducten en het product en vuurvast materiaal in de oven, de onzuiverheden in waterstof voor deze processen mogelijk kritisch kunnen zijn. Tot slot kan door de aanwezigheid van inertien, zoals stikstof en koolstofdioxide, de vlamstabiliteit en de efficiëntie afnemen.

Feedstock

Voor de meeste feedstockprocessen wordt zowel de in aardgas aanwezige koolstof als waterstof gebruikt. Voor feedstockprocessen die alleen waterstof uit aardgas nodig hebben, zijn eerder mogelijke onzuiverheden relevant voor een specificatie. Voor processen die de koolstof uit aardgas gebruiken, vervalt de waarde van waterstof als vervanger van aardgas behalve voor overige warmteopwekking in het bedrijf. Evenals bij kassen moet een andere bron van koolstof worden aangewend.

Figuur 3.2 geeft een overzicht van de belangrijkste feedstockprocessen in Europa die gezamenlijk 10 miljoen ton waterstof verbruiken.

Different roles of hydrogen in this transition

Today, about 10 million tons of hydrogen is already used in the EU industry, mainly as feedstock for the production of ammonia and in the refining industry

About 10 million tons of hydrogen is used in the European industry on a yearly basis, primarily as feedstock in the chemical and refining industries.

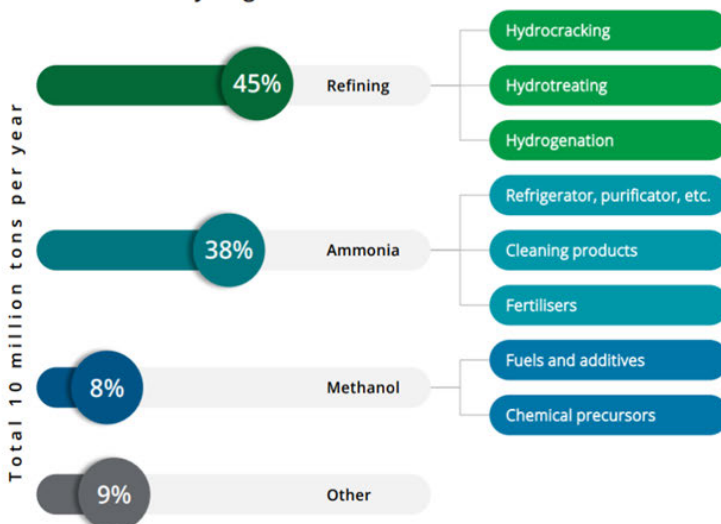
In the chemical industry, hydrogen is mostly used as feedstock to produce ammonia. Ammonia is mainly used as a fertiliser but it is also a key component of various household cleaning products under the form of ammonium hydroxide. In industrial processes, ammonia serves as a refrigerator, purificator and chemical stabilizer.

In addition to ammonia, hydrogen is involved in the production of methanol, which is mainly used as a chemical building block to produce other chemical compounds, fuels and additives.

In the refining industry, hydrogen is used in the conversion of crude oil for:

- Breaking large molecules into smaller molecules with higher added value (Hydrocracking)
- Removing contaminants such as sulfur, nitrogen and metals from crude oil fractions (Hydrotreating)
- Stabilizing some chemical products (Hydrogenation)

Current uses of hydrogen in the EU



Figuur 3.2: Belangrijkste processen die waterstof als feedstock gebruiken in Europa [39]

Raffinage:

Bij raffinaderijen wordt waterstofgas gebruikt voor de ontzwaveling van brandstoffen en kraken van aardoliefracties. In beide gevallen vindt het proces plaats in de aanwezigheid van een katalysator, die gevoelig is voor bepaalde componenten in de waterstofvoeding. Het benodigde waterstof in raffinaderijen wordt geleverd door steam methane reforming van aardgas, waarbij het aardgas gezuiverd wordt van chloor- en zwavelhoudende componenten om vergiftiging van de katalysatoren in het raffinage proces te voorkomen. Mogelijk dat deze processen ook ingezet kunnen worden bij het zuiveren van het geleverde waterstof. Daarnaast wordt momenteel aardgas gebruikt voor het opstarten van het proces of wanneer extra energie nodig is. Het aardgas zou mogelijk door waterstof kunnen worden vervangen. Ook hierbij geldt dat er momenteel geen waterstofbranders commercieel beschikbaar zijn en dat meer onderzoek nodig is naar de effect van onzuiverheden op het verbrandingsgedrag.

Ammoniakproductie

Bij de productie van ammoniak wordt waterstof met behulp van een steam methane reformer geproduceerd. Een deel van de geproduceerde ammoniak wordt gebruikt voor de productie van salpeterzuur, urea en ammoniumsulfaat [40]. Deze processen zijn veelal geïntegreerd in het ammoniakproductieproces. Voor de productie van urea is koolstof nodig. Het koolstof wordt aangevoerd via de koolstofdioxide die is afgevangen bij het steam methane reforming proces. Evenals bij de kassen zal hiervoor een andere koolstofbron moeten aangewend. Overstappen op waterstof betekent dat het traditionele proces zal veranderen en ook invloed zal hebben op deze productieprocessen, zo zal de warmtevraag die bij deze hoge temperatuur processen nodig is (deels) elders moet worden geproduceerd.

Methanolproductie

Methanol wordt nu voornamelijk gemaakt uit aardgas (hoofdzakelijk methaan) en stoom en over een nikkel-katalysator geleid, waarbij stoom in overmaat aanwezig is in een verhouding van 3:1. Methanol is ook te synthetiseren door gisting of uit gangbare chemische grondstoffen, steenkool of uit biomassa. Methanol kan duurzaam geproduceerd worden uit CO₂ en groene waterstof. Als CO₂ bron kan hierbij CO₂ uit biogas upgrade-faciliteiten of CO₂ uit lucht benut worden.

Overige:

Waterstof wordt gebruikt in de staalindustrie voor het annealen (warmtebehandeling) van staal. Door het toepassen van waterstof wordt het oppervlak gereinigd door de reductie van oxides,

De productie van staal vindt nu plaats door het stoken van cokeskolen om ijzer uit ijzererts vrij te maken. Bij dit proces komt veel CO₂ vrij. Groene staalproductie is mogelijk door groene waterstof als warmtebron te gebruiken. In Zweden staat een proeffabriek die met dit proces werkt en ervaring opdoet en Tata steel overweegt om vanaf 2035 de staalproductie te verduurzamen waarbij in 2045 de productie volledig via duurzame waterstof zou kunnen plaatsvinden [41,42]

4 NETASPECTEN

Waterstof als algemene vervanger voor aardgas ten behoeve van verwarming, chemische grondstof⁹ en voor energieopwekking is nieuw voor Nederland. Om die nieuwe keten tot stand te brengen moet er tijdig een robuust transportnet op orde zijn, als 'backbone' (ruggengraat) voor die nieuwe keten.

Om deze backbone te realiseren is onderzocht wat de invloed van onzuiverheden in het bestaande (hoofd)aardgastransportsysteem op de zuiverheid van de te transporteren waterstof is en welke maatregelen nodig zijn om onacceptabele vervuilingen te kunnen voorkomen [43]. Het onderzoek heeft zich gericht op de hogedruk transportleidingen (HTL). Uitgangspunt van het onderzoek is geweest dat het aardgassysteem wordt gespoeld met stikstof voordat het wordt overgezet op waterstof en dat er geen additionele reiniging wordt toegepast.

Regionale transportleidingen (RTL, 16-40 bar) zijn vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Er kan echter worden aangenomen dat de informatie ook bruikbaar is voor het RTL-netwerk, waarbij rekening dient te worden gehouden met de aanwezigheid van het de wanden geadsorbeerd zwavelhoudend odorant (tetrahydrothiofeen, THT), omdat het RTL -in tegenstelling tot het HTL- wordt geodoriseerd.

Gasunie heeft in het najaar van 2020 een publieke consultatie gehouden, waarin drie waterstof specificaties zijn voorgesteld voor invoeding op de waterstof-backbone [44]. Deze specificaties bevatten de mogelijke onzuiverheden in het geproduceerde waterstofgas. Hierbij is rekening gehouden met welke eindgebruikers mogelijk dit waterstof gaan gebruiken en welke eisen hier gesteld worden aan de zuiverheid maar met name ook de onzuiverheid van dit waterstofgas (zie tabel 4.1).

Tabel 4.1: Conceptvoorstel Gasunie waterstofspectificaties tijdens de consultieronde (najaar 2020)

Component	Specificatie		
	1	2	3
Waterstof	≥ 98,0 mol%	≥ 99,0 mol%	≥ 99,5 mol%
Totaal koolwaterstoffen inclusief methaan	≤ 0,1 mol%	≤ 0,1 mol%	≤ 0,1 mol%
Zuurstof	≤ 0,1 mol%	≤ 0,1 mol%	≤ 0,1 mol%
Totaal inert	≤ 2,0 mol%	≤ 1,0 mol%	≤ 0,5 mol%
Koolstofdioxide	≤ 20 µmol/mol	≤ 20 µmol/mol	≤ 1 µmol/mol
Koolmonoxide	≤ 20 µmol/mol	≤ 20 µmol/mol	≤ 20 µmol/mol
Totaal zwavel inclusief H ₂ S	≤ 5 µmol/mol	≤ 5 µmol/mol	≤ 5 µmol/mol
Mierenzuur	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol
Formaldehyde	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol
Ammoniak	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol	≤ 10 µmol/mol
Gehalogeneerde componenten	≤ 0,05 µmol/mol	≤ 0,05 µmol/mol	≤ 0,05 µmol/mol
Water dauwpunt	≤ -8 °C @ 70 bar(a)	≤ -8 °C @ 70 bar(a)	≤ -8 °C @ 70 bar(a)
Alle overige verontreinigingen	disclaimer	Disclaimer	Disclaimer
Temperatuur	5 - 30 °C	5 - 30 °C	5 - 30 °C

Tijdens de consultatieronde is duidelijk geworden dat het niet haalbaar is om de eisen/wensen van mogelijke invoerders van waterstof en de eisen/wensen van mogelijke eindgebruikers allemaal op elkaar af te stemmen met de voorgestelde specificaties. Bij aardgas is dit overigens niet anders.

Uiteindelijk heeft dit geleid tot een indicatieve waterstofspectificatie, die nu door HyNetwork Services¹⁰ wordt gehanteerd [45]. Deze is weergegeven in tabel 4.2.

⁹ Gebruik als chemische grondstof is niet nieuw maar tot nu toe vaak door producent zelf vervaardigd vanuit aardgas.

¹⁰ Een dochteronderneming van Gasunie, die zich bezighoudt met waterstoftransport

Tabel 4.2: Indicatieve waterstofsificatie Hynetwork Services voor de waterstofbackbone (maart 2022)

Parameter	Specificatie	Opmerking/motivatie
Waterstof	≥ 98 mol%	
Totaal koolwaterstoffen inclusief methaan	$\leq 1,5$ mol%	Koolwaterstoffen verhogen de calorische waarde en Wobbe-Index en kunnen tot problemen leiden bij verbrandingsprocessen.
Zuurstof	≤ 10 molppm	Beperking door feedstocktoepassingen
Totaal inert (N ₂ , Ar, He)	≤ 2 mol%	Leiden niet tot problemen tot de toepasbaarheid van waterstof in feedstockprocessen. Kosten voor verwijdering zijn relatief hoog.
Koolstofdioxide	≤ 20 molppm	Compromis tussen kosten voor reiniging en toepasbaarheid.
Koolmonoxide	≤ 20 molppm	Compromis tussen kosten voor reiniging en toepasbaarheid (met name in brandstofcellen).
Totaal zwavel inclusief H ₂ S	≤ 5 molppm	Wordt momenteel ook gehanteerd voor aardgas
Mierenzuur	≤ 10 molppm	Beperking van de toepasbaarheid in brandstofcellen.
Formaldehyde	≤ 10 molppm	Beperking van de toepasbaarheid in brandstofcellen.
Ammoniak	≤ 10 molppm	Kan in waterstof voorkomen als ammoniak als basis wordt gebruikt.
Gehalogeneerde componenten	$\leq 0,05$ molppm	Overgenomen uit ISO 14687:2019 (Grade E)
Water dauwpunt	$\leq -8^{\circ}\text{C}$ @ 70 bara	Wordt momenteel ook gehanteerd voor aardgas
Alle overige verontreinigingen		De waterstof mag geen vast-, vloeibaar- of gasvormig materiaal bevatten dat de integriteit of werking van leidingen of een gastoestel zou kunnen verstoren.
Temperatuur	5-50°C	Uit de consultatieronde is gebleken dat deze waarden acceptabel zijn.

4.1 Vervuilingen

Bij het opereren van aardgasleidingen worden diverse verontreinigingen gevormd en/of aangetroffen in vloeibare en vaste vorm (en alles daartussenin), die verband houden met het behandelen en transporteren van aardgas. Op hoofdlijnen kunnen de volgende categorieën worden onderscheiden:

- aardgascondensaat bestaat uit een mengsel van stoffen, hoofdzakelijk koolwaterstoffen, die condenseren (na gasbehandeling) als gevolg van temperatuur- en drukverlaging bij het transport van aardgas;
- Zwavel: Zwavelcomponenten, die aanwezig zijn in aardgas, kunnen zich afzetten aan de leidingen en vrijkomen tijdens het transport van zwavelvrij waterstof;
- oliën en vetten worden ingezet als industriële smeermiddelen voor bewegende onderdelen. Hierbij valt te denken aan sealolie bij compressoren, smeervet in afsluiters en smeerolie in turbinemeters;
- glycol wordt gebruikt als absorptiemiddel voor het “drogen” van aardgas bij de gasbehandeling. Ondanks de zeer lage dampspanning zal altijd (onder andere in de vorm van aerosolen) een geringe hoeveelheid glycol verdwijnen uit de installatie in het leidingnetwerk. Vanwege de fysische eigenschappen zal glycol mogelijk in geringe hoeveelheden aanwezig blijven op de binnenwand;
- blackpowder bestaat voornamelijk uit corrosieproducten van stalen gasleidingen. Het kan gemengd voorkomen met mijnstof, vuil, zand, zouten, water, glycol, aardgascondensaat, olie en dergelijke. Blackpowder heeft een zeer inhomogene samenstelling en variabele verschijningsvormen. De samenstelling kan per leiding, gassamenstelling en in de tijd variëren.

Naast de bovengenoemde hoofdcategorieën kunnen er tijdens onderhoudswerkzaamheden ook nog andere componenten, zoals kwik, in kleine hoeveelheden worden aangetroffen [47].

4.2 Reiniging

De aangetroffen vervuilingen in aardgastransportleidingen zijn zeer divers van aard. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen vaste stoffen, vloeistoffen en vluchtige/gasvormige componenten. Deze laatste groep componenten zijn grotendeels te verwijderen tijdens het spoelen ('verdringen') met stikstof, die als tussenstap voorzien is bij de omschakeling van een leiding van aardgas naar waterstof. De focus ligt dan ook op de vaste stoffen en -al dan niet vluchtige- vloeistoffen.

De vaak 'vettig' aanvoelende vaste stoffen bestaan onder andere uit zand, blackpowder, coating deeltjes, smeervet etc., welke al dan niet versmeerd zijn geraakt met oliën, glycolen en aardgascondensaat. De leidingwanden zijn voor een deel vervuild met deze massa, is verzameld in sifons, zogenaamde "dode poten"¹¹ en in afsluiters. Bovendien kan zich in zinkers vloeistof verzamelen.

Op basis van kwantitatieve- en kwalitatieve informatie uit onder andere uitgevoerde pig-runs wordt momenteel door Gasunie gewerkt aan een reinigingsprotocol om aardgasleidingen geschikt te maken voor waterstof transport en te laten voldoen aan de specificaties uit tabel 4.2.

De na reiniging achtergebleven vaste componenten kunnen onder bepaalde omstandigheden op transport komen en dienen verwijderd te worden bij aflevering. Verwijdering kan eenvoudig gebeuren met een stoffilter. Glycolen, water, olie en vet dienen ook verwijderd te worden om schade aan de apparatuur bij eindgebruikers te vermijden. Afhankelijk van de consistentie komen hiervoor vloeistofvangsters of stoffilters in aanmerking. Voor het verwijderen van specifieke componenten zoals aromaten, zwavelverbindingen, vluchtige koolwaterstoffen dienen ab/adsorptiefilters te worden toegepast. Deze onzuiverheden uit de aardgasleidingen zullen op den duur afnemen.

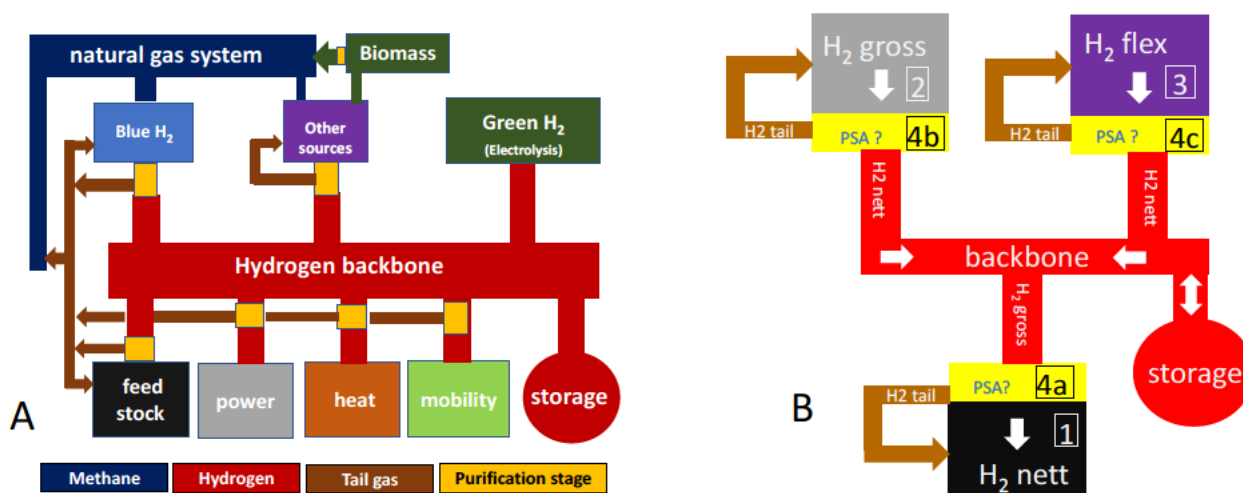
Naar verwachting kunnen de aanwezige verontreinigingen tot zeer lage concentraties worden gereduceerd, zodat verwacht wordt dat uitgaande zuiverheden van 99,5% (specificatie 3 uit tabel 4.1) kunnen worden gerealiseerd. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat dit natuurlijk afhankelijk is van de inkomende gaskwaliteit en dat deze-, op basis van theoretische aannames gebaseerde verwachting nog wel in de praktijk dient te worden bevestigd. Hiervoor wordt onder andere gebruik gemaakt van de resultaten, die zijn verkregen uit onderzoeken die zijn uitgevoerd ter voorbereiding van de omschakeling van de leiding tussen Terneuzen (Dow) en Sluiskil (Yara) [48]. Daarnaast zijn bij Gasunie onderzoeken in voorbereiding met als doel beter inzicht te krijgen in de maximum waterstofzuiverheid die getransporteerd kan worden in voormalige aardgasinfrastructuur.

¹¹ Een "dode poot" is een aftakking op een leiding niet meer in gebruik is. Een dergelijke aftakking wordt dicht bij de leiding permanent afgesloten door het aanbrengen van een bolle bodemplaat, waardoor er geen gas meer kan uitstromen. Doordat de aftakking nog in open contact staat met het gas in de leiding kunnen zich hier ook vloeistoffen en vaste stoffen ophopen.

5 ECONOMISCHE ASPECTEN

5.1 Systeemkosten in relatie tot waterstofsificatie

Uiteindelijk is het de uitdaging om tot specificaties voor de backbone te komen waarin alle eisen en mogelijkheden van producent en afnemers evenwichtig tegen elkaar worden afgewogen, inclusief mogelijkheden om waterstof te zuiveren. DNV en Gasunie hebben samen onderzocht hoe een dergelijk "Hydrogen Purity Cost Model" opgezet zou kunnen worden voor de hele markt en welke inzichten een dergelijk model kan genereren om discussies te stroomlijnen [49]. Het model richt zich op hergebruik van bestaande aardgas infrastructuur waarbij gekeken wordt naar de systeemkosten als functie van de waterstofzuiverheid zijn meegenomen. Figuur 5.1 laat de scope en de rekenmethodiek van het model zien.



Figuur 5.1: A) de scope van het Hydrogen Purity Cost Model bestaat waterstofproducenten, de backbone en afnemers en de mogelijke toepassing van zuiveringsinstallaties (PSA's) en de bijbehorende tailgas flows. B) de rekenmethodiek bestaat in de kern daaruit dat iedere aangeslotene de eigen eigenschappen vergelijkt met de eisen van de backbone en een besluit moet maken af een PSA stap wel/ niet nodig is.

De methodiek van het kostenmodel bestaat daaruit dat voor een set van mogelijke backbonespecificaties, variërend van zeer ruim tot zeer nauw, iedere groep van afnemers en aanbieders besluit of voor een gegeven backbonespecificatie, een PSA-zuiveringsinstallatie noodzakelijk is. Indien dit inderdaad het geval is zullen kosten optreden voor de investering in een zuiveringsinstallatie én zullen lokaal waardedervingen optreden door de productie van tailgas. De derving bestaat daaruit dat een deel van de waterstofproductie of inname alleen nog lokaal als "stookgas" kan worden gebruikt en niet meer voor andere meer hoogwaardigere doelen beschikbaar is. Ook zal per kwaliteit specificatie meer of minder waterstof geproduceerd moeten worden door de producenten om vraag (inclusief eventuele tailgas productie) te beleveren.

De input van het model:

- waterstof volume/ capaciteit vraag & aanbod scenario's (fictief) in peiljaren 2020, 2035, 2050;
- vraag/ aanbod volumes uitgesplitst per productie (blue, green, overig) en afnemers categorie (feedstock, power, heat, mobiliteit);
- de autonome zuiverheid van de waterstofproductieprocessen en de kwaliteitseis per afnemers categorie;
- kostendata voor PSA installaties (vertrouwelijke informatie);
- scenario's voor tailgas waardering.

Er dient te worden opgemerkt dat de ontwikkelkosten voor eindgebruikersapparatuur niet in het model zijn meegenomen, omdat deze ten tijden van het schrijven van dit rapport niet bekend waren.

De outputs van het model zijn:

- trend totale marktkosten per jaar voor waterstofzuivering als functie van de backbone kwaliteitseis;
- evolutie van de trend als functie over de periode 2020-2040;
- gevoeligheid van de kostentrend voor verschillende marktontwikkelingen scenario's;
- gevoeligheid van de kostentrend voor de verschillende tailgas waarderingen.

Eigenschappen producenten en afnemers

Een belangrijke input van het kostenmodel zijn de verwachte karakteristieken van de toekomstige waterstofafnemers en producenten en hun mogelijke volumes. Deze karakteristieken zijn weergegeven in de tabellen 5.1 en 5.2.

Tabel 5.1: Aangenomen eigenschappen van de toekomstige waterstofproducenten

Rood: buiten scope model. Volumes: inschatting voor de waterstofbackbone

Hydrogen source	technique	Supply profile	Quality before purification	Local tailgas application?	Volume 2030	Volume 2050
Green	Electrolysis	intermittend	Very high (PEM / high(Alkaline) (99.99%))	no	low	high
Blue	SMR/ ATR +CCS	Base load	Low (95%)	yes	high	high
Turquoise	Pyrolysis	Base load	Low (95%)	yes	low	low
import	Liquified, Ammonia, LOHC	Base load / on demand	High (99%)	no	low	high
Industrial byproducts	Chemical processes	Base load	Low (95%)	yes	T.b.d.	low
storage	Salt Cavernes	On demand	Backbone spec.	no	medium	high

Tabel 5.2: Aangenomen eigenschappen van de toekomstige waterstofafnemers

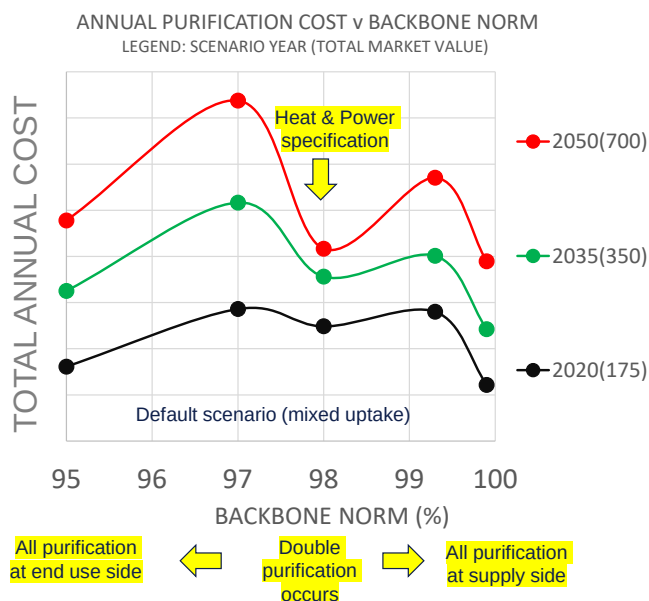
Rood: buiten scope model. Volumes: inschatting voor de waterstofbackbone

Hydrogen application	technique	Use profile	Quality demand	Local tailgas application?	Volume 2030	Volume 2050
Feedstock main (ammonia, methanol)	Reactor +catalyst	Base load	high (99.9%)	Yes	high	medium
Oil refinery	Hydro-cracking	Base load	Low (95%)	yes	low	low
Steel	DRI	baseload	Medium (98%)	yes	low	medium
Power	Turbines & engines	Intermittend	Medium (98%)	no	low	Low-high*
Industrial heat	Direct / indirect	Base load / intermiitend	Medium (98%)	maybe	high	Low-high*
Residential heat	indirect	Intermittend / seasonal	Medium (98%)	no	low	Low-high*
mobility	Fuel cell	Base load	Very high (99.99%)	no	low	Low-high*

Een belangrijke onzekerheid in het model is echter de toekomstige volumes per sector in 2035 en 2050. Besloten is voor 2035 en 2050 een set fictieve scenario's te hanteren, met als primair doel de gevoeligheid van het model te verkennen voor mogelijke scenario extremen.

Bevindingen Hydrogen Purity Cost Model

In figuur 5.3 is een output van het waterstof kostenmodel weergegeven inclusief aanwijzingen voor de interpretatie van de karakteristieke “kamelenbult” trend.



Figuur 5.3: Resultaat van het “Hydrogen Purity Cost Model” voor default “mixed uptake” markt scenario. Met total annual purification costs worden de systeem kosten bedoeld.

Bij 99,99% wordt ervan uitgegaan dat alle zuivering- en tailgastoeepassingen bij de producenten plaatsvinden en er dus via de backbone gegarandeerd 99,99% kan worden geleverd. Hierdoor treden er (vrijwel) geen zuivering- en tailgasverliezen meer op bij de eindgebruiker. In hoeverre deze zuiverheid op het exit punt kan worden gerealiseerd is op dit moment onbekend en afhankelijk van de snelheid waarmee de aardgas infrastructuur kan worden gereinigd (zie hoofdstuk 4).

Het basisinzicht is dat de kosten curves typisch drie gelijkwaardige kostenminima bevatten, echter elk corresponderend bij een volledig ander ontwerpfilosofie:

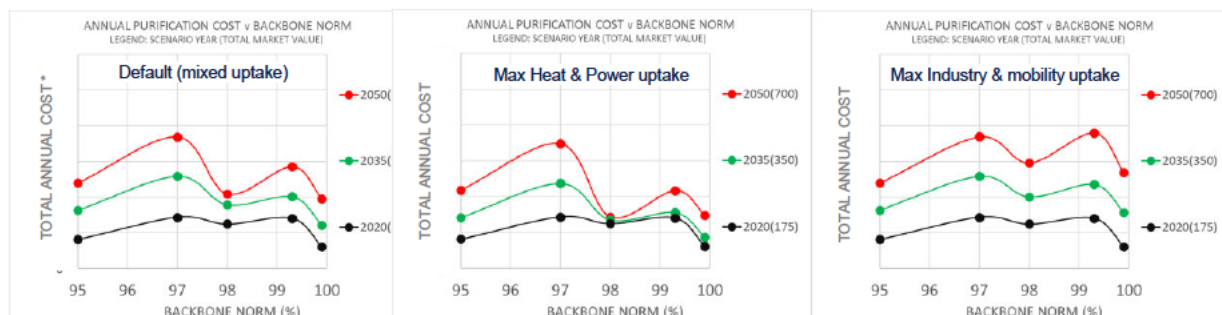
- **Zeer ruime specificatie (~95%).** In deze situatie vindt de waterstofzuivering primair bij de eindgebruiker (“just-in-time”) plaats. Analoog aan die van de Nederlandse aardgasrotonde, kunnen producenten maximaal- en tegen laagste kosten produceren. Dit kan met name aantrekkelijk zijn als een significant deel van de waterstofvraag bestaat uit (onkritische) raffinagetoepassingen en het merendeel van de industriële afnemers reeds over een eigen PSA installatie beschikt en vele kleine producenten worden verwacht.
- **Zeer nauwe specificatie (>99.9%).** In deze situatie vindt alle waterstofzuivering bij de producenten plaats. Dit is met name interessant als de productie door een klein aantal grote producenten plaats zal vinden en een groot aandeel van elektrolyse in de productie wordt verwacht. Nauwe specificaties zijn vooral ook gunstig voor het aantrekken van aardgasafnemers die over willen stappen van aardgas naar waterstof (elektriciteitscentrales, gebouwde omgeving en industriële warmte) en die niet geconfronteerd willen worden met additionele zuiveringsstappen. Ook kan het transport en distributie van waterstof en de

interactie met het buitenlandse operators zo eenvoudig mogelijk blijven. Hierbij dient te worden opgemerkt dat het onbekend is of de backbone en gasopslagen naar verwachting een dergelijk nauwe specificatie kunnen transporteren.

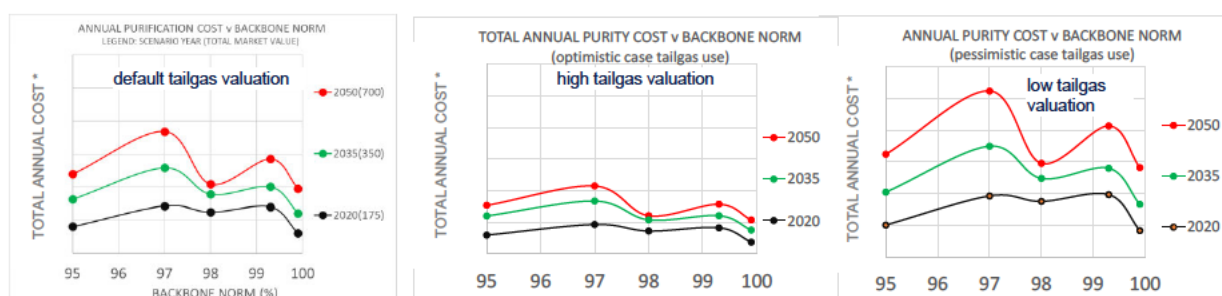
- **Slim compromis (~98%).** In alle andere situaties zal sprake zijn van een compromis en mogelijke extra kosten door “dubbele zuivering”; waterstofzuivering zowel bij een deel van de producenten en daarna alsnog bij een deel van de afnemers. Met de keuze voor een waterstofsificatie van 98% kunnen afnemers met eindgebruikersapparatuur zoals turbines en branders, die van aardgas over willen stappen op waterstof, direct vanuit de backbone worden beleverd zonder extra reinigingskosten te hoeven maken. Belangrijkste nadeel van deze keuze is dat feedstock- en brandstofcel applicaties alsnog een zuiveringsstap nodig hebben. De verwachting is echter dat de backbone (eerst) niet aan de strenge eisen van markt kunnen voldoen ten aanzien van de meest kritische vervuilingen (bijv. zwavel) en blijft de laatste zuiveringsstap waarschijnlijk altijd onvermijdelijk. Echter in het geval van de industrie zal deze zuiveringstap naar verwachting al lokaal aanwezig zijn aangezien de huidige waterstofvraag nu nog via SMR's en PSA's wordt ingevuld.

Gevoeligheidsanalyse

Analyse van de modelresultaten geven aan dat totale systeemkosten voor waterstofzuivering in hoge mate worden gedomineerd door de toekomstige marktscenario's en ook de aangenomen kostenderving voor tailgas. In figuur 5.4 is de impact van alternatieve marktscenario's weergegeven. Dit betreft een marktscenario waarin de toekomstige marktvraag gedomineerd wordt door de sectoren “Power & Heat” of juist door de sectoren “Industry & Mobility”. In figuur 5.5 is tevens de impact weergegeven van alternatieve tailgaswaarderingen. Voornaamste bevinding van beide gevoeligheidsanalyses is dat de kosten inderdaad sterk kunnen fluctueren, maar basisstructuur van de curves in stand blijft en de drie minima relatief gelijkwaardig blijven. De conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat de eerder geschetste bevindingen van het Hydrogen Purity Cost Model als robuust mogen worden beschouwd.



Figuur 5.4: Gevoeligheid van de kostencurve voor alternatieve marktontwikkeling



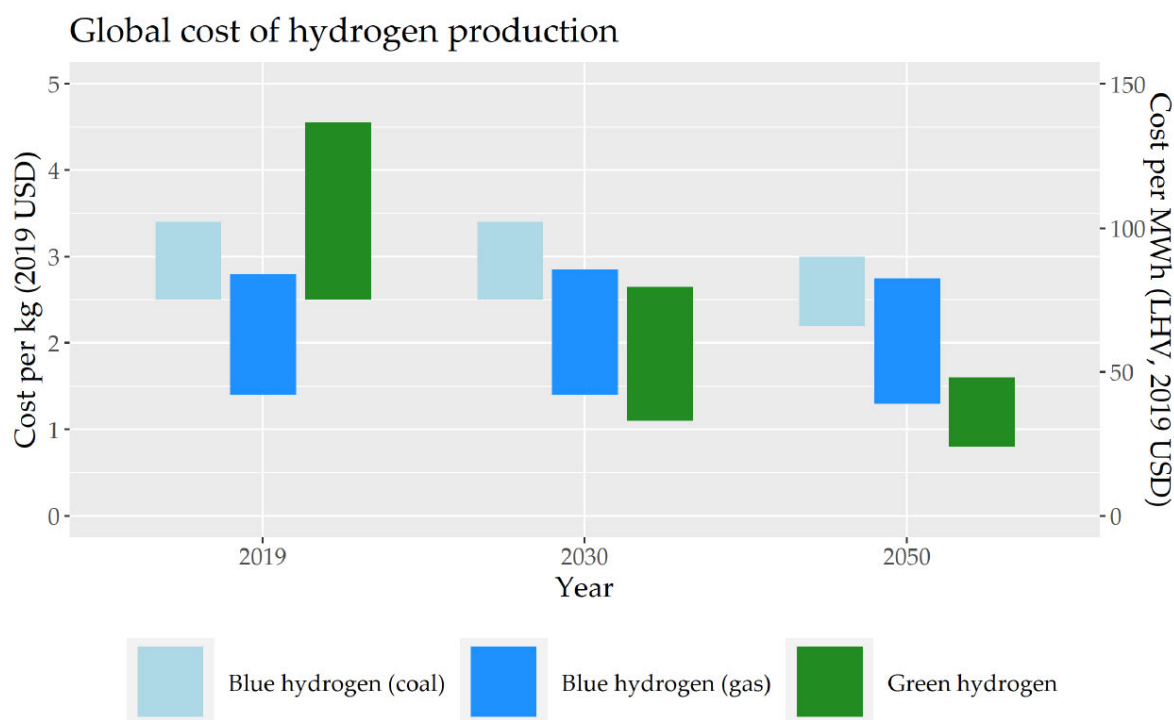
Figuur 5.5: Gevoeligheid van de kostencurve voor alternatieve tailgaswaardering

Conclusie

Het definiëren van een netwerkstandaard voor waterstofkwaliteit is een complex dossier, waarin vele belangen tegen elkaar afgewogen dienen te worden, tegen een achtergrond van diverse technische limitaties en mogelijke oplossingen. Voornaamste inzicht van het model is dat er drie mogelijke oplossingsrichtingen zijn, zijnde 1) zeer ruime kwaliteitsspecificaties (~95%), 2) zeer strenge kwaliteitsspecificaties (>99.9%) en 3) een “slim compromis” (~98%). Echter de verwachting is dat een zeer ruime systeemspecificaties -alhoewel erg aantrekkelijk voor de producenten- de backbone- en distributienetwerkoperators en de eindverbruikers voor te grote praktische uitdagingen zal plaatsen. Zeer strenge kwaliteitsspecificaties (>99.9%) daarentegen zijn erg gunstig voor de industriële (feedstock) en mobiliteit markten, maar naar verwachting op korte termijn niet haalbaar voor een backbone, bestaande uit hergebruikte aardgasleidingen en zoutcavernes. Daarmee blijft voor de korte termijn het “slim compromis (98%)” in principe nog over als meest realistische alternatief om technisch verder uit te werken met de diverse stakeholders. Op den duur, wanneer de waterstofproductie verschuift van blauw naar groen, er meer ervaring is opgedaan met het transporteren en opslaan van waterstof en de verontreinigen uit de (hergebruikte) aardgasinfrastructuur zijn verwijderd, dan kan de optie worden onderzocht om de waterstofsificatie op te waarderen van 98% naar >99.9%

5.2 Waterstofproductiekosten

De productie van waterstof uit fossiele bronnen (aardgas, kolen) met behulp van SMR is een volwassen en gevestigde technologie. Uit een studies van International Energy Agency en Bloomberg [50-52] blijkt dat de kosten voor blauwe waterstofproductie momenteel rond 1.2-2.6 \$/kg bedraagt (zie figuur 5.6).



Figuur 5.6: Productiekosten voor blauw en groene waterstof in 2019, 2030 en 2050 [53]

De productiekosten voor waterstof uit aardgas worden voor 45-75% bepaald door de gasprijzen [54]. De productie van waterstof uit fossiele brandstoffen is momenteel het goedkoopst in regio's met goedkope binnenlandse kolen en aardgas aanbod, zoals het Midden-Oosten en de Verenigde Staten. De verwachting is dat ook in de toekomst deze regio's goedkope waterstof zullen produceren. Daarentegen zijn landen zoals China die aardgas importeren afhankelijk van hoge gasprijzen en de daarmee samenhangende waterstofproductie kosten.

Tabel 5.3: Grijze en blauwe waterstofproductie kosten uit aardgas voor de Verenigde Staten en China [54]

Land	Kosten (€/kg) 2018
Verenigde Staten	1.00 \$/kg (zonder CCUS)
	1.52 \$/kg (met CCUS)
China	1.78 \$/kg (zonder CCUS)
	2.38 \$/kg (met CCUS)

De verwachtingen voor de toekomst (2030 en 2050, zie figuur 5.6) is dat de kosten voor groene waterstof zullen afnemen door lagere kosten van duurzaam geproduceerde elektriciteit (zon en wind) en door kostenbesparing door het opschaling van elektrolyzers [50-54]. Groene waterstof kan daarmee een concurrerende optie worden voor blauwe waterstof en met name in regio's met een groot aanbod van hernieuwbare energie zoals Noord-Afrika en Australië [50]. Met de juiste infrastructuur kan het voor deze regio's in de toekomst mogelijk interessant zijn om waterstof te exporteren. Bijvoorbeeld over lange afstand als vloeibaar waterstof of met behulp van waterstofdragers zoals ammoniak (zie hierboven).

6 (INTER)NATIONALE ONTWIKKELINGEN WATERSTOFSPECIFICATIES

De regelgeving met betrekking tot kwaliteitsspecificaties van waterstof is volop in ontwikkeling. Een aantal van deze specificaties is vastgelegd in normen of standaarden. Dit zijn documenten met erkende afspraken, specificaties of criteria over een product, een dienst of een methode. Dit kunnen nationale standaarden zijn zoals NEN maar ook internationale standaarden in Europees (CEN) of ISO verband.

Ook leden van associaties kunnen afspraken met elkaar maken die evengoed de status van een norm hebben. Zo hebben leden van Society of Automotive Engineers (SAE), een internationale vereniging van meer dan 128.000 ingenieurs en aanverwante technische experts in de lucht- en ruimtevaart-, automobiel- en commerciële voertuigenindustrie, afspraken gemaakt met betrekking tot de kwaliteit voor waterstof aangedreven voertuigen met een brandstofcel.

European Association for the Streamlining of Energy Exchange (EASEE) gas, een associatie van stakeholders in de Europese gasindustrie stimuleert cross border transport en de handel van gas door middel van Common Business Practices (CBP's). Dit zijn normen, procedures en/of protocollen die algemeen worden gebruikt in de gasindustrie in Europa en die door EASEE-gas worden aanbevolen om bedrijfsprocessen in heel Europa te vereenvoudigen en te stroomlijnen.

Veel afspraken zijn niet in normen vastgelegd maar in andere documenten waaronder:

- de Ministeriële Regeling (MR) gaskwaliteit, een door een Minister vastgesteld algemeen verbindend voorschrift voor Nederland;
- de PAS 4444:2020 "Hydrogen fired gas appliances". De PAS is een "Publically Available Specification" en is geen formele norm, maar is opgezet als een norm en is bedoeld om regelgeving te versnellen.

Er wordt in dit hoofdstuk onderscheid gemaakt in:

- productspecificaties die gelden voor het gebruik van een toepassing van waterstof zoals een verbrandingstoestel, een gasturbine voor energie-opwekking of een met brandstofcel aangedreven voertuig;
- gasnetspecificaties, die gelden voor de kwaliteit waarmee een gas wordt ingevoerd in een gasnet en wordt geleverd aan een afnemer van het gas.

Indien de specificatie voor een product of applicatie niet overeenkomt met de netspecificatie, moet aanvullende reiniging of opwerking van het gas plaatsvinden.

6.1 Productspecificaties

Productspecificaties hebben betrekking op de waterstofkwaliteit juist voordat deze verbruikt wordt in de gastoeppassing.

ISO 14687:2019 EN Hydrogen fuel quality — Product specification" [10] kent meerdere sets van specificaties, afhankelijk van de toepassing. PAS 4444:2020 Hydrogen-fired gas appliances – Guide [27] is een publiek beschikbare norm voor verbrandingstoepassingen. Voor voertuigen die gebruik maken van (PEM) brandstofcellen, is naast de ISO 14687:2019 grade D, ook de SAE-J2719 norm [55] beschikbaar.

6.1.1 Verbrandingstoepassingen

ISO 14687:2019 grade A en PAS 4444:2020 zijn beide voor verbrandingsprocessen ontworpen en hebben beide een minimaal toegestaan waterstofgehalte van 98%.

Er bestaan echter wel enkele verschillen tussen beide normen. Zo kent de PAS 4444:2020 een grens voor de Wobbe-index. Omdat met name de zwaardere componenten in waterstof, zoals koolstofdioxide, stikstof en water, de waarde van de Wobbe-index (sterk) beïnvloeden.

Voor de controle op de specificatie van de PAS 4444:2020 is naast de controle op de hoeveel inerte gassen en koolwaterstoffen, een controle op de Wobbe-index noodzakelijk. Immers de aangeven grenswaarde voor inerten en koolwaterstoffen garanderen niet dat het gas dan altijd binnen de aangegeven grenzen voor de Wobbe-index blijft.

Met betrekking tot de hoeveelheid koolwaterstoffen is er ook een groot verschil tussen beide normen. In de PAS 4444:2020 mag het waterstof maximaal 1 mol% koolwaterstoffen bevatten en de ISO 14687:2019 grade A geeft maximaal 0,01 mol% aan.

Ook wat betreft het zwavelgehalte en het koolstofdioxidegehalte zijn de maximaal toegestane gehalten volgens ISO 14687:2019 grade A aanmerkelijk lager dan voor de PAS 4444:2020. De zwavelgehalten in de PAS 4444:2020 zijn afgeleid van de overeenkomstige gehalten uit de aardgasspecificaties, waarvan bekend is dat deze geen probleem geven voor verbrandingstoestellen.

Het toegestane zuurstofgehalte in ISO 14687:2019 grade A is veel hoger dan in de PAS 4444:2020 specificatie.

In ISO 14687:2019 grade B voor industriële kracht en warmte, waaronder gasturbines, is de specificatie voor vrijwel alle componenten strenger dan voor grade A. De waterstofsificatie is voor deze toepassing minimaal 99,90%.

In PAS 4444:2020 wordt als motivering voor de grenswaarde van minimaal 98% waterstof genoemd dat dit een goed compromis is tussen de kosten voor waterstof en de effecten op toestellen.

6.1.2 Brandstofceltoepassingen

ISO 14687:2019 grade D en SAE-J2719 richten zich beide op waterstof voor brandstofcel aangedreven voertuigen. Hiervoor wordt een kwaliteit van minimaal 99,97% waterstof vereist. Met betrekking tot de sporencomponenten is de SAE-J2719 iets strenger met betrekking tot de hoeveelheid inerten (uitgezonderd helium), de hoeveelheid methaan, de hoeveelheid koolstofmonoxide en de hoeveelheid zwavel (4 ppb versus 1 ppb).

Beide normen hebben een lage grenswaarde voor mierenzuur en ammoniak.

In tabel 6.1 zijn de diverse specificaties samengevat weergegeven.

6.2 Gasnetspecificaties

Recent is een aantal eerste netspecificaties opgesteld. Dit betreft onder andere de DVGW 260 (najaar 2021) waarin de 5^e gasfamilie 'waterstof' is opgenomen [56]. Verder heeft EASEE gas¹² in februari 2021 een Common Business Practice (CBP) voor waterstof opgesteld [57].

Kiwa en DNV hebben in 2021 een voorstel voor specificaties van het gasdistributienet gedaan in opdracht van Netbeheer Nederland [28].

Hynetwork Services, de beoogd netbeheerder voor het waterstoftransportnet in Nederland, heeft op haar website een indicatieve specificatie voor het waterstoftransportnetwerk opgesteld, naar aanleiding van een consultatie met stakeholders [45].

¹² EASEE gas is een associatie van 99 leden die cross border transport en handel van gas stimuleert. en heeft leden die operationeel zijn in de gehele gasketen zoals producenten als BP, Total en NAM, gastransportnetbeheerders als Gasunie Transport Services, Open Grid Europe, Enagas, Gassco, Fluxys, SNAM en GRT gaz. Verder zijn gasdistributienetbeheerders, gashandelaren, eindgebruikers en beheerders van gasopslagen vertegenwoordigd in EASEE gas, Zie: <https://easee-gas.eu/members-list>

Alle genoemde netspecificaties kennen een grenswaarde van minimaal 98% waterstof. Alleen de indicatieve specificatie voor de Nederlandse gasdistributenetten kent een beperking voor de Wobbe-index. De reden hiervoor is dat de verbrandingstoestellen gevoelig zijn voor fluctuaties van de Wobbe-index en dat het voor de ontwikkelaars en producenten van verbrandingstoestellen het belangrijk is om te weten wat de grenswaarden zijn. De andere nu bekende netspecificaties kennen geen beperking voor de Wobbe-index. De onderliggende redenen om deze niet op te nemen, zijn niet bekend. In DVGW G260(A) worden de niet-waterstofcomponenten afgeleid van de grenswaarden die voor aardgas gelden.

Tabel 6.1: Specificaties toepassingen waterstof

	ISO 14687:2019					SAE-J2719	PAS 4444
Parameter	Grade A: verbranding en warmte	Grade B: Industriële kracht and warmte	Grade C: Lucht- en ruimtevaart	Grade D: Tractie PEM	Grade E: PEM stationair	FC PEM tractie	Verbrandings- toestellen
Wobbe-index							42 – 46 MJ/m ³ A
Waterstof (mol%)	≥ 98	≥ 99,90	≥ 99,995	≥ 99,97	≥ 99,9	≥ 99,97	≥ 98
Totaal niet waterstof				≤ 300 ppm	< 0,1%	300 ppm, 100 ppm niet He comp.	
Inerten				≤ 300 ppm	≤ 0,1 mol% inert N ₂ , Ar, He		≤ 2 mol% Ar, N ₂ , He
Helium			≤ 39 ppm	≤ 300 ppm	zie inerten		
Argon	≤ 1,9 mol% (O ₂ , Ar en H ₂ O)		O ₂ en Ar samen ≤ 1 ppm	≤ 300 ppm	zie inerten		
Stikstof		400 ppm	H ₂ O, N ₂ en kws ≤ 9 ppm	≤ 300 ppm	(zie inerts)	Ar en N ₂ ≤ 100 ppm	
Koolwaterstoffen	<0,01%	niet condenserend heersende druk	H ₂ O, N ₂ en kws ≤ 9 ppm	CH ₄ ≤ 100 ppm andere kws ≤ 2ppm me haaneq.	CH ₄ < 100 ppm andere kws < 2ppm methaaneq.	≤ 2 ppm	≤ 1 mol% methaan, CO ₂ en KWS
Gascondensaat	≤ -2 °C bij heersende druk						
Waterdauwpunt	-10°C bij 85 baro	niet condenserend heersende druk	H ₂ O, N ₂ en kws ≤ 9 ppm	≤ 5 ppm H ₂ O	niet cond. onder bedrijfs-condi ties	≤ 5 ppm H ₂ O	
Temperatuur							
Zuurstof	≤ 1,9 mol% (O ₂ , Ar en H ₂ O)	100 ppm	O ₂ en Ar samen ≤ 1 ppm	≤ 5 ppm	< 50 ppm	≤ 5 ppm	< 0,2 %
Koolstofdioxide	≤ 1 ppm (CO en CO ₂)		≤ 1 ppm totaal CO en CO ₂	≤ 2 ppm	< 2 ppm	≤ 1 ppm	≤ 2 mol%
Zwavel (anorganisch)							≤ 5 mg/m ³ H ₂ S
Totaal zwavel (piekwaarde voor odorisatie)	≤ 2 ppm	≤ 10 ppm		≤ 4 ppb	≤ 4 ppb	≤ 1 ppb	
Totaal zwavel (piekwaarde na odorisatie)							≤ 50 mg/m ³
Chloor				≤ 50 ppb halogenen	≤ 50 ppb halogenen		
Fluor				≤ 50 ppb halogenen	≤ 50 ppb halogenen		
Koolmonoxide	≤ 1 ppm		≤ 1 ppm totaal CO en CO ₂	≤ 200 ppb	≤ 200 ppb	≤ 0,1 ppm	≤ 20 ppm
Silicium							
Mierenzuur				≤ 200 ppb	≤ 200 ppb	≤ 200 ppb	
Ammoniak				≤ 100 ppb	≤ 100 ppb	≤ 100 ppb	
Formaldehyde				≤ 200 ppb	≤ 200 ppb		
Kwik		≤ 4 ppb					
Pa hogene microben							
Stofdeeltjes (> 5 µm)				≤ 1 mg/kg			
Niet benoemde componenten	geen stof	afpraak leverancier klant	afpraak leverancier klant	≤ 1 mg/kg stof	≤ 1 mg/kg stof en ≤ 75 µm		
Temperatuur							

A. De waarden zijn gebaseerd op de referenties [15,15], dit wil zeggen een referentiewaarde voor de volumemeting van 15 °C bij 1013,25 mbar en een referentiewaarde voor de verbranding bij 15 °C en 1013,25 mbar. Deze waarden komen overeen met 44,85-48,35 MJ/m³ voor de in Nederland gehanteerde condities: [0,25] volumemeting bij 0 °C en 1013,25 mbar en de verbranding bij 25 °C en 1013,25 mbar.

De motivatie van EASEE gas voor deze specificatie [57] is als volgt:

- waterstof zal voorlopig hoofdzakelijk uit koolwaterstoffen worden geproduceerd en elektrolyse wordt pas na 2030 significant;
- een hoge kwaliteit waterstof voor brandstofcellen wordt pas na 2030 verwacht en tot die tijd is er hoofdzakelijk behoefte aan een industriële kwaliteit;
- in de overgangsfase waarbij aardgas transportnetten worden omgebouwd naar waterstofnetten, is het mogelijk dat aardgasresiduen in de gasstroom meekomen en dit effect is nog niet bekend;
- het wordt niet mogelijk geacht dat de grade D kwaliteit kan worden gehaald in de eerste periode na ingebruikname en dat grade A kwaliteit wel haalbaar is.

Hynetwork Services stelt dat de voorstelde specificatie het resultaat is van de input van stakeholders als handelaren, producenten en consumenten tijdens een publieke consultatie in 2020. Tijdens deze consultatie zijn drie specificaties gepresenteerd (respectievelijk minimaal 98,0%, 99,0% en 99,5%) en dat bij het opstellen van de specificatie rekening is gehouden met de soms tegenstrijdige belangen van de stakeholders.

Het zwavelgehalte van 5 molppm is door Hynetwork Services gekozen vanwege de onzekerheid over aardgasresiduen in voormalige aardgasnetten die voor waterstof worden gebruikt. Hynetwork Services stelt dat geproduceerd waterstof in de regel weinig zwavel zal bevatten.

Tabel 6.2: Netspecificaties waterstof geldig voor zowel de entry- als de exitpunten.

De eenheden zijn gegeven zoals deze in de betreffende standaard zijn vermeld.

Parameter	voorstel distributie NL	DVGW G260(A)	EASEE gas	Indicatieve specificatie Hynetwork services
Wobbe-index	44,85 - 48,35 MJ/m ³ A,B)			
Waterstof	≥ 98 mol%	≥ 98 mol%	≥ 98 mol%	≥ 98 mol%
Totaal niet waterstof				
Inerten			≤ 2 mol% Ar, N ₂ , He	≤ 2 mol% inert N ₂ , Ar, He
Koolwaterstoffen	gelimiteerd door Wobbe		1,5 mol% KWS incl CH ₄	<1,5 mol% incl CH ₄
Gascondensaat	≤ 80	2 °C bij 1 ≤ P(abs) ≤ 70 bar	≤ -2 °C bij heersende druk	
Waterdauwpunt	< -10 °C (at 8 bar(a))	< 50 mg/m ³ bij overdruk ≥10 bar	< -8°C bij 70 baro	-8°C bij 70 baro
Zuurstof	≤ 0,2 mol%	≤ 1 mol%	≤ 10 ppm	≤ 10 ppm
Koolstofdioxide	gelimiteerd door Wobbe		≤ 20 ppm	≤ 20 ppm
Zwavel (anorganisch)	≤ 5 mg S/m ³ (n)			
Zwavel (alkylthiolen)	≤ 6 mg S/m ³ (n)			
Totaal zwavel (piekwaarde voor odorisatie)	≤ 20 mg S/m ³ (n)	≤ 6 mg S/m ³ (n)	≤ 21 mg S/m ³ (n)	≤ 5 ppm
Totaal zwavel (jaarlijks gemiddelde voor odorisatie)	≤ 5,5 mg S/m ³ (n)			
Totaal zwavel (jaarlijks gemiddelde na odorisatie)	-	≤ 10 mg S/m ³ (n)		
Halogenen	-	≤ 50 ppb	≤ 50 ppb	≤ 50 ppb
Koolmonoxide	≤ 2900 mg/m ³ (n)	≤ 0,1 mol%	≤ 20 ppm	≤ 20 ppm
Silicium	-			
Mierenzuur				≤ 10 ppm
Ammoniak		technisch vrij		≤ 10 ppm
Formaldehyde				≤ 10 ppm
Stofdeeltjes (> 5 µm)	≤ 100 mg/m ³ (n)			
Niet benoemde componenten	disclaimer	technisch vrij van stof of vloeistof		disclaimer
Temperatuur	5 - 20 °C			5 - 50 °C

A. De Wobbe-index van het in te voeren gas dient gedurende ten minste 50% van de tijd boven de ondergrens te liggen. Er mag maximaal 200 keer per voortschrijdend jaar een uur zijn waarin een overschrijding (een waarde onder de ondergrens) tussen de 0,2 en 0,3 MJ/m³ voorkomt, terwijl zo'n uur niet vaker dan 1 keer per 12 uren mag voorkomen. Er mag maximaal 10 keer per voortschrijdend jaar een uur zijn waarin een overschrijding van meer dan 0,3 MJ/m³ voorkomt, terwijl zo'n uur niet vaker dan 1 keer per 60 uren mag voorkomen. De waarden voor de Wobbe-index zijn uurgemiddelden.

B. De waarden voor de Wobbe-index dienen altijd boven de absolute ondergrens van 44,35 MJ/m³(n) te zijn onafhankelijk van de meetfrequentie.

7 STAKEHOLDERANALYSE

Een selecte groep bedrijven is gevraagd hun kwaliteitseisen voor het afnemen dan wel invoeden van waterstof op het landelijke waterstoftransportnet, de door hen verwachte productie van waterstof en visie op de marktontwikkeling te delen. De selectie bestond uit partijen met kernactiviteiten in verschillende takken van de waterstofketen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen geïnterviewde:

- gasproducenten die waterstof produceren en deels via een eigen transportnetwerk leveren;
- industriële gebruikers en producenten van waterstof;
- gascommodity handelaren;
- brandstofleveranciers;
- partijen uit de mobiliteitssector.

Onderstaande paragrafen en deelparagrafen bevatten de uitwerkingen van de reacties die door de afgevaardigden van de geïnterviewde stakeholders zijn gegeven.

7.1 Kwaliteitsaspecten

De besproken kwaliteitsaspecten voor waterstof hebben voornamelijk betrekking op de zuiverheid, de toegestane hoeveelheid onzuiverheden en de variatie in de Wobbe-index. Naast deze kwaliteitseisen is ook aandacht besteed aan eventuele zuivering en de positionering van het zuiveringsproces in de keten. Zo mogelijk is onderscheid gemaakt in de huidige kwaliteitscriteria en de toekomstige te verwachten criteria.

7.1.1 Gasproducenten

De huidige waterstofgasproducenten kunnen waterstof produceren en leveren met een hoge zuiverheid (genoemde minimum gehalten zijn 99,9 resp. 99,995% H₂). De geïnterviewde partijen gaven aan dat de exacte kwaliteit van het getransporteerde waterstof is afgestemd op de specificaties van de meest kritische afnemer. De meerderheid van de huidige afnemers vraagt om waterstof met een hoge zuiverheid. Typische kwaliteitseisen bestaan uit: zuiverheid van 99,9% en aanwezigheid van spoorelementen van maximaal 10 ppm CO, 1000 ppm koolstofhoudende componenten en 0,3 ppm zwavel. Eén van de huidige producenten kan de kwaliteitseisen leveren zoals gesteld door SAE J2719 voor brandstofceltoepassingen voor voertuigen. Invoeden op de waterstof backbone in geval de gaskwaliteitsspecificatie veel minder “streng” is dan de eigen specificaties en dit tot een lagere kwaliteit gas op het exitpunt leidt, is voor één partij onacceptabel. Voor een andere geïnterviewde producent is dit acceptabel mits er een positieve business case voor deze optie te maken is. Dit zal van geval tot geval bekeken moeten worden. Zuiveringsprocessen en kwaliteitscontrole vinden momenteel plaats voor entry in het net en worden door de huidige producenten in een toekomstig waterstofnet op eenzelfde centrale locatie voorzien. Grootschalige zuivering is efficiënter vanwege schaalgroottevoordelen, de continuïteit van de procesinstallaties (geen veelvuldig start-stop gedrag) en de verwerking van restgassen (tailgas) op de locatie zijn genoemde onderbouwingen voor dit standpunt.

De geïnterviewde gashandelaren zijn ook betrokken bij de ontwikkeling van nieuwe productielocaties en kunnen aangemerkt worden als toekomstige gasproducenten. Hun visie over de gaskwaliteit is beschreven in paragraaf 7.1.3.

7.1.2 Industrie

Industrieel gebruik en productie van waterstof worden op een locatie vaak gecombineerd. Door industriële gebruikers is aangegeven dat kwaliteitsaspecten, specifieke spoorelementen en Wobbe-index van belang voor het uitlijnen van installaties en processen. Stabiliteit van de hoeveelheid componenten en onderlinge verhoudingen is binnen een bepaalde bandbreedte tevens cruciaal. Momenteel zijn processen ingericht op of in te richten op waterstof met een zuiverheid van 98%. Voor verbrandingsprocessen is een maximale variatie in de Wobbe-index van 4 MJ/m³n genoemd als noodzakelijk door een van de bedrijven. Doordat nieuwe technieken nog in ontwikkelingsfase zitten, zijn de zuiverheid, soort en maximale hoeveelheid onzuiverheden en Wobbe-index niet altijd te achterhalen. Een zuiverheid van 98% is voor deze technieken hoogstwaarschijnlijk voldoende. De door de geïnterviewde partijen aangegeven toekomstige gewenste zuiverheid ligt tussen de 98% en 99+%. De minimale waarde is gebaseerd op het behouden van flexibiliteit in de te importeren waterstof benadrukt een bedrijf. De maximale waarde wordt aangegeven het meest interessant te zijn wanneer wordt gekeken naar investeringen voor vergroening.

De geïnterviewde partijen geven het volgende aan met betrekking tot aanwezige sporenelementen. Afhankelijk van het proces waarvoor het waterstof als grondstof wordt gebruikt en binnen bepaalde bandbreedte, vormen koolwaterstoffen (methanolproductie) of stikstof (ammoniakproductie) geen probleem. De som van sporenelementen die zuurstofatomen bevatten wordt idealiter gelegd op <10 ppm met 20 ppm als uiterste grens en piekwaarden van max 50 ppm. Water vormt hier bij een van de bedrijven een uitzondering op, gezien deze in een tussenliggende compressiestap wordt verwijderd. Zwavel, chloor en andere halogenen vormen een groot probleem voor de aanwezige, niet reversibele katalysatoren. De bedrijven geven aan dat een zeer beperkte hoeveelheid zwavel van maximaal <0,1 ppm is een belangrijk vereiste is voor de katalysatoren. Daarom zal een filterbed altijd voor de zekerheid worden geïnstalleerd. De door de geïnterviewde partijen gewenste kleur van het waterstof varieert van blauw óf groen voor het een tot uitsluitend groen voor een ander.

Waterstof voor industriële invoeding kan via het SMR proces en vergassing worden geproduceerd. Hierbij kunnen de specificaties van sporenelementen zoals hierboven genoemd worden aangehouden. Invoeding van waterstof verkregen uit ammoniak import is ook een mogelijke route die wordt geïnventariseerd door een van de partijen. Zuivering voor invoeding op het transportnet is dan noodzakelijk voor verwijdering van stikstof en sporen van ammoniak. Een hogere tolerantie voor ammoniak in het transportnet zou hierbij welkom zijn, zo vertelt de betreffende partij.

7.1.3 Gashandelaren

De gewenste kwaliteit voor gashandelaren is onlosmakelijk verbonden aan de gewenste kwaliteit van hun klanten. De chemische industrie is hier de grootste speler in en het voornaamste probleem gevonden wordt in de hoeveelheid zwavel en/ of hoeveelheid hogere koolwaterstoffen, vertellen de geïnterviewde gashandelaren. Meer detailinformatie over de kwaliteitsaspecten van deze industrie staat in bovenstaande alinea. De mobiliteitssector is (nu nog) een kleine speler die strengere eisen stelt aan het waterstof voor hun brandstofcellen. De gewenste kwaliteit van die sector ligt op 99,999% met zeer strikte eisen voor spoorelementen te vinden in SAE-J2719 of ISO 14687 grade D. Gashandelaren zijn in contact met leveranciers die waterstof met een zuiverheid van om en nabij 99,999% kunnen leveren via elektrolyse. Hierin kunnen sporen van O₂ voorkomen. Voor de eerste beperkte productie heeft men een afnemer die hoge eisen heeft voor de zuiverheid (> 99,9% waterstof en < 0,1 ppm H₂S). De geïnterviewde handelaren hebben er moeite mee, wanneer hun afnemers gas innemen dat veel minder zuiver is dan het gas dat men levert aan de backbone. Het exit-punt wordt als logische plaats voor zuivering van het waterstof gezien door partijen met als kerntaak gashandel. Voor het vergroenen van eigen processen (elektriciteitsproductie) is een kwaliteit van 98% H₂ acceptabel en is de herkomst (groen, blauw of grijs) minder belangrijk.

7.1.4 Mobiliteitssector en brandstofleveranciers

Brandstofleveranciers en de mobiele sector pleiten over het algemeen voor zogenaamde 'klasse 5' kwaliteit waterstof omwille van de gevoelige techniek van de brandstofcellen. Klasse 5 houdt een zuiverheid van minimaal 99,999% in en een zeer gering aantal spoorelementen. Deze kwaliteit moet bij tankstations uit het vulpistool komen. De exacte specificaties voor brandstofcellen zijn te vinden in ISO 14687 grade D en SAE-J2719. Voor een enkel project is vereist dat het waterstof groen moet zijn. In de toekomst is een zo hoog mogelijke zuiverheid van waterstof de nadrukkelijke wens. Voor een ontwikkelaar van waterstofverbrandingsmotoren geldt een minder strikte eis voor de zuiverheid en het gehalte spoorelementen als zwavel en methaan. Echter de groene kleur van waterstof is vanwege de duurzaamheidsvisie van het bedrijf wel een strikte vereiste voor afname en niet alleen voor in de verbrandingsmotor, maar ook voor in de brandstofcel. Zuivering van het waterstof moet gebeuren voordat het in de tubetrailer of het tankstation wordt geladen. Dit geldt ook voor waterstof uit het net met een lagere zuiverheid en voor brandstofcel schadelijke hoeveelheden spoorelementen. De onder waterstofproducent en brandstofleverancier geschaarde partij richt vooralsnog op een zuiverheid van 99,5% in het transportnet, met dat percentage is de 99,97% benodigd voor brandstofcellen gediend. Deze zuiverheid kan ze momenteel zelf door SMR en ATR met additionele reiniging bereiken. Centrale reiniging voor invoeding op het transportnet zou voor de brandstofleveranciers een logisch proces zijn. Het plaatsen van purificatie-eenheden bij afzonderlijke tankstations is niet efficiënt en er worden problemen voorzien i.v.m. het ruimtebeslag en de te verwerken afvalstromen en de vergunningverlening, zo luidt de onderbouwing van de geïnterviewde partijen. Hoe hoger de kwaliteit van het waterstof, hoe minder decentrale afvalstromen.

7.2 Productie en verbruik volumina van waterstof

Waterstof wordt geproduceerd met behulp van verschillende technieken waaronder PSA, SMR (met CCS), ATR en elektrolyse. Een PSA kan ingezet worden om de hoge zuiverheid voor de mobiliteitssector te behalen.

De drijfveren achter de productiehoeveelheden zijn de raffinaderijen en de chemische industrie waaronder kunstmest- en methanolproductie. Onder de vergroeningsplannen valt de realisatie van 3GW elektrolysecapaciteit in 2030, waaronder 200MW projecten in Nederland. Een 200 MW installatie zou 20 kton per jaar leveren (ruim 200 miljoen m³ H₂ per jaar). Kleinschalige elektrolyse projecten worden vanaf 2025 aangesloten op het net.

Het verwachte waterstof verbruik van de geïnterviewde industriële partijen verschilt per partij en locatie. Een verwacht verbruik van 100-150 kiloton waterstof per jaar is door een van de partijen aangegeven. Een andere partij overweegt om het gehele productieproces te vergroenen waarvoor 350 kiloton per jaar H₂ nodig is. Op dit moment heeft men nog geen zicht op de leverende partij.

De gesproken gashandelaars hebben een groene waterstofvisie en zijn betrokken bij groene waterstofelektrolyse projecten in Nederland. Zo wordt in 2024 beoogd om een elektrolysecapaciteit van 50MW te realiseren, wat evenredig is aan de productie van 30 ton per jaar. In 2027 is de hoop 350MW extra capaciteit te mogen realiseren en ambities voor 2030 lopen richting 1 GW. De investeringsbeslissingen hiervoor zijn nog niet genomen. In de eerste jaren wordt gekeken of het waterstoftransportnet als buffer kan worden gebruikt middelen linepack om een baseload voor continue processen te garanderen en schommelingen daarin door fluctuaties in de elektriciteitsproductie door wind op zee te overkomen, waarna in 2027 gebruik kan worden gemaakt van de Hystock cavernes (zoutcavernes bestemd voor waterstof). Activiteiten van de andere gashandelaar omvat 100MW elektrolysecapaciteit in 2025, waarna hopelijk een vergunning voor 750 MW extra elektrolysecapaciteit in 2028 wordt verleend. Ambities voor 2030 omvatten een extra 1GW elektrolyser. De realisatie van 40 GW elektrolysecapaciteit is nog onzeker en hangen af van politieke besluitvoering. Op kleine schaal wordt gekeken naar verbruik van waterstof om eigen processen te vergroenen. Zo zou de

benodigde hoeveelheid bij volledige overschakeling van een project neerkomen op ongeveer 100 kiloton per jaar. Vergroening van eigen processen is echter voornamelijk een punt voor de lange termijn (na 2035). Het huidige verbruik en de huidige capaciteit van een waterstoftankstation is momenteel ongeveer 1000 kilogram per week. Het is de intentie om dit binnen een jaar op te schalen naar 2000 kilogram per week.

7.3 Visie op de marktontwikkeling

7.3.1 Waterstofproducenten

Voor de geïnterviewde huidige waterstofproducenten vormt grijze waterstof momenteel de grootste volumestroom. Op nationaal en internationaal niveau wordt er door hen ingezet op productie van blauwe en groene waterstof. Beide blauwe- en groene waterstofactiviteiten zijn deels in ontwikkeling en een deels reeds in bedrijf vertellen de bedrijven. In de verre toekomst (2070) worden zeer hoge specificaties van het waterstoftransportnet voorzien door enkel invoeding van zeer zuivere waterstof verkregen door elektrolyse. Transport via waterstof aangedreven tubetrailers voor bijvullen van tankstations lijkt vooralsnog een realistisch scenario. Grootschalige import en transport van vloeibare waterstof en waterstof in de vorm van ammoniak (waarbij de productie in het Midden-Oosten plaatsvindt) lijken groeiscenario's te hebben. Transport via pijpleidingen door aansluiten op het landelijke waterstofnet is zakelijk interessant, geven de geïnterviewde huidige waterstofproducenten aan, echter voor besluiten over aansluiting op het landelijke waterstofnet wordt gewacht op regelgeving van de overheid waarbij de kwaliteitsspecificaties leidend zijn.

7.3.2 Industriële gebruikers en producenten

Door industriële gebruikers en producenten wordt zowel ingezet op blauwe waterstof (SMR met behulp van CCS) en groene waterstof verkregen door vergassing en elektrolyse. De grote volumes die nodig zijn, kunnen gerealiseerd worden door de ontwikkeling van de productie van ammoniak en groene methaan met behulp van waterstof uit elektrolyse rond de evenaar, is de visie van de industriële gebruikers en producenten. Import van ammoniak wordt als veelbelovend gezien en theoretisch haalbaar om in substantiële hoeveelheden te importeren vanaf 2030, wordt door een van de bedrijven aangegeven. Import van waterstofgas en vloeibare waterstof hebben niet de voorkeur en groene methaan is niet in toereikende hoeveelheden aanwezig laat een andere partij weten. Voor het verduurzamen van het waterstofgebruik is een directe aansluiting aan het landelijke waterstoftransportnet beoogd in 2025-2027 bij één van de partijen.

7.3.3 Gashandelaren

Gashandelaren staan in contact met leveranciers die gebruik maken van PEM- en alkaline elektrolyse voor de productie van waterstof. Daarnaast werken ze mee aan steeds grootschaligere waterstofproductie door elektrolyse met behulp van wind op zee. Voor blauwe waterstofprojecten in Nederland zijn in dit stadium geen concrete plannen. Over de grens wordt wel gekeken naar initiatieven om met behulp van ATR in combinatie met CCS blauwe waterstof te produceren wat via een pijpleiding naar Nederland kan worden getransporteerd. Er wordt gekeken naar verschillende vormen van import: ammoniak, methanol en vloeibare waterstof. Kwaliteitscontracten zijn een vereiste in de ogen van handelaren. Zonder deze contracten zou blauwe waterstof een barrière kunnen opwerpen voor groene waterstof projecten. Daarnaast is het belangrijk dat de kwaliteit moet aansluiten bij internationale specificaties, met onze buurlanden in het bijzonder.

7.3.4 Mobiliteitssector en brandstofleveranciers

Voor de mobiliteitssector wordt waterstof voornamelijk gezien als een waardevolle brandstof voor zwaar vrachtvervoer (vrachtwagens, scheepvaart). De toekomst voor personenwagens is voornamelijk elektrisch. Brandstofleveranciers zien wel perspectief in personenvervoer aangedreven door waterstof in PEM FC auto's. De plannen voor partijen die eigen brandstof produceren, zijn om off-grid te opereren. Dit in verband met de te verwachten waterstofspectificaties in het landelijke net. De ontwikkeling van waterstofverbrandingsmotoren is gekoppeld aan de ontwikkeling van groene waterstof. Daarnaast wordt deze motor niet verwacht voor 2040, tenzij de 2030 eis van 30% reductie in de mobiele sector wordt verzwaaard richting 40%. Waterstofproductielocaties in de nabijheid en eventueel vervoer via tubetrailers is momenteel de transportwijze, welke ook wordt voorzien voor de nabije toekomst. De mobiliteitssector werkt mee aan de Europese richtlijn waarin staat dat om de 150 km een waterstoftankstation zal moeten komen te staan. Hierbij worden ook grijze en blauwe waterstof naast groene als middelen voor het bereiken van dit doel gezien. Branchegenoten van enkele van de geïnterviewde partijen kijken naar technieken werkend op ammoniak en vloeibaar waterstof. Import van die twee vormen kunnen na eventuele processing de gewenste hoge kwaliteit van 99,999% halen. De gesproken partijen geven aan te denken dat de handelsmarkt voor waterstof rond 2030 gereed is en waterstof een grote rol gaat spelen in de mobiliteit. Het transport en de zuivering van waterstof dragen bij aan de prijs van waterstof. Een hogere kwaliteit in het waterstoftransportnet zal uiteindelijk resulteren in lagere kosten van het totale systeem met als eindgebruik mobiliteit. Met een lagere prijs, wordt de mobiliteitssector een betere groeikans gegeven. Op termijn wordt voornamelijk invoeding van waterstof met een hogere zuiverheid verwacht uit groene processen, omdat de businesscase in de groene waterstofmarkt aantrekkelijker is dan van de blauwe. Dit geldt voor een van de geïnterviewde brandstofleveranciers voornamelijk vanwege het stimuleringskader en voor één van de partijen in de sector mobiliteit vanwege bedrijfsvisie.

8 SPECIFICATIES VOOR ENTRY- EN EXITPUNTEN

Kiwa en DNV hebben op basis van een literatuuronderzoek, interviews met stakeholders, en huidige kennis en inzichten een advies geformuleerd over de kwaliteitseisen voor waterstof met een minimale gewenste zuiverheid en een maximum aan sporencomponenten voor transport in het landelijke waterstoftransportnet. Om tot deze kwaliteitseisen te komen zijn de volgende afwegingen meegenomen:

- waterstof wordt nu overwegend ingezet in chemische- en petrochemische processen en verbrandingstoepassingen;
- de productie van waterstof vindt momenteel nog hoofdzakelijk via de thermochemische route plaats. De verkregen zuiverheid hierbij is ca. 98 mol%;
- de productie van waterstof uit elektrolyse, waarbij een zuiverder waterstof wordt geproduceerd (>99.9 mol%), zal op korte termijn (lees: tot 2025) slechts in beperkte volumes plaatsvinden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de verwachting is dat op lange termijn (lees: na 2025) de hoeveelheid waterstof geproduceerd vanuit elektrolyse zal toenemen;
- het is nu nog niet bekend wat de invloed van verontreinigingen uit voormalige aardgastransportnetwerken op de uitgaande waterstofkwaliteit is, waardoor op korte termijn zuiverheden van meer dan 99,5 mol% niet realiseerbaar lijken;
- op basis van de huidig beschikbare informatie is een kostenoptimalisatie uitgevoerd. Hieruit is gebleken dat de kosten voor 99.9% het laagst zijn, maar op korte termijn technisch niet realiseerbaar. Een zuiverheid van 98% geeft de laagste systeemkosten van de op korte termijn te realiseren scenario's/waterstof zuiverheden;
- de nu opgestelde internationale specificaties voor transportnetwerken zijn vrij uniform met betrekking tot de kwaliteitseisen. Veelal wordt een zuiverheid van 98 mol% aangehouden;
- de markt van brandstofcelvoertuigen is nu gering en zal geleidelijk verder groeien;
- uit de interviews met stakeholders is gebleken dat de grootverbruikers, die naar verwachting op korte termijn de grootste volumes aan waterstof uit de backbone zullen gaan gebruiken, een minimale zuiverheid van 98 mol% acceptabel vinden.

Op basis van bovenstaande overwegingen wordt een minimale waterstofzuiverheid van 98 mol% geadviseerd als initiële kwaliteitseis.

Echter, voor brandstofceltoepassingen is een hoge zuiverheid dan 98 mol% vereist en zijn er strenge eisen aan de in het gas aanwezige sporencomponenten. Voor de korte termijn betreft het hier hoofdzakelijk waterstoftankstations, waar het gas tot hoge drukken (700 bar) wordt gecomprimeerd. Om te voorkomen dat er vloeibaar water in de te tanken waterstof komt, zal ter plaatse een additionele waterafscheider dienen te worden geplaatst. Het is mogelijk om, naast het verwijderen van water, een additionele reinigungsstap te plaatsen voor de afvang van schadelijke sporencomponenten (met name zwavel). Onafhankelijk van de te stellen specificaties is het sowieso verstandig om een dergelijke 'polishing stap' te plaatsen om zo te kunnen voorkomen dat er schade aan de brandstofcellen kan optreden. Op de lange termijn is de verwachting dat de markt (en daarmee samenhangende waterstofvraag) voor brandstofcelvoertuigen zal toenemen. In hoeverre de kwaliteitseisen voor waterstof dan nog steeds hetzelfde zijn is onbekend; toekomstige ontwikkelingen kunnen er mogelijk toe leiden dat brandstofcellen toleranter worden voor onzuiverheden.

Naar mate er meer waterstof met behulp van elektrolyse geproduceerd wordt en er meer kennis is opgedaan over het transporteren- en opslaan van waterstof en de mogelijkheden voor reiniging van waterstof, is de verwachting dat op termijn de kwaliteitseisen kunnen worden aangepast naar zuiverheden die hoger zijn dan 98 mol%.

Voorgesteld wordt om over drie jaar, na ingebruikname van het waterstoftransportnetwerk, de specificaties opnieuw vast te stellen, waarbij rekening wordt gehouden met:

- de ontwikkeling in de productie uit elektrolyse;
- de daadwerkelijke contaminaties afkomstig van het transportnetwerk en hoe deze zich in de loop van de tijd ontwikkelen;
- de ontwikkeling van de waterstofmarkt.

Het advies betreffende de kwaliteitseisen voor waterstof en het opnieuw opstellen van de specificaties, 3 jaar na ingebruikname van het waterstoftransportnetwerk, sluit aan bij de vigerende Europese standaarden. Voor de periode tot 2025 wordt geadviseerd om de navolgend beschreven specificaties aan te houden.

Tabel 8.1: Voorlopige specificaties waterstof in het transportnet voor zowel entry- als exitpunten (waarden op momentane basis)

Parameter	Eenheid	
Wobbe-index	MJ/m ³ (n)	44,85-48,35 ^A
Waterstof	mol%	≥ 98
Inerten	mol%	≤ 2 inert N ₂ , Ar, He
Koolwaterstoffen	mol%	<1,5 incl. CH ₄
Koolwaterstofdauwpunt	°C	≤ -2 bij 1 – 70 bar(a)
Waterdauwpunt	°C	-8 bij 70 bar(o)
Zuurstof	molppm	≤ 10
Koolstofdioxide	molppm	≤ 20
Totaal S gehalte (incl. H ₂ S)	molppm	≤ 3
Halogenen	molppb	≤ 50
Koolmonoxide	molppm	≤ 20
Mierenzuur	molppm	≤ 10
Ammoniak	molppm	≤ 10
Formaldehyde	molppm	≤ 10
Stofdeeltjes (> 5 µm)		Disclaimer ^B
Temperatuur (entry)	°C	5 - 30 ^C
Temperatuur (exit)	°C	5 - 30 ^C

A. De m³(n) wordt gedefinieerd bij 0°C (meetcondities) en 1013,25 mbar. De energie in MJ is herleid van de thermodynamische waarden van 25°C (verbrandingscondities) tot 0°C en b j 1013,25 mbar volgens ISO 6976

B. Disclaimer: Het waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoeppassing kan aantasten

C. Afhankelijk van de situatie ter plaatse (materialen, afnemers), kan van de maximale temperatuur worden afgeweken

Wobbe-index:

Voor verbrandingsprocessen is het belangrijk dat de Wobbe-index niet teveel varieert. Er is gekozen voor dezelfde bandbreedte als in het advies voor specificaties voor het gasdistributienet en de PAS4444, waarop nu door fabrikanten toestellen worden ontwikkeld.

Waterstof:

Voor het minimale waterstofgehalte is gekozen voor aansluiting bij de huidige internationale netwerkspecificaties en voor een optimalisatie van de totale kosten. Zoals vermeld in dit rapport, zal bij een wijziging van het aandeel groene waterstof in de backbone, overwogen moeten worden om het minimale gehalte waterstof te verhogen.

Inerten:

Inerten zullen aanwezig zijn wanneer gebruik wordt gemaakt van lucht bij reforming en/of partiële oxidatie van aardgas. Inerte gassen zullen geen wezenlijke invloed hebben op de meeste toepassingen (behalve PEM brandstofcellen). Voor de gassamenstelling moeten echter ook de grenzen van de Wobbe-index in acht worden genomen. Hierdoor kan de feitelijke grens voor inerten lager zijn dan 2 mol%.

Koolwaterstoffen:

Het maximale voorgestelde gehalte van 1,5 mol% is in overeenstemming met de EASEE-gas specificaties en kan mogelijk lager zijn wanneer de grenzen van de Wobbe-index in acht worden genomen.

Koolwaterstofdauwpunt:

Om de aanwezigheid van teveel hogere koolwaterstoffen te voorkomen, wordt een koolwaterstofdauwpunt van -2 °C gehanteerd. Deze geldt bij elke druk tussen 1 en 70 bar(a).

Waterdauwpunt:

De specificatie voor het waterdauwpunt is afgeleid van de specificatie, zoals die ook geldt voor het aardgastransportnet en komt overeen met een watergehalte van niet meer dan 45 volppm.

Zuurstofgehalte:

Het zuurstofgehalte is gelimiteerd vanwege de toepassing als feedstock en is in overeenstemming met de EASEE-gas specificaties.

Koolstofdioxide:

Koolstofdioxide is aanwezig bij waterstof verkregen uit reforming van aardgas. Het gehalte is echter gelimiteerd vanwege de toepassing als feedstock en is in overeenstemming met de EASEE-gas specificaties.

Zwavelgehalte:

Zwavel is voor veel processen ongewenst vanwege de vervuiling van de katalysatoren bij het gebruik van waterstof als feedstock. Aangezien de waterstof op het entrypunt weinig zwavelhoudende verontreinigingen zal bevatten en het waterstof niet wordt geodoriseerd, zullen de meeste verontreinigingen afkomstig zijn uit eventuele desorptie van het gasnet. Het zal hier voornamelijk organische zwavelcomponenten betreffen. Uit de interviews is gebleken dat vele stakeholders problemen verwachten met te hoge zwavelconcentraties. Hynetwork Services geeft aan 5 molppm te hanteren, ISO 14689:2019 (grade A) hanteert 2 molppm als grenswaarde. De auteurs stellen een maximum van 3 molppm aan zwavel voor. Dit is equivalent met 5 mg/m³(n) H₂S, zijnde de specificatie voor het maximale gehalte aan H₂S dat is voorgesteld in de huidige specificatie voor gasdistributienetten en momenteel ook geldt voor aardgas.

Halogenen:

Halogeenvormingen kunnen afkomstig zijn uit de productie via chlooralkalische elektrolyse. De specificatie van 50 molppb komt overeen met die van EASEE-gas en grade D and grade E zoals verwoord in ISO 14687:2019.

Koolstofmonoxide:

Koolstofmonoxide is aanwezig bij waterstof verkregen uit reforming van aardgas. Het gehalte is gelimiteerd vanwege de toepassing als feedstock en is in overeenstemming met de EASEE-gas specificaties.

Mierenzuur en formaldehyde:

Zowel formaldehyde als mierenzuur kunnen gevormd worden bij de reforming van aardgas en zijn schadelijk voor polymere brandstofcellen bij gehalten van minder dan 1 molppm. Er is gekozen voor een limitering tot 10 ppm zodat de eventuele gebruikers van brandstofcellen hun polishing step hierop kunnen optimaliseren.

Ammoniak:

Ammoniak is een mogelijke verontreiniging bij de conversie van ammoniak naar waterstof en kan zowel de werking van de kathode als van de anode van polymere brandstofcellen negatief beïnvloeden. Daarom is deze component gelimiteerd tot 10 molppm.

Temperatuur:

De temperatuur is dusdanig gekozen, dat geen problemen met het gastransport en de gastoeppingen zijn te verwachten..

9 REFERENTIES

- 1 <http://www.dnvgl.nl/news/filling-the-data-an-update-of-the-2019-hydrogen-supply-in-the-netherlands-16271>
- 2 Gülbahar Tezel, Robert Hensgens, Waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk?, HyWay 27 (juni 2021)
- 3 <https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof/wat-is-waterstof>
- 4 <https://www.voordewereldvanmorgen.nl/artikelen/groningen-zet-vol-in-op-waterstof>
- 5 Forster Wheeler, IEAGHG Technical review (part 1): Current state-of-the-art technologies for hydrogen production (2017)
- 6 Per Tunå, "Generation of synthesis gas for fuels and chemicals production", Lund University, 2013
- 7 <https://empire-hydrogen.com/>
- 8 <https://www.hy4heat.info/>
- 9 Martin Brown et al., Hy4heat Work Package 2 Hydrogen Purity, Final Report (DNV GL, NPL, Loughborough University, Elementenergy, Health & Safety Laboratory), Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2019)
- 10 ISO 14687:2019, Hydrogen fuel quality — Product specification
- 11 S. Reddy, S. Vyas, "Recovery of Carbon Dioxide and Hydrogen from PSA Tail Gas", Energy Procedia 1 (2009) 149–154
- 12 Hydrogen debinding in the GB network feasibility study, NIA final report, 7409348-0200-075-01-001-0001 Rev R3, National Grid, 2020
- 13 <https://www.shell.de/ueber-uns/standorte/rheinland.html>
- 14 <https://www.processcontrol.nl/volth2-wil-in-terneuzen-fabriek-voor-groene-waterstof-bouwen/>
- 15 <https://djewels.eu/djewels-pioneering-the-european-renewable-efuels-market/>
- 16 <https://www.klimaataakkoord.nl/themas/waterstof/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaataakkoord-hoofdstuk-waterstof>
- 17 <https://www.north2.eu/>
- 18 <https://seah2land.nl/>
- 19 <https://portofdenhelder.nl/files/documents/Poort%20naar%20een%20CO2-vrije%20waterstofeconomie%20-%20H2%20Gateway.pdf>
- 20 Kabinetsvisie waterstof, DGKE / 20087869
- 21 Summary The Energy System of the Future, 2030-2050 Integral Infrastructure Survey, April 2021
- 22 <https://www.dewereldvanwaterstof.nl/gasunie/vraag-en-aanbod/>
- 23 <https://www.reuters.com/business/environment/worlds-first-hydrogen-tanker-ship-test-cargo-australia-japan-2022-01-20/>
- 24 Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store (policy briefing), The Royal Society, February 2020, <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/>
- 25 [https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel?newsitemid=6025248768&title=groene-ammoniak-heeft-potentie-als-drager-van-waterstof#:~:text=Ammoniak%20maakt%20daarvoor%20als%20compacte,opslag%20van%20waterstof%20\(H\).](https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel?newsitemid=6025248768&title=groene-ammoniak-heeft-potentie-als-drager-van-waterstof#:~:text=Ammoniak%20maakt%20daarvoor%20als%20compacte,opslag%20van%20waterstof%20(H).)
- 26 <https://samgasprojects.com/detail/ammonia-cracker.html>
- 27 Publically Available Standard, PAS 4444:2020, Hydrogen-fired gas appliances – Guide (30 april 2020) onder licentie van BSI, The British Standards Institution
- 28 Polman et.al., Een verkenning naar waterstofspectificaties, Kiwa en DNV, GT-200157 (2021)
- 29 S. Gersen et al., Domestic hydrogen boilers in practice: enabling the use of hydrogen in the built environment, IGRC 2020
- 30 <https://www.wartsila.com/media/news/05-05-2020-wartsila-gas-engines-to-burn-100-hydrogen-2700995>
- 31 <https://www.deutz.com/en/media/press-releases/deutz-prepares-the-way-for-carbon-neutral-mobility-with-hydrogen-drive-systems/>

- 32 <https://www.keyou.de/pressemitteilung-bundesregierung-startet-deutschlandweite-innovationskampagne-mit-wasserstofftechnologie-des-muenchener-clean-mobility-start-ups-keyou/?lang=en>
- 33 <https://www.abc-engines.com/en/news/behydro-hydrogen-dual-fuel-engine-launched-in-ghent>
- 34 J. Adolf et al., Shell hydrogen study, Shell and Wuppertal Institut, Hamburg (2017)
- 35 Hydrogen power with Siemens gas turbines, white paper, Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG (2020)
- 36 ETN Global, Hydrogen Gas Turbines (7 juli 2020), <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>
- 37 EUTurbines, Gas Turbines: Driving the transition to renewable-gas power generation, 2019, <https://powertheeu.eu/>
- 38 TKI project "Waterstof als brandstof voor industriële verhitting"
- 39 Deloitte, The potential of hydrogen for the chemical industry. A Future of Energy point of view (2021)
- 40 https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-decarbonisation-options-for-the-dutch-fertiliser-industry_3657.pdf
- 41 Website Bouwen met staal: staalindustrie kiest voor waterstof"
- 42 Roland Berger, Haalbaarheidsstudie klimaatneutrale paden TSN IJmuiden, november 2021, in opdracht van Tatasteel IJmuiden en FNV
- 43 Top, Waterstof backbone Gasunie, DNV, ESNL 203131 (2021)
- 44 <https://www.gasunie.nl/projecten/waterstofnetwerk-nederland/marktconsultatie-waterstofbackbone>
- 45 <https://www.hynetwork.nl/downloads>
- 46 hydrogen_backbone_hynetwork_services.pdf
- 47 Gasunie, Werken met bodem
- 48 <https://www.gasunie.nl/nieuws/waterstofleiding-gasunie-van-dow-naar-yara-in-gebruik-genomen>
- 49 Turkstra, Introduction to the hydrogen purity cost model, DNV (20-01-2022)
- 50 Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, International Energy Agency, 19 October 2020, <https://doi.org/10.1787/208b66f4-en>
- 51 Noussan, M.; Raimondi, P.P.; Scita, R.; Hafner, M. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective. Sustainability 2021, 13, 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- 52 BloombergNEF. Hydrogen Economy Outlook. 2020. Available online: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- 53 Noussan et al. "The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective. Sustainability 2021, 13, 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- 54 <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- 55 SAE TIR J2719/1, Application Guideline for Use of hydrogen Specification (03-2020)
- 56 Technische Regel_Arbeitsblatt DVGW g 260(A), september 2021
- 57 European Association for the Streamlining of Energy Exchange - gas, Hydrogen Quality Specification (2022-001/01)