

GT-200157

03 februari 2021

Een verkenning naar waterstofspecificaties

Entry- en exitpunten distributienet

DNV·GL



kiwa

Trust
Quality
Progress



GT-200157

03 februari 2021

Een verkenning naar waterstofspecificaties

Entry- en exitpunten gasdistributienet

© 2020 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze, hetzij
elektronisch, mechanisch,
door fotokopieën, opnamen,
of enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever,
alsmede van de
opdrachtgever.

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

Tel. 088 998 33 93
Fax 088 998 34 94
www.kiwatechnology.nl

Colofon

Titel Een verkenning naar waterstofspecificaties: Entry- en
exitpunten gasdistributienet

Projectnummer 004P001881

Projectmanager E.A. Polman

Opdrachtgever Netbeheer Nederland

Kwaliteitsborger(s) M. van Rij (Kiwa), H.B. Levinsky (DNV
GL)

Auteur(s) E.A. Polman (Kiwa), H. Vlap, P. Visser,
A. van den Noort (allen DNV GL)

**Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van Netbeheer
Nederland. Het is beschikbaar voor Netbeheer Nederland, de bij
Netbeheer Nederland aangesloten netbeheerders en de aan
deze netbeheerders verbonden bedrijven.**



Voorwoord

Kiwa Technology en DNV GL hebben in opdracht van Netbeheer Nederland, waterstofspectificaties voor entry- en exitpunten in het gasdistributienet opgesteld. Deze specificaties zijn bedoeld als een eerste verkenning en vertrekpunt om gezamenlijk met de relevante stakeholders tot nationale regelgeving voor de kwaliteit van waterstof in distributienetten te komen.

Het onderzoek is mede tot stand gekomen dankzij de inbreng van een begeleidingsgroep met specialisten vanuit de Nederlandse gasnetbeheerders.

De deelnemers aan deze groep waren:

- Frank van Alphen (Stedin)
- Jelle Liefvering (Gasunie Transport Services)
- Johannes de Bruin (Liander)

De begeleidingsgroep heeft een grote bijdrage geleverd aan het onderzoek door richting te geven aan de uitvoering, actief deel te nemen aan de discussies en door input aan te leveren.

Deze studie is gebaseerd op openbare bronnen. Momenteel lopen er ook andere onderzoeken die tot doel hebben om specificaties voor waterstoftransport, -distributie en/of -toepassing op te stellen. Deze onderzoeken zijn echter ten tijde van het schrijven van dit rapport nog niet afgerond, waardoor hier niet naar kan worden gerefereerd.

De berekende fysische grootheden uit de gassamenstelling, waaronder de Wobbe-index, zijn gebaseerd op de energie- en volumeberekening, conform ISO 6976 [1]. De energiebepaling in MJ is gedefinieerd bij 25°C (standaard thermodynamische condities) en 1013,25 mbar. Het volume is gedefinieerd bij 0°C (zgn. normale condities) en 1013,25 mbar. Als de grootheden bij deze referentiecondities zijn berekend, worden deze kortweg aangeduid als [0,25] en is conform de berekening zoals gedaan in de MR gaskwaliteit.

In het buitenland worden deze fysische grootheden veelal herleid tot 15 °C voor zowel thermodynamische eigenschappen als volume, en heten kortweg [15,15]. Een goede vergelijking van specificaties onderling, kan alleen plaatsvinden wanneer de referentiecondities gelijk zijn.

In dit rapport zijn de tussenconclusies in kaders weergegeven.



Samenvatting

In dit rapport zijn de ontwerpspecificaties voor waterstof in het gasdistributienet beschreven, die een veilig en doelmatig gebruik van zowel het gasdistributienet als de waterstoftoepassingen beogen. De specificaties betreffen zowel de entryspecificaties, de specificaties op het punt waar de waterstof het distributienet binnenkomt, als de exit-specificaties, op het punt waarop het gas het distributienet verlaat op een afleverpunt. In dit rapport zijn geen specificaties opgenomen voor het transport van waterstof in het landelijk gastransportnet.

Deze specificaties zijn bedoeld als een eerste verkenning en vertrekpunt om gezamenlijk met de relevante stakeholders tot nationale regelgeving voor de kwaliteit van waterstof in distributienetten te komen

Voor een veilige bedrijfsvoering van het gasnet is de verwachting dat odorisatie noodzakelijk zal zijn met als consequentie dat additionele reiniging voor specifieke toepassingen zoals brandstofcellen noodzakelijk zal zijn. Op verzoek van de opdrachtgever is odorisatie (keuze wel/geen odorant, type odorant en dosering) buiten de scope van dit onderzoek gehouden.

Op basis van het door Kiwa en DNV GL uitgevoerde onderzoek is gebleken dat, ten tijde van het schrijven van dit rapport, nog weinig zicht was op de mogelijke-, toekomstige ontwikkeling van waterstofturbines die in de distributienetten toegepast zouden kunnen worden. Motoren staan veelal in kassen opgesteld, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van de uitlaatgassen t.b.v. CO₂-bemesting. Het onderzoek geeft aan dat eerst het wegvallen van CO₂ bij waterstof geadresseerd moet worden voordat een brandstofspecificatie kan worden gegeven. Tevens is gebleken dat de stakeholders verwachten dat brandstofcellen zullen worden aangesloten op waterstofleidingen die specifiek voor deze toepassing bedoeld zijn ("dedicated" leidingen) of te allen tijde additionele reiniging zullen hebben. Om deze redenen zijn de navolgende voorgestelde specificaties dan ook alleen geldig voor verbrandingsapparatuur, die warmteproductie als doel heeft (Cv-ketels, warmwaterketels, heaters, gaskachels en kooktoestellen).

Het is bekend dat in sommige lagedruk distributienetten (met name grijs gietijzeren en asbest cementleidingen) inwaterende lekken kunnen optreden. Ook bij lage druk PVC-leidingen met schuifmoffen kan inlek van grondwater optreden en natte netten zijn daarom niet altijd te voorkomen. Het effect van waterdamp op de Wobbe-index in een waterstofnetwerk is grofweg een factor vijf hoger dan voor aardgas. Om te grote variaties in de Wobbe te voorkomen wordt geadviseerd om dergelijke netten niet in te zetten voor de distributie van waterstof. Er is een plan opgesteld door alle regionale netbeheerders voor het vervangen van grijs gietijzeren- en asbestcement gasleidingen voor het jaar 2032 vanwege de gevoeligheid bij groundbewegingen. Dit plan is afgestemd met toezichthouder SodM (Staatstoezicht op de Mijnen), die namens de Rijksoverheid toezicht houdt op de veiligheid van onder meer de gasnetten. Na uitvoer van dit plan zullen er aanmerkelijk minder "natte netten" voorkomen.

Er is gekozen voor een minimale waterstofkwaliteit van 98 mol%, met een limitering op de absolute variatie in de Wobbe-index van 4 MJ/m³(n). Door het inperken van de Wobbe-band wordt voorkomen dat er op enigerlei dient te worden gecompenseerd voor het verlies aan doelmatigheid, zoals bijvoorbeeld het toepassen van toestellen met een hogere capaciteit. Tevens sluit het voorstel -voor wat betreft deze gaskwaliteitsaspecten- hiermee aan bij de PAS4444, die naar verwachting in vele Europese landen zal worden overgenomen en voorkomt dat er specifieke toestellen voor de Nederlandse markt dienen te moeten worden ontwikkeld.

Voor de kwaliteitsaspecten voor invoeding- en aflevering op een aansluiting wordt zoveel mogelijk aangesloten op de gaskwaliteitsaspecten die nu gelden voor de Ministeriële Regeling Gaskwaliteit (MR) voor aardgas.

De in de MR gespecificeerde Wobbe-index is gebaseerd op uurgemiddelde waarden, waarbij ruimte wordt geboden voor onder – en overschrijdingen van deze waarden ten gevolge van



de regelonnauwkeurigheid. Tevens is voor groengas de absolute grenswaarden gespecificeerd op $0,5 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ onder de onderste (uurgemiddelde) Wobbe-grenswaarde en $0,5 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ boven de bovenste (uurgemiddelde) Wobbe-grenswaarde. Vanwege het brede draagvlak voor de MR, wordt hier aanbevolen om voor waterstof dezelfde methodiek aan te houden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat er alleen aan de onderzijde regelruimte hoeft te worden geboden, omdat de bovengrens (Wobbe-index bij 100% waterstof) nooit kan worden overschreden. Er zijn namelijk geen gasvormige componenten die bij toevoeging in een hogere Wobbe-index kunnen resulteren. Hieruit volgt een Wobbe-variatie op uurgemiddelde waarde van $3,5 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$, met een absolute ondergrens van $44,35 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$.

Voor componenten die vermeld zijn in de MR, maar niet voor zullen komen in waterstof, worden geen grenswaarden vermeld, om zo te voorkomen dat er controlemetingen van een onnodig groot aantal parameters zullen worden geëist, zonder dat dit tot een lager risico zal leiden. Voor de overige sporencomponenten wordt voorgesteld om de in de MR gespecificeerde grenswaarden te hanteren omdat deze specificatie geschikt is voor verbrandingstoestellen. Afhankelijk van de bron en de productiewijze, is het mogelijk dat waterstof andere sporencomponenten bevat, die niet in de MR zijn gespecificeerd. Omdat er nu nog geen zicht is op de impact van deze componenten op het distributienet en/of gastoestellen, wordt vooralsnog uitgegaan van een disclaimer waarin de aanwezigheid van gasvormige verbindingen die schadelijk zijn voor de distributie en de toepassing van waterstof, wordt uitgesloten.

De overwegingen, behandeld in dit rapport, hebben geleid tot de volgende specificaties. Hierbij wordt opgemerkt dat de Wobbe-index is gedefinieerd als de hoeveelheid energie, die vrijkomt bij de volledige verbranding van gas in lucht, wanneer de na de verbranding aanwezige componenten tot de uitgangscondities van temperatuur en druk worden teruggebracht, zijnde $298,15 \text{ K}$ en een absolute druk van $1,01325 \text{ bar}$ en waarbij de bij de verbranding gevormde waterdamp wordt gecondenseerd, gedeeld door de vierkantswortel van de relatieve dichtheid, herleid naar normale condities ($273,15 \text{ K}$ en $1,01325 \text{ bar}$).



Tabel: Specificaties waterstof bij invoeding op een aansluiting

Component/fysische eigenschap	Grenswaarde		Eenheid
	Waterstof	MR aardgas	
Wobbe-index	44,85-48,35 ^{A,B)}	43,46-44,41 ^{A,H,I)}	MJ/m ³ (n)
Hogere koolwaterstoffen	^{C)}	≤ 5	mol% propaanequivalent
Gascondensaat	≤ 80	≤ 80	mg/m ³ (n) bij -3 °C
Waterdauwpunt	≤ -10	≤ -10	°C (bij 8 bar(a))
Temperatuur	5-20 ^{D)}	5-20 ^{D)}	°C
Zuurstof	≤ 0,2	≤ 0,5	mol%
Kooldioxide	^{C)}	≤ 10,3 ^{J)}	mol%
Waterstof	≥ 98	≤ 0,5	mol%
Chloor op basis van organochloorverbindingen	^{E)}	≤ 5	mg Cl/m ³ (n)
Fluor op basis van organofluorverbindingen	^{E)}	≤ 5	mg F/m ³ (n)
Koolmonoxide	≤ 2900 ^{K)}	≤ 2900	mg/m ³ (n)
Pathogene microben	^{E)}	≤ 500	Aantal/m ³ (n)
Stof (> 5 µm)	≤ 100	≤ 100	mg/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van anorganisch gebonden zwavel	≤ 5	≤ 5	mg S/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van alkylthiolen	≤ 6	≤ 6	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) piekwaarde	≤ 20	≤ 20	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) jaargemiddelde	≤ 5,5	≤ 5,5	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) piekwaarde	^{F)}	≤ 31	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) jaargemiddelde	^{F)}	≤ 16,5	mg S/m ³ (n)
THT-gehalte	^{F)}	10-40	mg THT/m ³ (n)
Siliciumverbindingen	^{E)}	≤ 0,1	mg Si/m ³ (n)
Niet gespecificeerde componenten	^{G)}		

- 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.
- C. De maximale concentratie wordt begrensd door de Wobbe-index
- D. Een andere invoedtemperatuur wordt geaccepteerd indien de invoeder aantoont dat de gebruikte materialen in de leidingen tegen de afwijkende temperatuur bestand is en het gas in de aansluitleiding van de invoeder zal opwarmen of afkoelen zodat het gas bij de afsluiter van het aansluitpunt met het net van de netbeheerder een temperatuur tussen de 5 en 20 °C heeft bereikt. Dit kan berekend worden met de methode uit het KIWA-rapport 'Eisen aan Groen Gas invoedtemperatuur' van 2 augustus 2012.
- E. Deze parameter komt niet voor in waterstof en is derhalve niet gespecificeerd
- F. Valt buiten de scope van deze studie
- G. De waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoeppassing kan aantasten



- H. De waarden voor de Wobbe-index dienen altijd boven de absolute ondergrens van $42,96 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ en onder de absolute bovengrens van $44,91 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ te zijn onafhankelijk van de meetfrequentie. Deze absolute grenzen gelden voor gassen die voor ten minste 99 mol% bestaan uit CH_4 , CO_2 , N_2 en O_2 .
- I. Overschrijdingen (een waarde boven de bovengrens) zijn toegestaan als zij binnen een verdeling rond de grenswaarde liggen met een standaarddeviatie van maximaal $0,1 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$.
- J. De volgende restrictie geldt voor het gehalte CO_2 voor gassen die voor ten minste 99 mol% bestaan uit CH_4 , CO_2 , N_2 en O_2 en voor meer dan 6 mol% uit CO_2 bestaan. CO_2 -gehalte is maximaal het minimum van $10,32 - 0,72 \cdot \text{N}_2\text{-gehalte} - 0,87 \cdot \text{O}_2\text{-gehalte}$, en $10,56 - 0,746 \cdot \text{N}_2\text{-gehalte} - 1,01 \cdot \text{O}_2\text{-gehalte}$, waarin de gehalten zijn uitgedrukt in mol%. In RTL-leidingen die op grenspunten uitkomen mag gas maximaal 3% CO_2 bevatten. Bij invoeding op aansluitingen waarvan het gas wordt gedistribueerd via gedeelten van het RNB-net waar grondwater in het gas terecht komt, mag gas maximaal 3% CO_2 bevatten.
- K. De achtuurlijkse tijdgewogen gemiddelde grenswaarde (TTG 8 uur) voor CO is op 21 augustus 2018, verlaagd van 29 naar $23 \text{ mg/m}^3(\text{n})$. Uitgaande van een ruikbaarheid van gas bij 20% LEL (1% gas in lucht) betekent dit een grenswaarde van $2300 \text{ mg/m}^3(\text{n})$ voor het distributiegas in geval een werknemer of aangeslotene gedurende 8 uur blootgesteld zou zijn aan een gaslek dat net niet ruikbaar is. Geadviseerd wordt om de grenswaarde aan te passen.



Tabel: Specificaties waterstof bij aflevering op een aansluiting

Component/fysische eigenschap	Grenswaarde		Eenheid
	Waterstof	MR aardgas	
Wobbe-index	44,85-48,35 ^{A)}	43,46-44,41 ^{F)}	MJ/m ³ (n)
Hogere koolwaterstoffen	^{B)}	≤ 5	mol% PE
Gascondensaat	≤ 80	≤ 80 ^{G)}	mg/m ³ (n) bij -3 °C
Waterdauwpunt	≤ -10 ^{H)}	≤ -10 ^{H)}	°C (8 bar(a))
Temperatuur	0-35	0-35	°C
Zuurstof	≤ 0,5	≤ 0,5	mol%
Kooldioxide	^{B)}	≤ 10,3 ^{I)}	mol%
Waterstof	≥ 98	≤ 0,5	mol%
Chloor op basis van organochloorverbindingen	^{C)}	≤ 5	mg Cl/m ³ (n)
Fluor op basis van organofluorverbindingen	^{C)}	≤ 5	mg F/m ³ (n)
Koolmonoxide	≤ 2900 ^{J)}	≤ 2900	mg/m ³ (n)
Pathogene microben	^{C)}	≤ 500	Aantal/m ³ (n)
Stof (> 5 µm)	≤ 100	≤ 100	mg/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van anorganisch gebonden zwavel	≤ 5	≤ 5	mg S/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van alkylthiolen	≤ 6	≤ 6	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) piekwaarde	≤ 20	≤ 20	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) jaargemiddelde	≤ 5,5	≤ 5,5	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) piekwaarde	^{D)}	≤ 31	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) jaargemiddelde	^{D)}	≤ 16,5	mg S/m ³ (n)
THT-gehalte	^{D)}	10-40	mg THT/m ³ (n)
Siliciumverbindingen	^{C)}	≤ 0,1	mg Si/m ³ (n)
Niet gespecificeerde componenten	^{E)}		

- A. De Wobbe-index mag afwijken op basis van de toegestane variaties in de invoeding, zoals opgenomen in de voetnoten A en B bij de tabel.
- B. De maximale concentratie wordt begrensd door de Wobbe-index
- C. Deze parameter komt niet voor in waterstof en is derhalve niet gespecificeerd
- D. Valt buiten de scope van deze studie
- E. De waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoevoering kan aantasten
- F. De Wobbe-index mag afwijken op basis van de toegestane variaties in de invoeding als opgenomen in voetnoten 1 en 2 bij bijlage 2 van de MR.
- G. Voor zover de netbeheerder de aansluiting beheert.
- H. Met uitzondering van netten met een druk lager dan of gelijk aan 200 mbar(o).
- I. De volgende restrictie geldt voor het gehalte CO₂ als het gas voor ten minste 99 mol% bestaat uit CH₄, CO₂, N₂ en O₂ en voor meer dan 6 mol% uit CO₂ bestaan. CO₂-gehalte is maximaal het minimum van $10,32 - 0,72 \cdot N_2\text{-gehalte} - 0,87 \cdot O_2\text{-gehalte}$, en $10,56 - 0,746 \cdot N_2\text{-gehalte} - 1,01 \cdot O_2\text{-gehalte}$, waarin de gehalten zijn uitgedrukt in mol%
- J. De achtuurlijkse tijdgewogen gemiddelde grenswaarde (TTG 8 uur) voor CO is op 21 augustus 2018, verlaagd van 29 naar 23 mg/m³(n), Uitgaande van een rijkbaarheid van gas bij 20% LEL (1% gas in lucht) betekent dit een grenswaarde van 2300 mg/m³(n) voor het distributiegas in geval een werknemer of aangeslotene gedurende 8 uur blootgesteld zou zijn aan een gaslek dat net niet rijkbaar is. Geadviseerd wordt om de grenswaarde aan te passen.



Inhoud

	Voorwoord	1
	Samenvatting	2
	Inhoud	7
1	Scope	9
1.1	Overwegingen voor de toepassing van de waterstofspecificatie	9
1.2	De zuivering van waterstof	10
2	Bestaande- en in ontwikkeling zijnde waterstofspecificaties	12
2.1	Productspecificaties	12
2.1.1	ISO 14687:2019	12
2.1.2	PAS 4444:2020	12
2.1.3	Vergelijking tussen ISO 14687:2019 grade A en PAS 4444:2020	13
2.2	Initiatieven voor regelgeving	13
2.2.1	EASEE-gas	13
2.2.2	H ₂ im Netz	14
2.2.3	Gasunie specificaties	14
2.2.4	HYPOS	15
3	Bronnen van waterstof	16
3.1	Waterstofproductie in Nederland	16
3.2	Thermochemisch	17
3.2.1	Steam Methane Reforming	18
3.2.2	Autothermal reforming	18
3.2.3	Vergassing	19
3.3	Water gas shift	19
3.4	Elektrolyse	20
3.5	Zuivering na productie	20
3.6	Productiekosten	21
4	Specificaties gasverbruikstoestellen	22
4.1	Impact van de waterstofsamenstelling op gedrag van verbrandingstoestellen	22
4.1.1	Wobbe Index	22
4.1.2	Gas/luchtverhouding	23
4.2	NO _x -emissies	24
4.3	CV-ketels en warmwaterketels	25
4.4	Keukenapparatuur	26
4.5	Gasmotoren	27
4.6	Brandstofcellen	28
4.7	Gasturbines	29



4.8	Feedstock en industrie	30
5	Kwaliteitsaspecten distributie van waterstof	31
5.1	Zuurstof in het gasdistributienet	31
5.1.1	Veronreinigingen vanuit het gastransportnet	31
5.1.2	Inlek van zuurstof bij calamiteiten en onderhoud	31
5.1.3	Permeatie van zuurstof	31
5.2	Waterpermeatie in gasdistributienetten	32
5.2.1	Vochtige lage druk distributienetten	33
5.2.2	Permeatie van water	33
5.3	Effecten van odorantresten in aardgasdistributienetten	34
5.4	Vloeistof en condensaat in gasdistributienetten	35
5.5	De temperatuur van het gas in distributienetten	35
6	Specificaties voor entry- en exitpunten	36
7	Afkortingen en begrippenlijst	40
7.1	Afkortingen	40
7.2	Begrippen	42
8	Literatuurbronnen	43
	BIJLAGE A: Reinigingstechnieken	45
>	A.1. Pressure Swing Adsorptie (PSA)	45
	A.2 Temperature Swing Adsorptie (TSA)	46
	A.3 Membranen	47
	A.4 Cryogeen	47
	A.5 Elektrochemie	48
	A.6 Methanisatie	48
	A.7 Samenvatting	49
	BIJLAGE B: Economische aspecten	50
	BIJLAGE C: Rekenvoorbeelden	53



1 Scope

Dit rapport beschrijft een voorstel voor de kwaliteitsaspecten die gelden bij de (toekomstige) distributie van gasvormig waterstof bij gebruik van het huidige aardgasdistributienet. Deze kwaliteitsaspecten betreffen zowel de invoeding ('entry') op een aansluiting als de aflevering ('exit') op een aansluiting.

De voorgestelde specificaties beogen een veilig en doelmatig gebruik van zowel het gasdistributienet als de waterstoftoepassingen. In dit rapport zijn geen specificaties opgenomen voor het transport van waterstof in het landelijk gastransportnet.

Het toevoegen van stoffen aan waterstof om waterstof of waterstofvlammen beter te kunnen waarnemen is evenmin opgenomen in de ontwerpspecificaties. Hierbij kan gedacht worden aan het toevoegen van odorant voor de ruikbaarheid van onverbrand gas en een stof toevoegen (een "colorant") om een waterstofvlam beter te kunnen zien. Zodra bekend is of toevoegstoffen voor dit doel worden ingezet en zo ja welke, kunnen deze worden toegevoegd aan de lijst van specificaties.

1.1 Overwegingen voor de toepassing van de waterstofsificatie

Doelstelling is te komen tot een breed toepasbare specificatie voor waterstof in het distributienet, waarbij zoveel mogelijk wordt aangesloten bij de huidige gasketen:

productiebron → landelijk transportnet → overdracht op GOS (Gasontvangstation) → distributienet (HD en LD) → eindgebruik.

De uiteindelijke keuze van de herkomst van de waterstof is deels afhankelijk van vraag- en aanbod en daarbij horende economische afwegingen (lage productie- en hoge reinigingskosten versus hoge productie- en lage reinigingskosten). Om in dit stadium van de transitie naar waterstof geen productiebronnen uit te sluiten, zijn in onderhavig rapport alle mogelijke productiebronnen meegenomen.

Afhankelijk van de productiebron zal de geproduceerde waterstof andere componenten kunnen bevatten, die directe toepassing in huishoudelijke- en klein industriële eindgebruikersapparatuur onmogelijk maken en is reiniging noodzakelijk.



De entry- en exit specificaties voor waterstof in het gastransportnet van de landelijke netbeheerder (LNB) zijn nog niet bekend en daarmee zijn de entry specificaties voor invoeding vanuit het gastransportnet in het distributienet ook niet bekend. Ook de keuze voor de mate van reiniging ('hoe schoon') en de plaats van reiniging (bij de productie of bij eindgebruik) dienen nog gemaakt te worden. Op basis van de huidige MR voor aardgas en de momenteel beschikbare literatuur en regelgeving, met name de PAS 4444, een inschatting gemaakt voor de op het GOS aan te leveren kwaliteit.

Om tot een breed toepasbare specificatie te kunnen komen voor huishoudelijke- en klein industriële eindgebruikers, die zijn aangesloten op het net van de RNB (Regionale Netbeheerder), is in deze studie ook rekening gehouden met vervuilingen/verontreinigingen die kunnen ontstaan in de diverse netten. Hierbij dient te worden gedacht aan beperkte lucht- en waterinlek in het lagedruk distributienet. Ook sporenc componenten, die ten gevolge van het decennialang transporteren van aardgas in het gassysteem zijn geadsorbeerd, kunnen nog voor langere tijd desorberen en met het transport van waterstof meekomen naar de eindgebruiker indien er geen additionele reiniging is geïmplementeerd.

Naar verwachting zal de verhouding tussen de verschillende soorten verbruiksapparatuur voor waterstof die op het distributienet zijn aangesloten aanvankelijk niet veel verschillen van die op het huidige aardgasdistributienet. De specificaties van de diverse toestellen zullen echter sterk verschillend zijn. De keuze voor de te leveren kwaliteit zal afhankelijk zijn van de maatschappelijke kosten, waarbij er een afweging moet worden gemaakt tussen de reinigingskosten en het aantal aangesloten toestellen.

Industriële- en feedstock-toepassingen zijn veelal aangesloten op het net van de LNB en niet op het gasdistributienet en krijgen hierdoor minder aandacht in het onderzoek.

Vooralsnog is gekozen voor een kwaliteit waarbij verbrandingstoepassingen functioneren.

Voor brandstofcellen, met name Polymere brandstofcellen (PEM cellen), is nu een hoge kwaliteit noodzakelijk maar dit gaat gepaard met hoge kosten, waarbij ook kans is op verontreinigingen vanuit het distributienet die een negatief effect hebben op het functioneren en de levensduur van deze toepassing. Voor het huidige beperkte aantal

brandstofceltoepassingen wordt verondersteld dat deze of een eigen gasreiniging toepassen dan wel beleverd worden via andere kanalen zoals tubetrailers waterstofgas of vloeibaar waterstof.

1.2 De zuivering van waterstof

Grofweg zijn er twee plaatsen in het gassysteem aan te wijzen, waar de zuivering optimaal kan worden toegepast:

- direct na de productie, zodat het kan voldoen aan de specificaties die gelden in achterliggende gassysteem. Het voordeel hiervan is dat de waterstofhoudende gascompositie veelal op hoge druk zal worden aangeboden en dat het gasdebiet hoog is, waardoor door synergievoordelen, de kosten relatief laag kunnen worden gehouden. Tevens zijn er -met name bij de chemische productieprocessen- mogelijkheden om de uit het waterstof verwijderde componenten als brandstof te gebruiken voor warmteproductie, waardoor de energieverliezen en emissies naar de buitenlucht kunnen worden beperkt;
- ter plaatse van eindverbruikers die zuiverder waterstof nodig hebben dan vanuit het distributienet kan worden geleverd. Zoals boven is gememoreerd vereisen met name brandstofcellen een hoge graad van zuiverheid. In die situaties dat niet kan worden gegarandeerd dat deze zuiverheid ook ter plaatse kan worden geleverd, dient voor de brandstofcel een zuivering te worden geplaatst teneinde de brandstofcel niet te beschadigen. Voordeel is dat de te realiseren reiniging kan worden afgestemd op het aangesloten toestel. Nadeel is echter dat de druk ter plaatse laag is en dat kosten, zeker als het gas ook nog dient te worden gecompriëerd om te kunnen reinigen, relatief hoog zullen zijn.

In de literatuur worden diverse technologieën voor het zuiveren van waterstof genoemd. Een groot aantal van deze technologieën zijn ten tijde van het schrijven van onderhavig rapport echter nog in ontwikkeling en nog niet aantoonbaar inzetbaar voor continue toepassing voor kleinere capaciteiten. In de bijlage A zijn de reinigingstechnieken, die momenteel het meest worden gebruikt nader toegelicht. De optimale plaats en –technologiekeuze wordt nagenoeg



geheel bepaald door de kosten. De economische aspecten worden behandeld in bijlage B. In het algemeen kan worden gesteld dat upstream reiniging grote economische voordelen heeft, ten opzichte van reiniging verderop in het gassysteem. Wel zal dit tot consequentie hebben dat de gaskwaliteit in het achterliggende gasnet gewaarborgd dient te worden.



2 Bestaande- en in ontwikkeling zijnde waterstofsificaties

2.1 Productspecificaties

Op dit moment zijn er twee productspecificaties benoemd die betrekking hebben op de vereiste kwaliteit van waterstofgas voor gastoe toepassingen. Dit zijn de “ISO norm 14687:2019 EN Hydrogen fuel quality — Product specification” [2] en “PAS 4444:2020 Hydrogen-fired gas appliances – Guide” [3]

Het zijn beide specificaties die betrekking hebben op de waterstofkwaliteit juist voordat deze verbruikt wordt in de gastoe toepassing.

2.1.1 ISO 14687:2019

De ISO norm 14687:2019 is opgesteld door het technisch comité “ISO/TC 197, *Hydrogen technologies*”. De eerste versie van specificaties is opgesteld in 1999, waarna revisies zijn verschenen in 2012 en 2014. De 2019 versie vervangt alle voorgaande versies. Eén van de redenen voor de revisies is de sterke ontwikkeling op het gebied van Polymere brandstofcellen, waarbij ook redenen waren om de specificaties te veranderen.

De norm heeft betrekking op stationaire- en voertuigtoe toepassingen. In de norm staan specificaties voor gasvormig waterstof (categorie I), vloeibaar waterstof (categorie II) en slurries (categorie III). Hier wordt uitsluitend de categorie I toepassingen beschreven, aangezien categorie II en III buiten de scope vallen.

De specificaties voor gasvormig waterstof zijn onderverdeeld in vijf categorieën:

- A. verbrandingsmotoren voor voertuigen, huishoudelijke en zakelijke verbrandingstoestellen zoals ketels, kooktoestellen en vergelijkbare toepassingen:
- B. industriële brandstof voor elektriciteits- en warmteopwekking, uitgezonderd PEM brandstofcellen
- C. grondapparatuur voor het tanken van vliegtuigen en ruimtevoertuigen
- D. PEM-brandstofcellen voor voertuigen
- E. toepassingen met een hoog vermogen en een hoge efficiëntie

Categorie E is verder onderverdeeld in drie subcategorieën, waarbij er twee betrekking hebben op menging met andere gassen en gasvormige brandstoffen, waarbij het gehalte aan niet waterstofgassen maximaal 50 mol% mag bedragen. Deze twee categorieën vallen ook buiten de scope van dit rapport.

De specificaties van grade A t/m E zijn weergegeven in Annex A van de norm.

2.1.2 PAS 4444:2020

PAS staat voor “Publicly Available Specification”. Een PAS heeft niet dezelfde status als een norm. Het is een document dat dezelfde structuur heeft als een norm en is bedoeld om het proces van normering te versnellen.

PAS 4444:2020 Hydrogen fired gas appliances standard, is gepubliceerd op 30 april 2020 onder licentie van BSI, The British Standards Institution. Het geeft richtlijnen voor het ontwikkelen en het veilig en doelmatig gebruik van waterstofverbrandingstoestellen. De PAS 4444 is ontstaan uit de inspanningen van het Hy4Heat programma [4]. Een Brits programma, gericht op een grootschalige demonstratie van waterstoftoepassingen in een stedelijke omgeving.

Naast criteria voor de te hanteren normen, de te gebruiken materialen, de ontwerpcriteria en de bewaking van het gedrag, zijn ook richtlijnen voor de kwaliteit van het te gebruiken waterstofgas benoemd. In PAS 4444 wordt dit distributiegas genoemd.



2.1.3 Vergelijking tussen ISO 14687:2019 grade A en PAS 4444:2020

Omdat zowel de specificaties grade A in ISO 14687:2019 als de PAS 4444:2020 gericht zijn op het gebruik in gasverbrandingstoestellen, is het nuttig om deze te vergelijken.

Tabel 2.1: Overzicht ISO 14687:2019 grade A en PAS 4444:2020

Gehalte of grootheid	ISO 14687:2019 Grade A	PAS 4444:2020
Waterstof	≥ 98 mol%	≥ 98 mol%
Koolmonoxide	-	20 ppm
Koolmonoxide en koolstofdioxide	≤ 1 ppm	-
Zuurstof		≤ 0,2 mol%
Totaal water + zuurstof + stikstof + argon	≤ 1,9 mol%	
Totaal argon +stikstof+ helium	-	≤ 2 mol%
Totaal methaan + koolstofdioxide + koolwaterstoffen	-	≤ 1 mol%
Totaal koolwaterstoffen	≤ 0,01 mol%	
Koolwaterstofdauwpunt	≤ -2 °C bij heersende druk	
Diwaterstofsulfide		≤ 5 mg/m ³
Totaal zwavel	≤ 2 ppm ^{A)}	≤ 50 mg/m ³
Waterdauwpunt	minus 10 °C bij 85 baro	
Deeltjes	Geen ^{B)}	
Fijnstof		Geen ^{C)}
Wobbe-index range (bovenwaarde)		42 – 46 MJ/m ³ ^{D)}
Calorische waarde range (bovenwaarde)		11,11 – 12,11 MJ/m ³ ^{D)}

- A) In geval van uitsluitend H₂S als verontreiniging is 2 ppm omgerekend circa 2,9 mg zwavel per m³(n)
- B) De waterstof mag geen stof, zand, vuil, olie of ander substanties bevatten die de waterstoftankinstallatie of de verbrandingsmotor tijdens het tanken kunnen beschadigen
- C) Het gas bevat geen vaste deeltjes, vloeistof of gasvormig materiaal die de integriteit kan verstoren van de gasleiding of van elk gastoestel waarvan een consument gebruik zou kunnen maken
- D) De waarden in deze tabel zijn gebaseerd op de referenties [15,15], dit wil zeggen een referentiewaarde voor de verbranding bij 15 °C en 1013,25 mbar en een referentietemperatuur voor de volumemeting van 15 °C bij 1013,25 mbar

Opvallend is dat ISO 14687:2019 voor grade A, een zeer lage grenswaarde voor koolmonoxide, koolstofdioxide en koolwaterstoffen kent. De reden voor deze waarden voor gebruik in verbrandingsmotoren en toestellen is onbekend. Het gebruik van een industriële waterstofkwaliteit, zoals gebruikelijk is voor waterstof verkregen uit reforming van aardgas, lijkt onmogelijk binnen deze specificatie.

2.2 Initiatieven voor regelgeving

Er lopen initiatieven voor regelgeving. De nu bekende initiatieven worden in deze paragraaf behandeld.

2.2.1 EASEE-gas

EASEE-gas is opgericht in 2002 met als doel om de handel in gas in Europa te bevorderen door het stroomlijnen van processen. Eén van de instrumenten die EASEE hiervoor inzet is het opstellen van *common business practices (CBP)*. Dit kunnen normen, procedures of communicatieprotocollen zijn. Zo heeft EASEE-gas een CBP voor de harmonisering van de aardgaskwaliteit opgesteld. Momenteel is de werkgroep EASEE-gas bezig met een CBP 'Hydrogen in natural gas infrastructure' [5].

Uitgangspunt is dus het gebruik van het huidige aardgasnetwerk. Een ander belangrijk uitgangspunt betreft het accent op een zogenaamde industriële waterstofkwaliteit. Dit omdat



tot 2030 het merendeel van de waterstof door middel van reforming van aardgas zal worden gemaakt en het waterstof heeft dan een bepaalde hoeveelheid verontreinigingen. Waterstof uit elektrolyse kan met een hoge zuiverheid geproduceerd worden, maar de productie uit elektrolyse is (nu nog) veel duurder. Elektrolyse zal pas vanaf 2030 op grote schaal op gang komen.

Verder wordt verwacht dat door het gebruik van het aardgasnetwerk het gas verontreinigd kan worden. Een "strengere" norm in combinatie met het gebruik van een aardgasnetwerk kan dan ook tot overschrijding van specificaties leiden als ingezet wordt op deze hoge kwaliteit.

Als mogelijke bronnen van verontreinigen in het net door gebruik van het aardgas worden benoemd:

- Vaste deeltjes als "black powder" en zand;
- Vloeistofverontreinigingen in het gasnetwerk zoals water, glycolen; koolwaterstofcondensaat en compressorolie;
- Kwik in of aan de wand van de buisleiding;
- Odorant dat aan de binnenkant van de wand van de buisleiding adsorberen.

Diffusie van zuurstof en/of stikstof door de buiswand wordt door de EASEE-gas werkgroep niet benoemd als mogelijke bron van verontreiniging. De reden hiervoor kan zijn dat EASEE-gas focust op gebruik van het gastransportnet, dat geheel in staal is uitgevoerd en waarbij diffusie door de wand geen rol speelt.

De CBP is ten tijde van het schrijven van dit rapport nog niet vrijgegeven door EASEE-gas.

2.2.2 *H₂ im Netz*

H₂ im Netz is een project van de Duitse brancheorganisatie DVGW [6]. De uitvoerende partijen zijn DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) en Open Grid Europe (OGE).

Het project is gestart in maart 2020 en eindigt in november 2021. Het doel is om de regelgeving voor waterstoftransport door het bestaande aardgasnet, te ondersteunen.

Hierbij worden drie onderzoeksvragen beantwoord:

1. welke verontreinigingen kunnen voorkomen in waterstof tijdens de productie, transport en distributie?
2. welke procestechnische en operationele maatregelen kunnen genomen worden voor het functioneren van de gastoepassingen in relatie tot de eisen met betrekking tot de gaskwaliteit?
3. Hoe kan het gas het beste worden bemonsterd en geanalyseerd voor de controle op de gaskwaliteit?

Omdat het onderzoek ten tijde van het schrijven van het rapport nog loopt, kunnen nog geen resultaten worden vrijgegeven. De eerste ideeën betreffen twee specificaties: één voor een industrieel net met een exitspecificatie van minimaal 99,97 vol% waterstof en een specificatie voor verbrandingstoestellen met een zuiverheid van minimaal 98 vol% waterstof.

2.2.3 *Gasunie specificaties*

Gasunie heeft drie sets van conceptspecificaties voorgelegd aan mogelijke afnemers die aangesloten kunnen worden op een hoge druk waterstofnetwerk, *de Hydrogen Backbone*. De specificaties zijn gepresenteerd op een webinar op 1 oktober 2020 [49].

Aan de industriële afnemers wordt gevraagd:

- welke set van specificaties voor hun geschikt is;
- voor welke toepassing wordt de waterstof gebruikt;
- welke verontreinigingen zijn kritisch voor het proces;
- wordt een kwaliteitsbehandeling en kwaliteitsbewaking van het waterstofgas voorzien?

De specificaties zijn nog niet vastgesteld en kunnen naar aanleiding van de respons van de potentiële afnemers, nog wijzigen.



Tabel 2.2 ontwerpspecificaties van GTS met toelichting

Constituents	Specification 1	Specification 2	Specification 3	Opm.
Hydrogen fuel index	≥98,0 mol%	≥99,0 mol%	≥99,5 mol%	1
Total hydrocarbons including methane	≤1000 μmol/mol	≤1000 μmol/mol	≤1000 μmol/mol	2
Oxygen (O ₂)	0,1-0,2 mol%	0,1-0,2 mol%	0,1-0,2 mol%	3
Sum of <u>inerts</u>	≤2 mol%	≤1,0 mol%	≤0,5 mol%	4
Carbon dioxide (CO ₂)	≤20 μmol/mol	≤20 μmol/mol	≤1 μmol/mol	5
Carbon monoxide (CO)	≤20 μmol/mol	≤20 μmol/mol	≤1 μmol/mol	6
Total sulphur incl H ₂ S	≤5 μmol/mol	≤5 μmol/mol	≤1 μmol/mol	7
Formic acid	≤10 μmol/mol	≤10 μmol/mol	≤1 μmol/mol	8
Formaldehyde (HCOH)	≤10 μmol/mol	≤10 μmol/mol	≤1 μmol/mol	8
Ammonia (NH ₃)	≤10 μmol/mol	≤10 μmol/mol	≤1 μmol/mol	8
Halogenated compounds	≤0,05 μmol/mol	≤0,05 μmol/mol	≤0,05 μmol/mol	9
Water dewpoint	-8 °C bij 70 bara	-8 °C bij 70 bara	-8 °C bij 70 bara	10
All other impurities	disclaimer	disclaimer	disclaimer	11
Temperature	5-30 °C	5-30 °C	5-30 °C	12

1. Purity hydrogen
2. Because there is no Wobbe limit a limit on hydrocarbons is necessary
3. For pipelines transporting hydrogen gas, degradation can set a limit on the fatigue loading in terms of pressure variations and/or number of cycles. The degradation can be mitigated by adding a small amount of oxygen gas to the hydrogen gas. This has the advantage that the fatigue loading does not have to be limited and monitored. (ref: VA 20.0214; minimum oxygen gas level to mitigate hydrogen-enhanced fatigue in pipelines)
4. Limitation on inerts also based on the purity of hydrogen. For fuel cells also limited.
5. CO₂ level as low as possible, aim is no CO₂ emission.
6. Because of personal safety reasons at end-users the CO level on the given value.
7. Total sulphur on low level because no sulphur is expected in the hydrogen.
8. Important for fuel cells and can be produced by electrolyser hydrogen production.
9. Adopted from ISO 14687
10. Adopted from the Ministerial Regulation Gas quality (MR gas quality) in the Netherlands
11. Disclaimer: Shall not contain solid, liquid or gaseous material that might interfere with the integrity or operation of pipes or any gas appliance.
12. Limitation on temperature because of the design temperature of the pipeline.

2.2.4 HYPOS

HYPOS staat voor hydrogen power storage & solutions East Germany [7].

Het doel van Hypos is om een infrastructuur van waterstof op te zetten, voor de productie, opslag en distributie van waterstof.

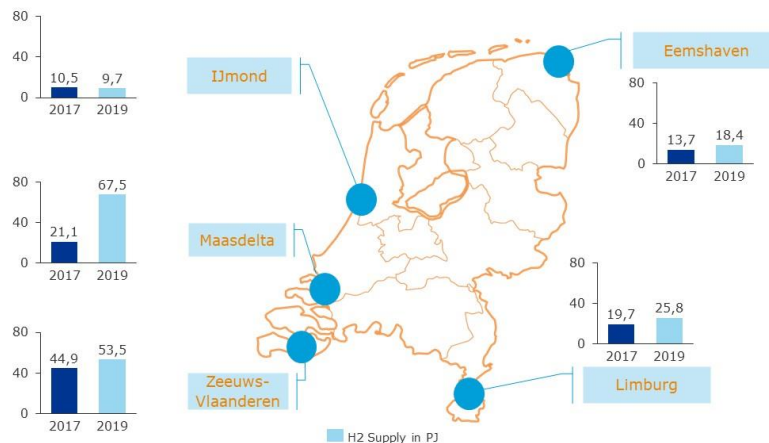
Bij navraag bleek dat gebruik wordt gemaakt van een waterstoftransportleiding onder beheer van Linde AG. De specificaties van waterstof die hiervoor gelden zijn vertrouwelijk.



3 Bronnen van waterstof

3.1 Waterstofproductie in Nederland

Op dit moment wordt waterstof met name gebruikt in de chemische industrie als grondstof. Een laatste inschatting uit 2019 leert dat het jaarlijks gebruik ongeveer 16 miljard Nm³ is. Nagenoeg al deze waterstof wordt geproduceerd nabij de eindgebruikerstoepassingen in de grote chemische clusters, zoals weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1 Geschatte waterstof gebruik in Nederland [8]

Verreweg het grootste deel van de waterstof wordt momenteel geproduceerd uit fossiele grondstoffen, met name aardgas. Bij de productie van deze zogenaamde grijze waterstof komt kooldioxide vrij. Om de uitstoot van kooldioxide te beperken worden meer duurzame methoden ontwikkeld voor de productie van waterstof. Dit kan door bijvoorbeeld het geproduceerde kooldioxide af te vangen en op te slaan, resulterend in zogenaamde blauwe waterstof. Waterstof kan ook geheel kooldioxide-vrij geproduceerd worden, dan spreken we van groene waterstof.

Zoals eerder is gememoreerd, is de toepassing van waterstof in de chemische clusters met name als grondstof voor de productie van andere chemicaliën. Een drietal processen zijn daarbij de grootste gebruikers:

- de productie van ammoniak, voor kunstmestproductie;
- raffinageprocessen, voor de ontzwaveling van brandstoffen;
- methanolproductie.

Elk van deze processen heeft specifieke eisen aan de kwaliteit van de waterstof. Veelal worden in deze processen bijvoorbeeld 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 de waterstof die daar vereist wordt.



Waterstof kan geproduceerd worden op een aantal manieren. De meest gebruikelijke manieren zijn thermochemisch (uit koolwaterstoffen) of elektrochemisch (uit water elektrolyse). Opgemerkt dient daarbij te worden dat beide methoden zowel met- als zonder kooldioxide-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 ontstane waterstof niet als groen geclassificeerd worden. Aan de andere kant wordt waterstof geproduceerd uit groen gas wel gezien als groene waterstof.

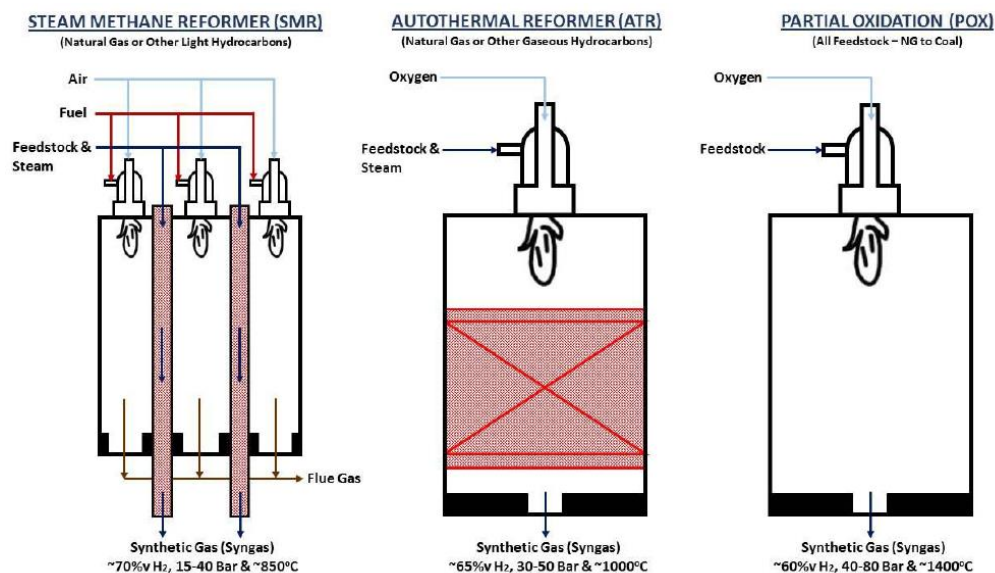
3.2 Thermochemisch

Bij de productie van waterstof uit koolwaterstoffen wordt eerst synthesegas 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, koolstofdioxide en koolstofdioxide. Door middel van de zogenaamde watergas shift reactie (WGS, zie figuur 3.2) wordt koolmonoxide met water omgezet naar meer waterstof en koolstofdioxide. Vervolgens wordt de waterstofstroom op de gewenste kwaliteit gebracht in een zuiveringsstap. In stappen ziet het proces er dus als volgt uit:



Figuur 3.2: Overzicht processtappen thermochemische productie van waterstof

Voor de productie van syngas op industriële schaal zijn een drietal reactoren het meest voorkomend, weergegeven in figuur 3.3. De drie typen verschillen in benodigde grondstoffen en warmtehuishouding en worden in de volgende secties verder besproken.

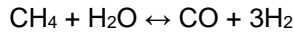


Figuur 3.3 Syngas reactoren [9]



3.2.1 Steam Methane Reforming

De meest voorkomende 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 wordt methaan onder hoge temperatuur omgezet met water in waterstof en koolmonoxide:



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 in de aanwezigheid van een nikkelkatalysator. De benodigde warmte wordt geleverd door het verbranden van aardgas of rest-gassen verderop uit 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 buiten kant van de buizen warmte wordt toegevoerd vanuit de branders.

Een typische samenstelling van de uitgaande stroom vanuit de SMR-reactor is in tabel 3.1 weergegeven. Exacte samenstellingen worden per proces verder geoptimaliseerd.

Tabel 3.1: Samenstelling syngas na de SMR reactor [4]

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

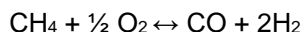
Vanuit het EMPIR-project [10] is onderzoek gedaan naar mogelijke andere componenten die aanwezig kunnen zijn in de uitgaande stroom van de SMR reactor. Als in het voedingsgas stikstof, argon en hogere koolwaterstoffen aanwezig zijn, dan kunnen deze ook in de uitgaande stroom verwacht worden. In de reactor kan mierenzuur, ammoniak of formaldehyde gevormd worden. Deze kunnen op mmol/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.

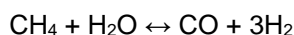
3.2.2 Autothermal reforming

In een SMR komt circa 40% van de CO₂ als lagedruk restgas vrij. Voor het afvangen van deze CO₂ in de productie van blauwe waterstof moeten hiervoor relatief hoge kosten gemaakt worden. Dit is één van de redenen waarom het Auto Thermal Reforming (ATR) proces momenteel meer aandacht krijgt, maar nog niet op grote schaal wordt toegepast. Het voordeel van dit proces is dat alle CO₂ 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 CO per mol H₂ vrij vergeleken met een SMR. In deze stap is



zuurstof nodig. De zuurstof kan zuiver worden aangeleverd of vanuit een luchtstroom, waardoor meer inertie (N₂) in het mengsel komen. In de praktijk wordt gebruik gemaakt van zuivere zuurstof om daarmee de bruikbaarheid van de PSA restgassen te vergroten voor voorverwarmingsprocessen.

Een typische syngas compositie na de ATR-reactor is weergegeven in tabel 3.2. Vervolgens wordt in de Water Gas Shift reactor de CO verder omgezet in waterstof en CO₂ (zie tabel 3,3), en wordt de waterstofstroom op kwaliteit gebracht met een PSA.

Tabel 3.2: samenstelling syngas na de ATR reactor

COMPONENT	FRACTIE IN ATR SYNGAS (DROOG MOL%)
H ₂	63-66
CO	27-30
CO ₂	5-6
CH ₄	0.3-1.4
N ₂	0.7 ¹
Ar	0.61

3.2.3 Vergassing

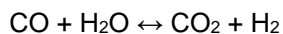
Vergassing of Partial Oxidation (POx) wordt gebruikt om syngas te maken uit laagwaardige koolwaterstoffen zoals resten uit het raffinageproces, petroleum, kolen of (droge) biomassa stromen. De basis reactie is:



Hierbij worden de grondstoffen onder een ondermaat zuurstof vergast tot koolmonoxide en waterstof. Typische reactoren worden bedreven rond de 20-40 bar en temperaturen tussen de 1440-1600 °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, cyanides, zware metalen en zwavelhoudende componenten. De uitgaande stroom zal daarom zeker gezuiverd moeten worden 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.

3.3 Water gas shift

Elk van de drie syngas productiemethoden wordt gevolgd door de watergas shift (WGS) reactor. In deze reactie wordt koolmonoxide 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 3.3 geeft de typische samenstelling na de WGS reactor voor SMR en ATR (met zuivere zuurstof).

¹ Voor syngas na CO₂ capture (indicatief)

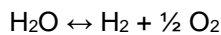


Tabel 3.3: Samenstelling gas na watergas shift reactie [4]

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

3.4 Elektrolyse

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



De reactie vindt plaats in een elektrolyse cel, waarbij de anode en kathode gescheiden worden door een elektrolyt. De keuze van het elektrolyt bepaalt de elektrolyse methode. In de praktijk van water elektrolyse komen 2 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 Alkaline elektrolyse is dit een oplossing met Kalium- of Natriumhydroxide. Naast elektriciteit is gezuiverd tapwater nodig, typisch met een geleidbaarheid <5 µS/cm voor alkaline en 1 µS/cm voor PEM.

Door de beperkte permeatie van onzuiverheden (zuurstof, water) door het membraan, levert PEM elektrolyse zuivere waterstof (99.99+%) na drogen. Temperature Swing Adsorption (TSA) wordt gebruikt voor het verwijderen van water uit de productstroom. Hierbij wordt de stoom afgekoeld, waardoor water condenseert en wordt verwijderd. Eventueel zuurstof wordt met een katalytische deoxidiser met waterstof omgezet in water en daarmee verwijderd.

Tabel 3.4: Verontreiniging na elektrolyse zonder TSA. Na zuivering met TSA voldoet de waterstof aan de ISO 14867 standaard [4].

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	

3.5 Zuivering na productie

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

Afhankelijk van de doorstromingsnelheid, 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 de waterstof verder op in het proces. Deze liggen meestal boven de 98%. Uit de PSA komt naast de zuivere waterstof stroom een afvalgasstroom, die bij SMR typisch 50% CO₂, 15% CO en 9% CH₄ bevat. Deze stroom wordt gebruikt als brandstof in eerdere processtappen. Een deel van de 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 typisch tussen de 80-93%.

3.6 Productiekosten

De productiekosten voor waterstof zijn afhankelijk van de kosten van het proces en de grondstoffen. Op dit moment kost waterstof uit aardgas middels SMR en zuivering tot >98% in de range van 1-3 EUR/kg, terwijl waterstof uit elektrolyse geschat wordt tussen de 3-6 EUR/kg [11].



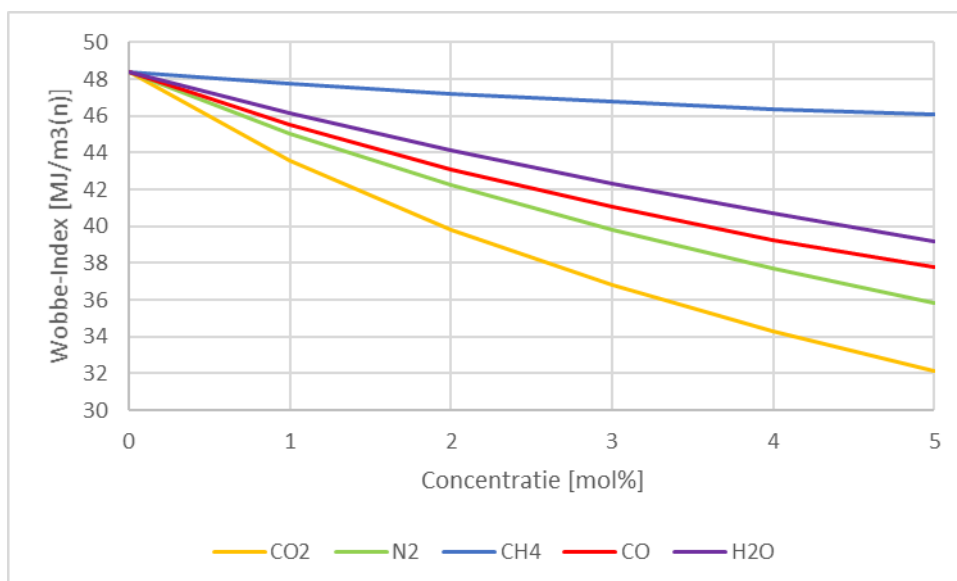
4 Specificaties gasverbruikstoestellen

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 gasverbruikstoestellen, inclusief brandstofcellen.

4.1 Impact van de waterstofsamenstelling op gedrag van verbrandingstoestellen

4.1.1 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, kooldioxide en koolmonoxide kan deze sterk variëren, zoals grafisch is weergegeven in figuur 4.1. 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. Dit treedt op bij alle gebruiksapparatuur die geen regelsysteem toepassen en wordt navolgend nader toegelicht.



Figuur 4.1: Effect op de Wobbe-index [0,25] door bijmenging van verschillende onzuiverheden aan waterstof.

Er is een voordeel m.b.t. het behouden van een breed aanbod aan waterstof als de eindgebruikerstoepassing 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 [2] van koolstofhoudende componenten vormt een ernstige belemmering voor industrieel geproduceerde waterstof (zie tabel 2.1), waardoor de meest ruime waterstofsificatie -op componentniveau- is gegeven in de PAS4444 [3]¹:

- Waterstof: ≥ 98 mol%
- Stikstof + argon + helium: ≤ 2 mol%
- Methaan + kooldioxide + koolwaterstoffen: ≤ 1 mol%

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

- 98 mol% waterstof + 1 mol% kooldioxide + 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%². Zoals voorgaand is genoemd, leidt dit bij het gros van de eindgebruikersapparatuur tot een variatie in vermogen/thermische input van 15%. Verschillende eindgebruikerstoepassingen hebben verschillende mogelijkheden om hiermee om te gaan. Opgemerkt wordt dat -indien dit als entrysificatie wordt gehanteerd- er nog een variatie in waterfractie (in natte netten) van ca. 1% ook kan optreden. Zie hiervoor hoofdstuk 5. Bij de ondergrens van bovengenoemde Wobbeband verlaagt 1% waterdamp de Wobbe nog verder, tot 39,32 MJ/m³(n), oftewel de variatie in de Wobbe zal toenemen tot ca. 20%. Zonder maatregelen, hetzij aan de toestelconstructie, hetzij aan de gassamenstelling, kan dit leiden tot een substantieel verlies van de doelmatigheid van het toestel³. 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. Ook laat deze specificatie nog ruimte voor (beperkte) waterinlek.

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.

4.1.2 Gas/luchtverhouding

Omdat de stoichiometrische luchtbehoefte en calorische waarde evenredig variëren bij waterstof/inert-mengsels, varieert de gas/luchtverhouding in verbrandingstoestellen evenredig met de Wobbe-index. Een hogere Wobbe leidt tot een (brandstof)rijkere verbranding en andersom. Zie hiervoor figuur 4.2, waar gas/luchtverhouding als equivalentieverhouding wordt uitgedrukt. Echter, bij koolwaterstoffen als onzuiverheden verloopt de verandering in gas/luchtverhouding anders. Figuur 4.2 illustreert dit met methaan als koolwaterstof. Bij apparatuur met enige mate van voormenging heeft de gas/luchtverhouding vervolgens -net als de gassamenstelling- een sterke invloed op de verbrandingsnelheid. Wanneer deze laatste te veel verandert kan dit leiden tot een instabiele verbranding bij voorgemengde

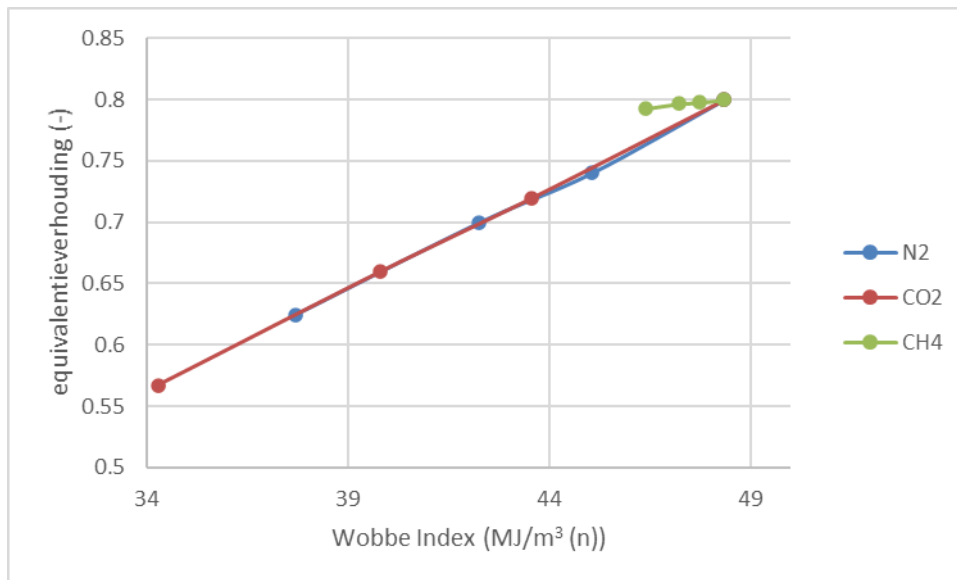
¹ In bijlage C zijn voorbeelberekeningen weergegeven

² 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%.

³ Voor niet geregelde toestellen hebben Wobbevariaties ook impact op de efficiency



branders, zoals bijvoorbeeld gebruikt in huishoudelijke toestellen. Bij een te hoge verbrandingssnelheid kan dit leiden tot vlaminslag, waarbij de vlam in de brander propageert en schade toebrengt aan een toestel. Bij een te lage verbrandingssnelheid kan vlamlift plaatsvinden, waarbij de vlam deels of geheel loskomt van de brander met de emissie van onverbrande waterstof of het doven van de vlam tot gevolg. Onvolledige verbranding leidt tot verlies aan thermische input en emissie van waterstof. Dit vindt voornamelijk plaats bij diffusiebranders.



Figuur 4.2: Effect op de equivalentieverhouding in een huishoudelijk toestel door bijmenging van verschillende onzuiverheden aan waterstof als functie van Wobbe-Index (0,25).

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 entrspecificaties te 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%.¹ Er dient te worden opgemerkt dat centrale bijmenging van stikstof ook een gunstige invloed op NO_x-emissies 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.

4.2 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 NO_x is sterk afhankelijk van de (piek)temperatuur tijdens verbranding. In volledig voorgemengde toestellen wordt NO_x-vorming gereduceerd door een hoge luchtvermaat in de gehele vlam. Bij brandstofarme condities is de vlamtemperatuur, maar ook het rendement van een toestel lager. Voor diffusiebranders vindt een deel van de verbranding plaats bij stoichiometrische condities 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. Rookgasrecirculatie heeft naast het verlagen van de vlamtemperatuur en NO_x-emissie een gunstig effect op het rendement van bijvoorbeeld een

¹ Centrale stikstofbijmenging valt buiten de scope van dit onderzoek en is derhalve niet verder onderzocht.



ketel [50]. Het toepassen van rookgasrecirculatie vergt extra middelen waardoor toestellen duurder worden. Zoals eerder is gememoreerd, is een mogelijkheid om in een waterstofsificatie 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.

4.3 CV-ketels en warmwaterketels

Deze categorie beslaat huishoudelijke toestellen, die worden gebruikt voor warm water en/of het verwarmen van woningen via het centrale verwarmingssysteem. Daarnaast zijn commerciële ketels inbegrepen voor de verwarming van grotere ruimtes en kantoren. Dergelijke ketels gebruiken op dit moment aardgas als brandstof en het is aannemelijk dat de warmtevraag in de vorm van verwarming en warm water vanuit eindgebruikers zal blijven bij een transitie van aardgas naar 100% waterstof. Deze vraag kan worden ingevuld door de ontwikkeling van waterstofketels.

Ketelfabrikanten (of branderfabrikanten) van huishoudelijke toestellen spelen al in op de in de toekomst verwachte uitrol van waterstofinfrastructuur door toestellen te ontwikkelen geschikt voor 100% waterstof. In de laatste jaren hebben de fabrikanten Remeha, Bekaert, Nefit Bosch¹ en ATAG gewerkt aan de ontwikkeling van een huishoudelijke combiketel geschikt voor 100% waterstof. Een aantal van deze toestellen zijn inmiddels in de demonstratiefase². Het is momenteel nog niet duidelijk in hoeverre al deze toestellen geschikt zullen zijn voor onzuiverheden in de brandstof en voor welke Wobbe range ze precies zijn ontwikkeld. In het algemeen kan gesteld worden dat branders zeer robuust zijn tegen de in waterstof aanwezige sporencomponenten zoals zwavelhoudende stoffen, koolwaterstoffen, koolmonoxide, etc. Branders in CV-toestellen en warmwaterketels zullen moeten worden ontworpen voor een bepaalde range aan gas/luchtverhouding, deze zal moeten worden aangehouden om instabiele verbranding te beperken. In onderhavige studie is ervan uitgegaan dat in de toestellen die zijn (of worden) ontwikkeld materialen (metalen, plastics, afdichtingen, etc.) worden gebruikt die toepasbaar zijn voor waterstof. De toepasbaarheid van verschillende materialen wordt hier daarom niet besproken.

Het type brander beïnvloedt het gedrag op wisselingen in gassamenstelling en Wobbe-index. 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. Bij een aantal van de in ontwikkeling zijnde toestellen voor 100% waterstof maken gebruik van volledig voorgemengde branders. Naast toestellen met een volledig voorgemengde brander zijn er ook toestellen in ontwikkeling die gebruik maken van diffusiebranders. DNV GL heeft in haar lab twee moderne huishoudelijke toestellen omgebouwd van aardgas naar 100% waterstof [12]. Beide toestellen waren voorheen uitgerust met volledig voorgemengde branders, maar zijn omgebouwd naar diffusiebranders³. Er dient te worden opgemerkt dat er ook commerciële aardgasketels zijn die zijn uitgerust met diffusiebranders, meestal in de vorm van ventilatorvoorzetbranders. Door de hoge verbrandingssnelheid van waterstof/luchtmengsels, is het risico op vlaminslag in voorgemengde toestellen hoog. Ter preventie van vlaminslag is het noodzakelijk de verbranding zeer brandstofarm te laten plaatsvinden, wat weer andere uitdagingen geeft 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.

¹ Het toestel van Nefit Bosch zal geschikt zijn voor zowel 100% aardgas als 100% waterstof, met een inspanning van minder dan een uur en met beperkte kosten kan een installateur het toestel omschakelen.

² De ketels van Remeha en Bekaert draaien momenteel in Rozenburg.

³ De ventilatoren in de toestellen worden nog steeds gebruikt na ombouw naar waterstof, om lucht langs de brandstofinjectoren te blazen die direct stroomafwaarts (voor toestel 1) of stroomafwaarts (voor toestel 2) van de brander zijn geplaatst.



De keuze voor een type brander zal ook worden beïnvloed door de gespecificeerde variatie in samenstelling, maar het is aannemelijk dat zowel voorgemengde branders als diffusie branders zullen worden ingezet.

Los van de uitdagingen die al dan niet optreden bij het beheersen van de variatie in gas/luchtverhouding, zal bij een brede Wobbeband met name de doelmatigheid voor de eindgebruiker van belang zijn. De eindgebruiker verwacht dat kan worden voldaan aan de vraag naar warmte en/of warm water. Zoals boven is vermeld, geeft een variatie van 15-20% in Wobbe Index een even grote variatie in vermogen van het toestel. Als voorbeeld; een 20 kW huishoudelijke CV-ketel die is ontworpen om 20 kW te leveren bij puur waterstof, geeft slechts 17 kW af bij de waterstof, dat aan onderkant van de Wobbeband nog net voldoet aan de samenstellingsvariatie van PAS4444 zonder de 4 MJ/m³ Wobbegrens. Het is dan ook de vraag of het toestel dan aan de warmtevraag kan voldoen. Andersom, 20 kW bij W=40.97 MJ/m³(n) wordt belast met 23 kW bij puur waterstof, hetgeen (zonder aanvullende maatregelen) tot toestelschade kan leiden. Het overdimensioneren van toestellen of het inbouwen van een regeling voor thermische input zijn mogelijkheden om het verlies aan doelmatigheid toestellen voor deze toepassing te beperken. PAS4444 beperkt deze uitdaging door de Wobbeband van 4 MJ/m³(n) voor te schrijven.

Hier wordt benadrukt dat bovengenoemde mitigerende maatregelen voor behoud van de doelmatigheid van de toepassing ook consequenties hebben voor het beleid ten aanzien van de afstelling van apparatuur in het veld. Het op aanvraag aangeven van de lokale gaskwaliteit ten tijde van de installatie of het afstellen van toestellen "af fabriek", zoals nu in het Verenigd Koninkrijk geldt voor volledig voorgemengde ketels, is dan nodig om deze maatregelen effectief te laten zijn. Ook bij een Wobbeband van 4 MJ/m³(n) dient onzes inziens het aspect van afstelling meegenomen te worden in de toekomstige regelgeving.

De meeste verbrandingsapparatuur is robuust tegen de in waterstof verwachte sporenc componenten. Aanbevolen wordt om de MR gaskwaliteit als uitgangspunt te nemen voor verschillende sporen, waaronder zwavelhoudende stoffen.

CV-ketels en warmwatertoestellen zijn met name gevoelig voor variaties in de Wobbe-index. Om deze reden wordt voorgesteld de absolute bandbreedte te beperken tot de in de PAS4444 genoemde 4 MJ/m³(n).

4.4 Keukenapparatuur

Deze categorie beslaat keukenapparatuur zoals kooktoestellen en ovens. In principe is het mogelijk om keukenapparatuur te ontwerpen die gebruik maakt van waterstof als brandstof. Dergelijke apparatuur is momenteel nog niet commercieel verkrijgbaar. Voor aardgas is keukenapparatuur vaak uitgerust met deels voorgemengde branders (atmosferisch of met ventilator), met name om CO emissies te voorkomen. Voorgemengde branders zijn zoals eerder aangegeven gevoelig voor vlamslag. Aangezien er bij waterstof geen CO vrijkomt en om vlamstabiliteitsproblemen te voorkomen lijkt het voor waterstof de meest logische keuze diffusiebranders te gebruiken. Door de hoge vlamtemperatuur van waterstofdifflusievlammen worden voor dit type apparatuur echter hogere NO_x-emissies verwacht.

De beperkte zichtbaarheid van waterstofvlammen is voor met name waterstofkookplaten een potentieel veiligheidsprobleem. Als er mogelijkheden zijn de zichtbaarheid van waterstofvlammen te verbeteren door een stof bij te mengen aan waterstof zal dit in een eventuele waterstofs specificatie voor keukenapparatuur vermeld moeten worden. Een alternatief is om -indien mogelijk- een lokale oplossing te gebruiken om de zichtbaarheid van vlammen te verbeteren. Bij ovens is de vlam dusdanig afgeschermd dat de veiligheidsrisico's met betrekking tot vlamzichtbaarheid gemitigeerd (kunnen) worden.

Naar verwachting zullen de specificaties voor deze type toestellen niet anders zijn dan die voor CV-toepassingen. Hierbij geldt ook de eis van behoud van vermogen, bij grote variaties in Wobbe, waarmee de doelmatigheid kan worden geborgd. Omdat thermische input regelingen niet gangbaar zijn in deze toestellen, is het waarborgen van het maximumvermogen bij lage Wobbe Index een voor de hand liggende oplossing.



Keukenapparatuur is net als CV-ketels en warmwatertoestellen met name gevoelig voor variaties in de Wobbe-index. Om deze reden wordt voorgesteld om ook voor deze apparatuur de absolute bandbreedte te beperken tot dezelfde 4 MJ/m³(n).

4.5 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 de lagere calorische waarde, 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 [13-16] verbrandingsmotoren voor 100% waterstof ontwikkelen, waarbij in elk geval één fabrikant zeer recentelijk dual-fuel waterstof/diesel motoren te koop aanbiedt [16]. 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 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 [4]. 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 principieel 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.

Voorafgaand aan het stellen van een specificatie voor waterstof, dient voor gasmotoren eerst het doelmatigheidsvraagstuk te worden beantwoord. Daarom wordt voorgesteld om gasmotoren tot die tijd buiten de specificaties te houden.

4.6 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) [17]. 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 4.1 en 4.2 zijn de specificaties voor zowel de waterstof als de lucht opgetekend.

Tabel 4.1: Waterstofspecificaties brandstofcel [ref: Nedstack]

Component	Maximale concentratie ^{A)}
Koolmonoxide (CO)	0,2 ppm
Kooldioxide (CO ₂)	0,1%
Totaal zwavel	0,004 ppm
Kwik (Hg)	0,004 ppm
Formaldehyde (HCHO)	0,01 ppm
Mierezuur (HCOOH)	0,2 ppm
Ammonia (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 4.2: Luchtspecificaties brandstofcel [ref: Nedstack]

Component	Maximale concentratie ^{A)}
Koolmonoxide (CO)	25 ppm
Totaal zwavel	0,01 ppm
Stikstofdioxide (NO ₂)	0,3 ppm
Ammonia (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 waterstofsificatie voor brandstofcellen streng is en er niet op voorhand kan worden gegarandeerd dat er geen onzuiverheden vanuit gassysteem meekomen, houdt in dat er te allen tijde een extra reiniging voor de brandstofcel dient te worden geplaatst. Dit zal extra kosten met zich meebrengen, waardoor de business case voor dit type toestellen onder druk zal 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 bedragen¹.

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 electrolyzers voorzien, die met korte-, directe gasleidingen aan brandstofcel zullen worden gekoppeld¹.

Het is de huidige verwachting dat brandstofcellen niet direct aan het openbare distributienet zullen worden aangesloten tenzij een additionele reiniging is geïmplementeerd. Hierdoor hoeft bij het opstellen van de specificaties voor het openbare distributienetwerk op dit moment nog geen rekening te worden gehouden met dit type eindgebruikersapparatuur.

4.7 Gasturbines

Er zijn momenteel gasturbines beschikbaar die gebruik kunnen maken van 100% waterstof op basis van diffusieverbranding [18]. Diffusiesystemen in gasturbines gaan gepaard met het bijmengen van stikstof of water/stoom voor het verlagen van de NOx uitstoot. Het gebruik van diffusiesystemen heeft verschillende nadelen, waaronder een lagere efficiëntie, hoge kosten en hogere NOx ten opzichte van voorgemengde systemen. Verder onderzoek en ontwikkeling richt zich daarom onder andere op de Dry Low NOx (DLN) technologie. Deze technologie wordt ook gebruikt in moderne aardgasgestookte turbines, waarbij 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 NOx 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 [19]. EUTurbine heeft het doel gesteld om bij 2030 gasturbines te ontwikkelen voor 100% waterstof [20].

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

Zoals eerder beschreven vallen gasturbines in principe onder ISO 14687 gradatie B, met een gespecificeerde waterstofzuiverheid van minimaal 99,90%. Er zit veel verschil tussen deze zuiverheid en die benodigd is voor bijvoorbeeld CV-toestellen. Echter, omdat er geen grote gasturbines aan de distributienetten zijn aangesloten of aangesloten zullen worden, wordt aanbevolen om geen rekening te houden met specificaties voor deze machines. Voor mini-/microturbines voor waterstof, die ook op het DLN-principe zijn ontworpen, gelden dezelfde uitdagingen en -op basis van een korte internet-inventarisatie- dezelfde status van ontwikkeling.

¹ Referenties bij de auteurs bekend



Omdat er weinig zicht is op de ontwikkelingen van mini- en microgasturbines wordt voorgesteld om voor nu geen rekening te houden met mogelijke gevoeligheden in het ontwikkelen van ontwerpspecificaties en deze turbines buiten de specificaties te houden.

4.8 Feedstock en industrie

Op het distributienet zijn een beperkt aantal aangeslotenen die het gas op een andere manier dan voor warmte en/of krachtopwekking toepassen. Het betreft hier zogenaamde feedstock/behandelings-toepassingen, die of het gas direct in een productieproces toepassen of de koolstof uit aardgas gebruiken in hun productieproces. Voor feedstock-processen 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.

Feedstockprocessen zijn dusdanig specifiek zodat er geen generieke specificaties voor kunnen worden afgegeven en zijn derhalve ook buiten de onderhavige studie gehouden.

Voor toepassingen die de brandstof alleen voor (in)directe verhitting gebruiken gelden dezelfde argumenten als voor andere verwarmingsapparatuur, dat wil zeggen dat de variaties in vermogen en gas/luchtverhouding, alsmede de NO_x-uitstoot, de beperkende factoren zullen zijn. Bij de ontwikkeling/toepassing van apparatuur zal rekening met deze aspecten gehouden moeten worden.



5 Kwaliteitsaspecten distributie van waterstof

In dit hoofdstuk worden aspecten benoemd van de distributie van waterstof in bestaande aardgasnetten, die van invloed kunnen zijn op de gaskwaliteit.

5.1 Zuurstof in het gasdistributienet

Er zijn drie mogelijke significante bronnen van zuurstof in het gasdistributienet:

- Verontreinigingen vanuit het gastransportnet [23-27];
- Verontreinigingen door calamiteiten en werkzaamheden;
- Permeatie vanuit de bodem.

5.1.1 Verontreinigingen vanuit het gastransportnet

Mogelijk zal zuurstof opzettelijk worden toegevoegd aan waterstof in het toekomstige waterstoftransportnet. Over het algemeen versnelt waterstof de scheurgroei van het metaal. Dit is mede afhankelijk van de gassamenstelling, waarbij bijvoorbeeld zuurstof en koolmonoxide de verhoging van de scheursnelheid tegengaan [21]. Er is geen toename van vermoeiing geobserveerd bij een gasmengsel van 75/25 (aardgas/H₂) voor X70 staal en 50/50 (aardgas/H₂) voor X52 staal.

Indien het waterstofgehalte wordt verhoogd, neemt de scheurgroeisnelheid toe. Dit effect kan worden tegengegaan door de toevoeging van een kleine hoeveelheid zuurstof. Na toevoeging van 250-500 ppm zuurstof aan zuiver waterstof is de vermoeiing van het metaal even groot als bij het gebruik van aardgas [22]. GTS overweegt om ca. 0,1 vol% zuurstof aan de waterstof toe te voegen om te voorkomen dat vermoeiingsscheuren kunnen groeien¹. Dit zou betekenen dat waterstof da via het landelijk waterstoftransportnet aan het regionale distributienet wordt geleverd, niet zuurstofvrij is.

5.1.2 Inlek van zuurstof bij calamiteiten en onderhoud

Inlek van zuurstof bij kleine gaslekken ligt niet voor de hand, gezien de overdruk die in het net heerst. In geval van een calamiteit zoals een leidingbreuk door graafschade of door het bezwijken van een naastgelegen waterleiding zal het betreffende leidingsegment worden afgeblazen en vervolgens gerepareerd en in gebruik worden genomen volgens vaste procedures.

5.1.3 Permeatie van zuurstof

Kunststoffen zijn permeabel voor diffusie van gassen. De mate van permeabiliteit is afhankelijk van het type kunststof en het soort gas. Van de meest toegepaste kunststoffen in de gasdistributie is LDPE (lage dichtheid polyethyleen) het meeste permeabel. Hierna volgen in aflopende mate van permeabiliteit: MDPE (middelmatig dichtheidspolyethyleen), HDPE (hoge dichtheid polyethyleen) en PVC. Om een beeld te geven, de experimenteel bepaalde diffusiesnelheid van zuurstof door PVC is 200 maal lager dan door MDPE. LDPE wordt niet tot zeer weinig toegepast. MDPE wordt toegepast in huisaansluitingen. De mate van permeatie is naast het type materiaal, afhankelijk van veel factoren waaronder het verschil in partiaalspanning van zuurstof c.q. stikstof binnen en buiten de buiswand, de dikte van de buiswand en de temperatuur. De diameter van de leiding, in feite de verhouding tussen het volume en het inwendig oppervlak, is eveneens van invloed op de concentratie van het gas dat permeëert in de leiding.

Hier wordt uitgegaan van een worst case benadering voor de berekening van de maximale opbouw aan zuurstof door permeatie. Voor deze benadering is gekozen voor een MDPE leiding van 32 mm buitendiameter en 26 mm binnendiameter bij 20 °C (de maximale temperatuur in de bodem bij 80 cm diepte die in de zomer kan voorkomen) en uitgaand van

¹ Questionnaire Hydrogen Backbone van Gasunie, oktober 2020



een partiaaldruk van 0,2 bar aan zuurstof in de bodem. Ook wordt er van uitgegaan dat de gaspermeatie bij stilstaand gas even groot is als bij stromend gas.

Een grote invloedsfactor is het aantal uren dat een gas kan stilstaan. In de zomer kan het voorkomen dat in de nachtelijke uren in het geheel geen verbruik is in een net met alleen huisaansluitingen. Het is aannemelijk dat zo nu en dan in de zomer plaatselijk een stilstand van 6 uur optreedt. Het worst case scenario gaat daarom uit van deze 6 uur stilstand. Het is verder relevant op te merken dat de snelheid waarmee de concentratie stijgt, afhangt van de verhouding tussen buisdiameter en wanddikte, de zogenoemde SDR. In leidingen met dezelfde SDR, van hetzelfde materiaal, met dezelfde gassoort en druk, zal de partiaalspanning op dezelfde wijze stijgen, ongeacht de diameter.

Er is weinig informatie over de diffusie en oplosbaarheidscoëfficiënten van MDPE bekend. Na extrapolatie van literatuurwaarden, wordt de permeatiecoëfficiënt van zuurstof bij 20 °C van MDPE berekend op $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ bar}^{-1}$. Dit is de gepermeëerde hoeveelheid gas per eenheid van tijd, lengte en drukverschil.

Voor een buisleiding kan de permeatie worden berekend met de formule:

$$Q_p = PC \times \pi \times (SDR - 1) \times L \times \Delta p$$

Waarbij:

Q_p is de permeatie in $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$

PC is de permeatiecoëfficiënt ($\text{cm}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ bar}^{-1}$)

SDR is de standard dimension ratio (buitendiameter gedeeld door de wanddikte),

L is de permeatielengte (cm)

Δp is het drukverschil in zuurstofpartiaalspanning (atm.).

Invullen van de parameters geeft een permeatie van $3,0 \cdot 10^{-4}$ ppm zuurstof per seconde. Na zes uur stilstand is 6,5 ppm zuurstof in de leiding gepermeëerd. Een soortgelijke berekening voor stikstof komt uit op gehalte van 10,4 ppm stikstof na zes uur stilstand.

Een typisch tapwaterverbruik is 10 kW, overeenkomend met ca. 3 m³/h waterstof. In twaalf seconden wordt de aansluitleiding plus gasmeter (inhoud ca 10 liter) dan ververst. Het gas in de hoofdleiding kan aanzienlijk schoner zijn als de hoofdleiding uit minder permeabel materiaal (bijvoorbeeld PVC of staal) bestaat en/of er enig substantieel (groot)verbruik op de hoofdleiding is aangesloten.

Permeatie van zuurstof door de leidingwand in de leiding geeft op basis van de huidige beschikbare data, een concentratieverhoging van zuurstof van enkele ppm's bij langdurige stilstand.

De grootste zuurstofbron die verwacht wordt in een waterstof distributienet is het zuurstof dat door GTS aan de waterstof wordt toegevoegd om scheurgroei in de gastransportnetten te voorkomen. Op basis van onderzoeken [22 en 5.1.1] mag een gehalte van 0,1 vol% verwacht worden. Het effect van zuurstofpermeatie is gering ten opzichte van dit gehalte, evenals het effect van incidentele inlek van lucht bij calamiteiten.

De limietwaarde van 0,2 mol%, die vermeld is in de PAS 4444, is op basis van deze beschouwing haalbaar. Voorgesteld wordt om de limietwaarde op 0,2 mol% zuurstof voor de entry-specificatie alvast te stellen en op 0,5 mol% voor de exit-specificatie. De exitspecificatie sluit hiermee aan op de huidige MR aardgas.

5.2 Waterpermeatie in gasdistributienetten

In deze paragraaf worden drie oorzaken besproken die kunnen leiden tot verhoging van het vochtgehalte van het gas en daarmee een verhoging van het waterdauwpunt [28-31].



5.2.1 Vochtige lage druk distributientten

Voor aardgasdistributieleidingen geldt de eis dat bij aflevering het waterdauwpunt gelijk of lager is dan -10 °C bij 8 bar(a). Er geldt echter een uitzondering voor netten met een overdruk van 200 mbar of lager. Bepaalde constructies zoals schuifmoffen voor lage druk PVC-netten, zijn gevoelig voor waterinlek. Veder bestaat een deel van de netten uit leidingmaterialen waarbij de eis voor het waterdauwpunt niet in alle gevallen gehaald kan worden. Het betreft hier voornamelijk grijs gietijzeren- en asbest cementleidingen. Deze materialen worden uitgefaseerd en zullen in 2032 volledig zijn verdwenen. Anno 2019 ligt er nog 3038 km aan grijs gietijzeren hoofdleidingen (2,4% van het geheel aan hoofdleidingen) en 794 km asbest cementhoofdleidingen (0,6% van het totaal) in de bodem. Voor deze netten moet in extreme gevallen rekening gehouden worden met een mogelijk waterdauwpunt van 10 °C (volledig verzadigd bij de bodemtemperatuur). Dit komt overeen met een vochtgehalte van 9,6 gram per m^{3,n} ofwel 1,1 vol% water. Het effect van deze hoeveelheid waterdamp op de Wobbe-index is anders voor waterstof dan voor aardgas. Waterstofgas is veel lichter dan aardgas en de hoeveelheid waterdamp heeft daarom een ongeveer vijfmaal zo grote invloed op de Wobbe-index (zie bijlage C).

5.2.2 Permeatie van water

Voor kunststofmaterialen is de permeatie van water door de wand mogelijk. De permeatie is, in tegenstelling tot de permeatie van gassen, blijkt niet zozeer afhankelijk van de partiële spanning van waterdamp, maar wel van het type materiaal en de temperatuur.

De permeatie wordt berekend met de formule:

$$Q = PC * (\pi * (SDR - 1) * L) / 1000$$

Waarbij:

Q = permeatie per tijdseenheid (g/dag)

PC = permeatiecoëfficiënt in (g*mm)/(m²*dag);

SDR = SDR ratio (dimensieloos)

L = lengte van de buis (m)

Er zijn drie gevallen doorgerekend voor realistische leidingconfiguraties. Hierbij is uitgegaan van een worst case benadering: leidingen die onder het grondwaterpeil liggen bij 20 °C en waarbij 24 uur geen gasroom is ten gevolge van onderhoudswerkzaamheden. Berekend is wat de stijging is van het waterdauwpunt, uitgaande van 100 meter leiding met waterstof met een waterdauwpunt van -10 °C bij 8 bar(a).

Tabel 5.1: effect van permeatie van water door een leidingwand bij 20 °C van een waterstofleiding met een initieel waterdauwpunt van het gas van -10 °C bij 8 bar(o).

Materiaal	Gasdruk (bar(o))	SDR	Diameter (mm)	PC	gram water/m ^{3,n} waterstof	waterdauwpunt bedrijfsdruk voor permeatie (°C)	waterdauwpunt bedrijfsdruk na permeatie (°C)	Waterdauwpunt, 8 bar(o)
PVC	0,1	41	250	0,451	1,0496	-33,9	-15,9 °C	12,4
HDPE	4	11	110	0,0148	0,0122	-17,2	-17,1 °C	-9,9
LDPE	0,1	11	110	0,112	0,3365	-33,9	-25,1 °C	1,0

Op basis van deze berekeningen kan gesteld worden dat het effect van permeatie van waterdamp door kunststof gasleidingen niet verwaarloosbaar is, gezien de stijging van het waterdauwpunt. Het effect kan significant zijn wanneer de gasflow gedurende lange tijd (dagen) wordt onderbroken.

Het effect is in het algemeen veel kleiner dan dat bij vochtige gasdistributienetten kan voorkomen, waarbij tot 9 g/m³⁽ⁿ⁾ waterdamp kan voorkomen (zie 5.2.1, boven).

¹ In een 30 mbar(o) net



De distributie van waterstof in gasdistributienetten zal niet leiden tot meer inlek en permeatie van water dan in het geval van aardgasdistributie in dezelfde gasnetten. Wel is het effect op de Wobbe-index in het geval van waterstofdistributie een factor vijf groter dan in het geval van aardgasdistributie. Permeatie van water in een vochtige ondergrond heeft een geringere invloed dan inlek en zal incidenteel optreden wanneer langdurige stilstand van gas (24 uur of langer) voorkomt.

5.3 Effecten van odorantresten in aardgasdistributienetten

De opname van odorant aan nieuwe gastransport- of gasdistributieleidingen, is een bekend fenomeen. Dit wordt “odor fading” genoemd. Het is belangrijk om bij het in gebruik nemen van een nieuwe leidingsectie, hier rekening mee te houden.

Voor stalen leidingen is het effect van odor fading sterker dan voor kunststofleidingen. In het geval van odoranten op basis van mercaptanen, zoals TBM, is het mogelijk dat deze reageert met ijzeroxide tot ijzersulfide waarbij een zogenaamde patina laag ontstaat. THT, het odorant dat in Nederland wordt toegepast voor aardgas, is minder gevoelig voor reactie met de pijpleidingmateriaal.

Desorptie van odorant kan een probleem zijn indien besloten wordt om waterstof in het distributienet niet te odoriseren of indien een ander odorant wordt toegepast. Farnood et al. [34] beschrijven dat TBM via chemisorptie aan ijzeroxide is gebonden. Onder laboratoriumcondities toonden zij aan dat 5,2 mg TBM per gram ijzeroxide kan worden gebonden. Het TBM kan gedesorbeerd worden. Tijdens hun experiment werd 1,5 mg TBM per gram ijzeroxide gedesorbeerd in een methaanstroom gedurende een desorptietijd die driemaal zo lang was als de adsorptietijd. Hierna is de proef afgebroken en is het dus niet duidelijk of volledige desorptie optreedt.

Gaz de France heeft experimenten uitgevoerd aan twee nieuw in gebruik te nemen stalen transportleidingen met het odorant THT [32]. Uit deze experimenten kwam naar voren dat de nieuwe stalen leidingen 0,6 gram THT per m² leidingwand opnemen. In de regel wordt bij ingebruikname van een leiding, de leiding met een hoge concentratie aan odorant behandeld bij het op druk brengen van de leiding. Als deze voorbehandeling niet wordt gedaan, wordt een grote hoeveelheid van het getransporteerde gas niet voldoende geodoriseerd. In het geval van een 35 km lange 65 bar transportleiding met een diameter van 300 mm is berekend dat in dat geval 800.0000 Nm³ gas ondergeodoriseerd zou zijn bij het ingebreke blijven van een voorbehandeling. Dit is vijfmaal het aantal bedrijfskuubs in de gasleiding.

Er zijn geen publicaties bekend van de desorptie van THT van stalen leidingen. Verwacht mag worden dat desorptie langzamer plaatsvindt dan adsorptie vanwege de enthalpie.

Over adsorptie van THT aan kunststof is weinig bekend. Volgens Plastic Pipes [33] is odor fading geen issue bij kunststoffen omdat deze inert zijn voor adsorptie. In geval men besluit om een leiding met odorant te behandelen om odor fading uit te sluiten, moet voor kunststoffen geen vloeibaar odorant worden toegevoegd omdat dit tot zwellen van het polymeer kan leiden.

Bij het omzetten van een aardgas distributieleiding naar waterstofdistributie, is het mogelijk dat gedurende enige tijd, geadsorbeerd odorant van de wand kan vrijkomen. Voor kunststofleidingen wordt verwacht dat dit effect gering is.

Er zijn geen onderzoeken bekend waarin het effect van het desorberen (‘loslaten’) van odorant van de wand in gasdistributienetten is beschreven. Op grond van de beschikbare literatuur lijkt het effect groter voor stalen leidingen omdat deze meer THT kunnen adsorberen dan kunststofleidingen. Het desorptie-effect zal steeds geringer worden, naarmate meer ongeodoriseerd gas door de leiding is geleid. Als blijkt dat het effect groot is, is het spoelen van de leiding voor ingebruikname een optie. Op basis van de experimenten van het toenmalige Gaz de France aan stalen gastransportleidingen waarbij een hoeveelheid van 600 mg THT per m² is geadsorbeerd, wordt verwacht dat de concentratie van gedesorbeerd THT nooit hoger zal zijn dan 1 mg/m³.



5.4 Vloeistof en condensaat in gasdistributienetten

Bij de winning van aardgas wordt vloeistof ofwel aardgascondensaat meegevoerd vanuit de gashoudende lagen. Aardgascondensaat bestaat uit een mengsel van hogere koolwaterstoffen waaronder ca. 93% lichte en zware oliën en ca. 7% benzeen, toluen en xyleen.

Dit aardgascondensaat wordt in de gasbehandelingsinstallaties zoveel mogelijk afgescheiden van het aardgas. Desondanks worden sporadisch kleine hoeveelheden soms aangetroffen in het gasdistributiesysteem van de gasbedrijven, met name in de gasdrukregelinstallaties, maar soms ook in leidinggedeelten, b.v. zinkers.

Naast aardgascondensaat zijn er andere mogelijke bronnen namelijk [35]:

1. olie uit compressoren of gasexpanders;
2. di-ethyleenglycol (DEG). De omschakeling van het water bevattende stadsgas op het "kurkdroge" aardgas rond 1963 had tot gevolg dat de hennep in zogenaamde lood-striktouwverbindingen in gietijzeren leidingen uitdroogde. Hierdoor ontstonden lekkages bij verbindingen. Als "remedie" werd DEG in de leiding gebracht om de hennep daarmee te verzadigen, waardoor dat ging zwellen en de lekkages weer werden gedicht. Dit werkte ook wel, maar soms werd te veel DEG in de leidingen gebracht;
3. esters, die lijken op plantaardige olies, zoals raapolie, lijnolie, zonnebloemolie e.d. Deze esters worden al meer dan vijftien jaren steeds opnieuw aangetroffen, maar de herkomst ervan is desondanks niet bekend. Esters komen vaak voor als component in vloeistofvondsten;
4. siliconen;
5. water, door een inwaterend lek;
6. corrosie-inhibitoren (bij metalen gasnetten);
7. uiteenlopende vloeistoffen van onbekende oorsprong;

Als er eenmaal vloeistof in het net aanwezig is, kan dat meer vloeistof aantrekken, door condensatie van dampen vanuit het gas.

Elk jaar worden enkele (nul tot tien) vloeistofvondsten in gasdistributienetten voor analyse aangeboden [36].

Vloeistof en condensaatvondsten in het gasdistributienet vinden zeer incidenteel plaats. De vondst van aardgascondensaat kan bij waterstof distributie worden uitgesloten. Gezien het geringe aantal geregistreerde vloeistofvondsten in het aardgasdistributienet hoeft hier geen rekening mee gehouden te worden.

5.5 De temperatuur van het gas in distributienetten

Bij compressie en reductie van gassen speelt het Joule-Thomson effect een rol in de temperatuurverandering van het gas. Bij drukreductie bij aardgas zal de temperatuur van het gas na drukreductie dalen met ongeveer 0,5°C/bar drukdaling. Dit betekent voor een gasontvangstation dat de bij een drukdaling van 40 naar 8 bar de temperatuur van het gas met 16°C dalen. Op gasontvangstations wordt het gas veelal verwarmd na drukreductie. Bij waterstof stijgt de temperatuur bij drukreductie met ongeveer 0,035 °C /bar drukdaling. Ofwel bij drukdaling van waterstof van 40 naar 8 bar zal de temperatuur met 1,1 °C stijgen. Op gasontvangstations is hierdoor geen verwarming meer nodig van het gas.

De huidige MR gaskwaliteit voor aardgasdistributienetten heeft een entrispec van minimaal 5 tot maximaal 20 °C. De huidige exitspec is minimaal 0 °C en maximaal 35 °C. Er is geen reden om deze waarden aan te passen.



6 Specificaties voor entry- en exitpunten

Kiwa en DNV GL hebben op basis van onderzoek en de beschikbare informatie een set van specificaties voor entry- en exitpunten in het gasdistributienet opgesteld. Gebleken is dat er, ten tijde van het schrijven van dit rapport, nog te weinig zicht was op de mogelijke-, toekomstige ontwikkeling van turbines op waterstof. Tevens is gebleken dat de stakeholders verwachten dat brandstofcellen zullen worden aangesloten op een zogenaamde dedicated waterstofleiding of te allen tijde additionele reiniging zullen hebben. Verder is geconstateerd dat bij gebruik van gasmotoren in kassen de afwezigheid van CO₂ in de uitlaat van waterstof-gedreven motoren in eerst instantie een grotere horde is voor het vervangen van aardgas door waterstof dan het hebben van een specificatie. Om deze redenen zijn de navolgend voorgestelde specificaties dan ook alleen geldig voor verbrandingsapparatuur, die warmteproductie als doel heeft (Cv-ketels, warmwaterketels, kooktoestellen en (in)directe verhitting in industriële toepassingen).

Het is bekend dat in een beperkt deel van het lagedruk distributienet waterinlek kan optreden. Water heeft een significante invloed op de Wobbe. Om te grote variaties in de Wobbe te voorkomen wordt geadviseerd om dergelijke delen van het distributienet niet in te zetten voor de distributie van waterstof.

De kwaliteitsaspecten voor de invoeding op een aansluiting en de aflevering op een aansluiting zijn gebaseerd op de eisen die nu gelden voor de Ministeriële Regeling Gaskwaliteit (MR).

Er is gekozen voor een minimale waterstofkwaliteit van 98 mol%, met een limitering op de absolute variatie in de Wobbe-index van 4 MJ/m³(n). Door het inperken van de Wobbeband wordt voorkomen dat er op enigerlei dient te worden gecompenseerd voor het verlies aan doelmatigheid, zoals bijvoorbeeld het toepassen van toestellen met een hogere capaciteit. Tevens sluit het voorstel -voor wat betreft deze gaskwaliteitsaspecten- hiermee aan bij de PAS4444, die naar verwachting in vele Europese landen zal worden overgenomen en voorkomt dat er specifieke toestellen voor de Nederlandse markt dienen te moeten worden ontwikkeld. Tevens laat deze specificatie -althoewel niet gewenst- enige ruimte over voor beperkte waterinlek in lagedruk distributienetten.

De in de MR gespecificeerde Wobbe-index is gebaseerd op uurgemiddelde waarden, waarbij ruimte wordt geboden voor onder – en overschrijdingen van deze waarden ten gevolge van de regelonnauwkeurigheid. Tevens zijn voor aardgas en groengas de absolute grenswaarden gespecificeerd op 0,5 MJ/m³(n) onder de onderste (uurgemiddelde) Wobbe-grenswaarde en 0,5 MJ/m³(n) boven de bovenste (uurgemiddelde) Wobbe-grenswaarde. Er wordt aanbevolen om voor waterstof dezelfde methodiek aan te houden. Hierbij dient de worden opgemerkt dat er alleen aan de onderzijde regelruimte hoeft te worden geboden, omdat de bovengrens (Wobbe bij 100% waterstof) nooit kan worden overschreden. Hieruit volgt een Wobbe-variantie op uurgemiddelde waarde van 3,5 MJ/m³(n), met een absolute ondergrens van 44,35 MJ/m³(n).

Voor de overige sporencomponenten wordt voorgesteld om de in de MR gespecificeerde grenswaarden te hanteren. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een groot aantal van deze componenten wel in aardgas of groengas voorkomen, maar niet in waterstof. Afhankelijk van de bron en de productiewijze, is het mogelijk dat waterstof andere sporencomponenten bevat, die niet in de MR zijn gespecificeerd. Omdat er nu nog geen zicht is op de impact van deze componenten op het distributienet en/of gastoeestellen, wordt vooralsnog uitgegaan van een disclaimer waarin de aanwezigheid van gasvormige verbindingen die schadelijk zijn voor de distributie en de toepassing van waterstof, wordt uitgesloten.



Tabel 6.1: Specificaties waterstof bij invoeding op een aansluiting

Component/fysische eigenschap	Grenswaarde		Eenheid
	Waterstof	MR aardgas	
Wobbe-index	44,85-48,35 ^{A,B)}	43,46-44,41 ^{A,H,I)}	MJ/m ³ (n)
Hogere koolwaterstoffen	^{C)}	≤ 5	mol% propaanequivalent
Gascondensaat	≤ 80	≤ 80	mg/m ³ (n) bij -3 °C
Waterdauwpunt	≤ -10	≤ -10	°C (8 bar(a))
Temperatuur	5-20 ^{D)}	5-20 ^{D)}	°C
Zuurstof	≤ 0,2	≤ 0,5	mol%
Kooldioxide	^{C)}	≤ 10,3 ^{J)}	mol%
Waterstof	≥ 98	≤ 0,5	mol%
Chloor op basis van organochloorverbindingen	^{E)}	≤ 5	mg Cl/m ³ (n)
Fluor op basis van organofluorverbindingen	^{E)}	≤ 5	mg F/m ³ (n)
Koolmonoxide	≤ 2900 ^{K)}	≤ 2900	mg/m ³ (n)
Pathogene microben	^{E)}	≤ 500	Aantal/m ³ (n)
Stof (> 5 µm)	≤ 100	≤ 100	mg/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van anorganisch gebonden zwavel	≤ 5	≤ 5	mg S/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van alkylthiolen	≤ 6	≤ 6	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) piekwaarde	≤ 20	≤ 20	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) jaargemiddelde	≤ 5,5	≤ 5,5	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) piekwaarde	^{F)}	≤ 31	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) jaargemiddelde	^{F)}	≤ 16,5	mg S/m ³ (n)
THT-gehalte	^{F)}	10-40	mg THT/m ³ (n)
Siliciumverbindingen	^{E)}	≤ 0,1	mg Si/m ³ (n)
Niet gespecificeerde componenten	^{G)}		

- A. De Wobbe-index van het in te voeden 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 onderschrijding (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 onderschrijding 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.
- C. De maximale concentratie wordt begrensd door de Wobbe-index
- D. Een andere invoedtemperatuur wordt geaccepteerd indien de invoeder aantoont dat de gebruikte materialen in de leidingen tegen de afwijkende temperatuur bestand is en het gas in de aansluitleiding van de invoeder zal opwarmen of afkoelen zodat het gas bij de afsluiter van het aansluitpunt met het net van de netbeheerder een temperatuur tussen de 5 en 20 °C heeft bereikt. Dit kan berekend worden met de methode uit het KIWA-rapport 'Eisen aan Groen Gas invoedtemperatuur' van 2 augustus 2012.
- E. Deze parameter komt niet voor in waterstof en is derhalve niet gespecificeerd
- F. Valt buiten de scope van deze studie
- G. De waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoeppassing kan aantasten



- H. De waarden voor de Wobbe-index dienen altijd boven de absolute ondergrens van $42,96 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ en onder de absolute bovengrens van $44,91 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$ te zijn onafhankelijk van de meetfrequentie. Deze absolute grenzen gelden voor gassen die voor ten minste 99 mol% bestaan uit CH_4 , CO_2 , N_2 en O_2 .
- I. Overschrijdingen (een waarde boven de bovengrens) zijn toegestaan als zij binnen een verdeling rond de grenswaarde liggen met een standaarddeviatie van maximaal $0,1 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$.
- J. De volgende restrictie geldt voor het gehalte CO_2 voor gassen die voor ten minste 99 mol% bestaan uit CH_4 , CO_2 , N_2 en O_2 en voor meer dan 6 mol% uit CO_2 bestaan. CO_2 -gehalte is maximaal het minimum van $10,32 - 0,72 \cdot \text{N}_2\text{-gehalte} - 0,87 \cdot \text{O}_2\text{-gehalte}$, en $10,56 - 0,746 \cdot \text{N}_2\text{-gehalte} - 1,01 \cdot \text{O}_2\text{-gehalte}$, waarin de gehalten zijn uitgedrukt in mol%. In RTL-leidingen die op grenspunten uitkomen mag gas maximaal 3% CO_2 bevatten. Bij invoeding op aansluitingen waarvan het gas wordt gedistribueerd via gedeelten van het RNB-net waar grondwater in het gas terechtkomt, mag gas maximaal 3% CO_2 bevatten.
- K. De achtuurlijkse tijdgewogen gemiddelde grenswaarde (TTG 8 uur) voor CO is op 21 augustus 2018, verlaagd van 29 naar $23 \text{ mg/m}^3(\text{n})$, Uitgaande van een ruikbaarheid van gas bij 20% LEL (komt overeen met circa 1% gas in lucht) betekent dit een grenswaarde van $2300 \text{ mg/m}^3(\text{n})$ voor het distributiegas in geval een werknemer of aangeslotene gedurende 8 uur blootgesteld zou zijn aan een gaslek dat net niet ruikbaar is. Geadviseerd wordt om de grenswaarde aan te passen.



Tabel 6.2: Specificaties waterstof bij aflevering op een aansluiting

Component/fysische eigenschap	Grenswaarde		Eenheid
	Waterstof	MR aardgas	
Wobbe-index	44,85-48,35 ^{A)}	43,46-44,41 ^{F)}	MJ/m ³ (n)
Hogere koolwaterstoffen	^{B)}	≤ 5	mol% propaanequivalent
Gascondensaat	≤ 80	≤ 80 ^{G)}	mg/m ³ (n) bij -3°C
Waterdauwpunt	≤ -10 ^{H)}	≤ -10 ^{H)}	°C (8 bar(a))
Temperatuur	0-35	0-35	°C
Zuurstof	≤ 0,5	≤ 0,5	mol%
Kooldioxide	^{B)}	≤ 10,3 ^{I)}	mol%
Waterstof	≥ 98	≤ 0,5	mol%
Chloor op basis van organochloorverbindingen	^{C)}	≤ 5	mg Cl/m ³ (n)
Fluor op basis van organofluorverbindingen	^{C)}	≤ 5	mg F/m ³ (n)
Koolmonoxide	≤ 2900 ^{J)}	≤ 2900	mg/m ³ (n)
Pathogene microben	^{C)}	≤ 500	Aantal/m ³ (n)
Stof (> 5 μm)	≤ 100	≤ 100	mg/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van anorganisch gebonden zwavel	≤ 5	≤ 5	mg S/m ³ (n)
Zwavelgehalte op basis van alkylthiolen	≤ 6	≤ 6	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) piekwaarde	≤ 20	≤ 20	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (voor odorisatie) jaargemiddelde	≤ 5,5	≤ 5,5	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) piekwaarde	^{D)}	≤ 31	mg S/m ³ (n)
Totaal zwavel (na odorisatie) jaargemiddelde	^{D)}	≤ 16,5	mg S/m ³ (n)
THT-gehalte	^{D)}	10-40	mg THT/m ³ (n)
Siliciumverbindingen	^{C)}	≤ 0,1	mg Si/m ³ (n)
Niet gespecificeerde componenten	^{E)}		

- A. De Wobbe-index mag afwijken op basis van de toegestane variaties in de invoeding, zoals opgenomen in de voetnoten A en B bij tabel 6.1.
- B. De maximale concentratie wordt begrensd door de Wobbe-index
- C. Deze parameter komt niet voor in waterstof en is derhalve niet gespecificeerd
- D. Valt buiten de scope van deze studie
- E. De waterstof mag geen vaste deeltjes, vloeistoffen of gasvormige componenten bevatten, die de integriteit van het gasnet of van de gastoevoering kan aantasten
- F. De Wobbe-index mag afwijken op basis van de toegestane variaties in de invoeding als opgenomen in voetnoten 1 en 2 bij bijlage 2 van de MR.
- G. Voor zover de netbeheerder de aansluiting beheert.
- H. Met uitzondering van netten met een druk lager dan of gelijk aan 200 mbar(o).
- I. De volgende restrictie geldt voor het gehalte CO₂ als het gas voor ten minste 99 mol% bestaat uit CH₄, CO₂, N₂ en O₂ en voor meer dan 6 mol% uit CO₂ bestaan. CO₂-gehalte is maximaal het minimum van 10,32 – 0,72*N₂-gehalte – 0,87*O₂-gehalte, en 10,56 – 0,746*N₂-gehalte – 1,01*O₂-gehalte, waarin de gehalten zijn uitgedrukt in mol%
- J. De achtuurlijkse tijdgewogen gemiddelde grenswaarde (TTG 8 uur) voor CO is op 21 augustus 2018, verlaagd van 29 naar 23 mg/m³(n). Uitgaande van een ruikbaarheid van gas bij 20% LEL (1% gas in lucht) betekent dit een grenswaarde van 2300 mg/m³(n) voor het distributiegas in geval een werknemer of aangeslotene gedurende 8 uur blootgesteld zou zijn aan een gaslek dat net niet ruikbaar is. Geadviseerd wordt om de grenswaarde aan te passen.



7 Afkortingen en begrippenlijst

7.1 Afkortingen

AEL	Alkaline electrolyse, productiewijze van waterstof
ATR	Autotherme Reforming, productiewijze van waterstof
BSI	British Standards Institution
CCS	Carbon Capture Storage, opslag van CO ₂
CBP	Common Business Practice, een protocol dat gebruikt wordt om afspraken of procedures vast te leggen
CNG	Compressed Natural Gas, aardgas op hoge druk (350 tot 700 bar) voor mobiele toepassingen
DEG	Diethyleenglycol, chemische verbinding die gebruikt is om hennepouwverbindingen in gietijzeren leidingen tegen uitdrogen te beschermen
DLN	Dry Low NO _x , techniek die wordt toegepast voor gasturbines om een lage NO _x uitstoot te behalen
DVGW	Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches, Duitse brancheorganisatie
EASEE gas	Europese associatie, die de gastransfer en handel wil stroomlijnen
EN	Europese Normen
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
GOS	Gasontvangstation
GTS	Gasunie Transport Services B.V. eigenaar en beheerder van het landelijk gastransportnet in Nederland.
HD	Hoge drukgedeelte van het distributienet
HDPE	High density polyethyleen
IEA	International Energy Agency, associatie gericht op een betrouwbare en duurzame energievoorziening
ISO	International Organization for Standardization
KIT	Karlsruher Institut für Technologie, Duitse technische universiteit
LD	Lage drukgedeelte van het distributienet
LDPE	Low density polyethyleen



LEL	Lower Explosion Limit, onderste explosiegrens van een gasmengsel in lucht
LNB	Landelijke netbeheerder
LNG	Liquid Natural Gas, vloeibaar aardgas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell. Brandstofcel die op 600 °C of hoger werkt
MDPE	Medium density polyethylene
OEM	Original Equipment Manufacturer
OGÉ	Open Grid Europe, netbeheerder Duits transportnet
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell, brandstofcel die op ca 150 tot 210 °C werkt
PAS	Publicly Available Standard, document met de structuur van een norm, bedoeld om het normeringsproces te versnellen
PC	Permeatiecoëfficiënt
PEM FC	Proton Exchange Membrane brandstofcel die werkt met een polymeerelektrolyt op 80 á 90 °C
POx	Partiele oxidatie, thermisch proces om met een ondermaat aan zuurstof, waterstof te produceren uit koolwaterstoffen
PSA	Pressure Swing Adsorption, scheidingstechniek voor gassen
PVC	Polyvinylchloride, polymeer onder andere toegepast als leidingmateriaal voor gasdistributie
RNB	Regionale netbeheerder
SCR	Selective Catalytic Reduction, techniek om NOx uitstoot te verlagen met behulp van ureuminjectie
SDR	Standard Dimension ratio, buitendiameter van een buis gedeeld door de wanddikte
SMR	Steam Methane Reforming, productiewijze van waterstof
Sodm	Staatstoezicht op de mijnen
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, brandstofcel met een werkingsgebied tussen 800 en 1100 °C
TBM	Tertiar Butyl Thiol, geurstof voor aardgas
THT	Tetra Hydro Thiopheen, geurstof voor aardgas
TTG	Tijdgewogen gemiddelde, grenswaarde over een tijdsperiode die wordt toegepast om de toegestane blootstelling aan stoffen in een omgeving vast te leggen



TSA	Temperature Swing adsorption, techniek om water uit een productstroom te verwijderen
WGS	Watergas shift reactie, omzetting van koolmonoxide naar kooldioxide

7.2 Begrippen

Entrypunt	Punt waarbij gas het gasnet binnenkomt
Exitpunt	Punt waarbij gas het gasnet verlaat
Feedstock	Grondstof
G-gas	Aardgas met als Wobbe-grenzen 43,46 MJ/m ³ respectievelijk 44,41 MJ/m ³ onder normaalcondities en gebaseerd op calorische bovenwaarde
Joule-Thomson effect	De verandering in temperatuur die gepaard gaat met de expansie van een gas, waarbij geen warmte-uitwisseling met de omgeving plaatsvindt
Mol	eenheid voor hoeveelheid stof
MR gaskwaliteit	Regeling van de Minister van Economische Zaken van 11 juli 2014, nr. WJZ/13196684, tot vaststelling van regels voor de gaskwaliteit (Regeling Gaskwaliteit) geldend vanaf 1-1-2019
Propaanequivalent	Het propaanequivalent is een maat voor de aanwezige hogere koolwaterstoffen. De hogere koolwaterstoffen ethaan, propaan, butaan en pentaan worden daartoe met een zekere weging omgerekend naar een quasi propaangehalte. De weging is voor ethaan 0,5, propaan 1, butaan 1,5, pentaan 2.
Syngas	Syngas of synthesegas is een geproduceerd gasmengsel van koolstofmonoxide en waterstofgas verkregen uit vergassing van fossiele brandstoffen of biomassa
Wobbe-index	Het quotiënt van de calorische waarde van een gas en de wortel uit de relatieve dichtheid van dat gas. De Wobbe-index is een maat voor de hoeveelheid energie die aan een toestel wordt toegevoerd



8 Literatuurbronnen

1. ISO 6976:2016, Natural gas — Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition
2. ISO 14687:2019, Hydrogen fuel quality — Product specification
3. Publically Available Standard, PAS 4444:2020, Hydrogen-fired gas appliances – Guide (30 april 2020) onder licentie van BSI, The British Standards Institution
4. 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)
5. Common business practices (CBP). Dit kunnen normen, procedures of communicatieprotocollen zijn. Zo heeft EASEE gas een CBP voor de harmonisering van de aardgaskwaliteit opgesteld. Momenteel is de werkgroep EASEE gas bezig met een CBP 'Hydrogen in natural gas infrastructure' .
6. H₂ im Netz is een project van de Duitse branche-organisatie DVGW. De uitvoerende partijen zijn DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) en Open Grid Europe (OGE).
7. HYPOS - hydrogen power storage & solutions East Germany
8. <https://www.dnvgl.nl/news/filling-the-data-gap-an-update-of-the-2019-hydrogen-supply-in-the-netherlands-162721>
9. Foster Wheeler, IEAGHG Technical review (part 1): current state-of-the-art technologies for hydrogen production (2017)
10. T. Bacquart et al., "Probability of occurrence of ISO 14687-2 contaminants in hydrogen: Principles and examples from steam methane reforming and electrolysis (water and chlor-alkali) production processes model," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 26, pp. 11872–11883 (2018)
11. IEA, Hydrogen production costs by production source, 2018, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>
12. S. Gersen et al., Domestic hydrogen boilers in practice: enabling the use of hydrogen in the built environment, IGRC 2020
13. <https://www.wartsila.com/media/news/05-05-2020-wartsila-gas-engines-to-burn-100-hydrogen-2700995>
14. <https://www.deutz.com/en/media/press-releases/deutz-prepares-the-way-for-carbon-neutral-mobility-with-hydrogen-drive-systems/>
15. <https://www.keyou.de/pressemitteilung-bundesregierung-startet-deutschlandweite-innovationskampagne-mit-wasserstofftechnologie-des-muenchner-clean-mobility-start-ups-keyou/?lang=en>
16. <https://www.abc-engines.com/en/news/behydro-hydrogen-dual-fual-engine-launched-in-ghent>
17. J. Adolf et al., Shell hydrogen study, Shell and Wuppertal Institut, Hamburg (2017)
18. Hydrogen power with Siemens gas turbines, white paper, Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG (2020)
19. ETN Global, Hydrogen Gas Turbines (7 juli 2020), <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>
20. EUTurbines, Gas Turbines: Driving the transition to renewable-gas power generation, 2019, <https://powertheeu.eu/>
21. C. S. Marchi et al., Technical Reference on Hydrogen Compatability of Materials, Plain Carbon Ferritic Steels, Sandia National Laboratories, Livermore (2007)
22. Preparing for the hydrogen economy by using the existing natrual gas system as a catalyst, NATURALHY (2010)
23. S. Michaels and H. J. Bixler, Flow of gases through polyethylene, *Journal of Polymer Science*, vol. 50, no. 154, pp. 413–439 (1961)
24. Solubility of Gases in Polyethylene, *Journal of Polymer Science*, vol. L, pp. 393–412 (1961)



25. R.J.M. Herrmkes et al., Modern PE pipes enables the transport of hydrogen, Proceedings of the 19th Plastic Pipes Conference PPXIX, (september 24-26, 2018)
26. E.J.W. van der Stok et al., Cover blow-off resistance of reinforced thermoplastic pipes for gas service, Plastic Pipes XV Conference – Vancouver, BC Canada (September 20-22, 2010)
27. Tessa Hillen, T.U. Delft, The gas quality in a hydrogen distribution grid: Computation of the influences of distribution through the existing grid on the hydrogen quality (juli 2020). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e496000f-2748-4451-9397-02cc29ebaa66>
28. Paul E. Keller et al., Water Vapor Permeation in Plastics, U.S. Department of Energy Contract DE-AC05-76RL01830 (January 2017)
29. Bhada P., How Weld Hose Materials Affect Shielding Gas Quality, Welding Journal, pp. 35-40 (July 1999).
30. R.J.M. Hermkens et al., Modern PE pipes enables the transport of hydrogen, Proceedings of the 19th Plastic Pipes Conference PPXIX, (September 24-26 2018)
31. Vaisala humiditycalculator 5.0 dewpointcalculator
32. Marie de Renty et al., Uncoated steel pipes commissioning:GDF SUEZ experience with THT (ICRC 2008)
33. The Plastics Pipe Institute, Inc. Odorants In Plastic, Fuel Gas Distribution Systems, TN-4/2015
34. Ramin Farnood et al., The origins of odor fading, Natural gas global (2015, June 24th)
35. C. Lock, Veilig werken met aardgascondensaat, Gasnet (december 1993)
36. Kiwa Technology, Jaarrapportages aardgaskwaliteit 2010 t/m 2017
37. B. M. Besancon et al., Hydrogen quality from decarbonized fossil fuels to fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 2350–2360 (2009)
38. <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/membrane-technology>
39. F. Gallucci et al., Recent advances on membranes and membrane reactors for hydrogen production, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 92, pp. 40–66 (2013)
40. Air Products and Chemicals, PRISM® Membrane Systems For Oil Refinery Applications Brochure. <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/products/supply-options/prism-membrane/en-prism-process-gas-brochure.pdf?la=en>. [Accessed: 17-Dec-2018].
41. Air Liquide, Hydrogen Membrane Overview (2016). https://www.airliquideadvancedseparations.com/sites/medal/files/2016/11/28/alas_h2_brochure.pdf. [Accessed: 21-Dec-2018].
42. Grashoff et al., Platinum Metals Rev (1983)
43. Rabiei, Hydrogen Management in Refineries
44. Schorer et al., “Membrane based purification of hydrogen system (MEMPHYS)”, *Int. Journal of Hydrogen Energy* (2019)
45. Air Products, Recovering Hydrogen — and Profits — from Hydrogen-Rich Offgas (2018)
46. <https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-case-studies.html>
47. Melaina et al., Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL Technical Report (2013)
48. Mores et al., Membrane-Based Processes: Optimization of Hydrogen Separation by Minimization of Power, Membrane Area, and Cost, Processes (2018)
49. Webinar Hydrogen Infrastructure, 1 oktober 2020, presentatie beschikbaar op de website van Gasunie
50. S. Gersen et al., Domestic hydrogen boilers in practice: enabling the use of hydrogen in the built environment (IGRC 2020).



BIJLAGE A: Reinigingstechnieken

In deze bijlage wordt nader ingegaan op de technische aspecten van de reinigingstechnieken, die momenteel worden toegepast om de waterstof op de door de afnemer gewenste kwaliteit af te leveren.

Grofweg zijn er twee plaatsen in het gassysteem aan te wijzen, waar de zuivering optimaal kan worden toegepast:

- direct na de productie, zodat het kan voldoen aan de specificaties die gelden in achterliggende gassysteem. Het voordeel hiervan is dat de waterstofhoudende gascompositie veelal op hoge druk zal worden aangeboden en dat het gasdebiet hoog is, waardoor door synergievoordelen, de kosten relatief laag kunnen worden gehouden. Tevens zijn er -met name bij de chemische productieprocessen- mogelijkheden om de uit het waterstof verwijderde componenten als brandstof te gebruiken voor warmteproductie, waardoor de energieverliezen en emissies naar de buitenlucht kunnen worden beperkt;
- ter plaatse van eindverbruikers die zuiverder waterstof nodig hebben dan vanuit het distributienet kan worden geleverd. Zoals boven is gememoreerd vereisen met name brandstofcellen een hoge graad van zuiverheid. In die situaties dat niet kan worden gegarandeerd dat deze zuiverheid ook ter plaatse kan worden geleverd, dient voor de brandstofcel een zuivering te worden geplaatst teneinde de brandstofcel niet te beschadigen. Voordeel is dat de te realiseren reiniging kan worden afgestemd op het aangesloten toestel. Nadeel is echter dat de druk ter plaatse laag is en dat kosten (per m³), zeker als het gas ook nog dient te worden gecompriëerd om te kunnen reinigen, relatief hoog zullen zijn.

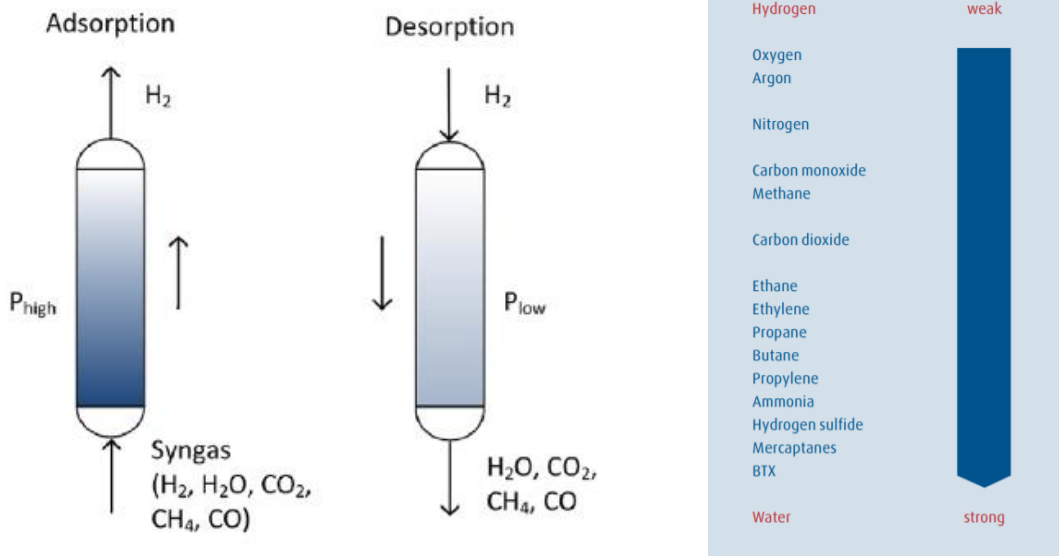
In de literatuur worden diverse technologieën voor het zuiveren van waterstof genoemd. Een groot aantal van deze technologieën zijn ten tijde van het schrijven van onderhavig rapport echter nog in ontwikkeling en nog niet aantoonbaar inzetbaar voor continue toepassing voor kleinere capaciteiten. In de navolgende paragrafen worden de reinigingstechnieken, die momenteel het meest worden gebruikt nader toegelicht.

De optimale plaats en –technologiekeuze wordt nagenoeg geheel bepaald door de kosten. De economische aspecten worden behandeld in bijlage B.

A.1. Pressure Swing Adsorptie (PSA)

Voor het reinigen van industrieel geproduceerd waterstof wordt momenteel veelal PSA toegepast.

Bij PSA systemen wordt gebruik gemaakt van de mogelijkheid om gascomponenten te binden (adsorberen) aan een dragermateriaal (adsorptiebed). De mate van adsorptie is afhankelijk van het gekozen adsorptiemateriaal en de druk. Bij hoge druk -en een hoge partiele dampspanning- zal een component, beter aan het adsorptiebed adsorberen dan bij lage druk. De component kan worden verwijderd (desorptie) door de druk van het bed af te laten. Door meerdere bedden parallel op te stellen is het mogelijk om in de kolom met hoge druk de te verwijderen componenten te adsorberen en deze te verwijderen (desorberen) door de kolom van druk af te laten.



Figuur A.1: Overzicht PSA [4]

De uitgaande concentratie van de te verwijderen componenten is afhankelijk van het adsorptiemateriaal. In figuur A.2 is een overzicht gegeven van de adsorptiesterkte van de meest gangbare adsorbentia. Door meerdere adsorptiematerialen te combineren is het mogelijk om zuiver waterstof, dat kan worden toegepast voor brandstofcellen te verkrijgen. Nadeel van de PSA techniek is dat het gas met voldoende druk dient te worden aangeboden en dat er een hoge waterstofslip is. Om deze reden wordt de techniek veelal toegepast op plaatsen waar het gedesorbeerde- waterstofhoudende gas (opnieuw) kan worden ingezet.

RELATIVE STRENGTH OF ADSORPTION

+	++	+++	++++
He	Ar	CO	C ₃ H ₆
H ₂	O ₂ N ₂	CH ₄ CO ₂	C ₄ H ₈ C ₅ +
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: small; margin-right: 5px;">- Strength +</div> <div style="text-align: center;"> Alumina Carbon Prefilter Activated Carbon Molecular Sieve </div> </div>		C ₂ H ₆ C ₂ H ₄ C ₃ H ₈	H ₂ S NH ₃ H ₂ O

Figuur A.2: Relatieve adsorptiesterkte PSA [4,37]

A.2 Temperature Swing Adsorptie (TSA)

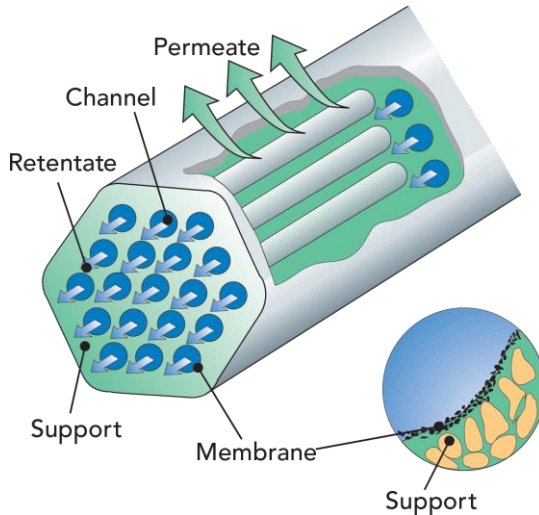
TSA wordt veelal toegepast bij het uit elektrolyse geproduceerde waterstof processen. Het gas wordt eerst gekoeld, waarbij het in het gas aanwezige water wordt verwijderd. Vervolgens wordt de in het gas aanwezige zuurstof over een katalysator geleid ("catalytic deoxidizer"), waarbij water wordt gevormd. De natte waterstof wordt vervolgens door het TSA systeem geleid en gedroogd.

Het TSA systeem bestaat uit twee kolommen, die zijn gevuld met droogmiddel. Sequentieel worden de kolommen in de gasstroom geplaatst en wordt de andere-, natte kolom verwarmd tot 200-250°C en met waterstof gespoeld teneinde het geadsorbeerde water te kunnen afstoken.



A.3 Membranen

Het principe van membranen berust op het feit dat gasvormige componenten een verschil hebben in permeabiliteit, waardoor zij òf in de gasstroom achterblijven (“retentate”) òf door het membraan zullen permeëren en in de af te voeren gasstroom (“permeaat”) terecht zullen komen. De mate van selectiviteit is afhankelijk van het gekozen membraan en het drukverschil over het membraan.

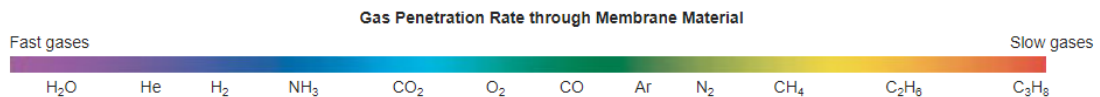


Figuur A.3: opbouw van een membraan[38]

Er zijn diverse membranen bekend, die kunnen worden gebruikt voor waterstof [4,39], waarvan palladium- en polymeermembranen commercieel verkrijgbaar en zijn getest voor waterstof [4].

Uit deze onderzoeken is gebleken dat de kwaliteit van het gezuiverde waterstof sterk afhankelijk is van de hoeveelheid palladium, die is gebruikt en dat hierdoor de kosten erg hoog zijn. [4]

Polymeer membranen worden reeds jaren toegepast voor het zuiveren van gasstromen, waaronder het verwijderen van kooldioxide uit biogas. Naast de systemen voor hoge capaciteiten zijn dergelijke membranen ook commercieel beschikbaar voor lagere debieten. De grotere commercieel verkrijgbare systemen is bekend dat 85-95% aan koolwaterstoffen [40] en 99% aan koolmonoxide [41] kan worden verwijderd. Nadeel van deze verwijderingstechniek is dat er een waterstofslip is van 2-15%. Tevens dient het gas met voldoende druk te worden aangeboden om voldoende drijvende kracht te hebben over het membraan.



Figuur A.4 :GRASYS gas penetration rate through polymer membranes [4]

A.4 Cryogeen

Bij de cryogene gasreiniging wordt gebruik gemaakt van het verschil in kookpunt van de verschillende gascomponenten. Door gas te koelen tot het kookpunt van de te verwijderen componenten zullen deze componenten vloeibaar worden en uit de gasstroom kunnen worden verwijderd. Alhoewel het proces in principe eenvoudig is, is de technische uitvoering complex en energievraag hoog. Hierdoor zijn zowel de kapitaals- en operationele kosten hoog. De technologie wordt dan ook vrijwel alleen toegepast in situaties dat de geliquificeerde producten een hoge economische waarde hebben, zoals bijvoorbeeld vloeibaar kooldioxide.



Tabel A.1: Kookpunten diverse gassen

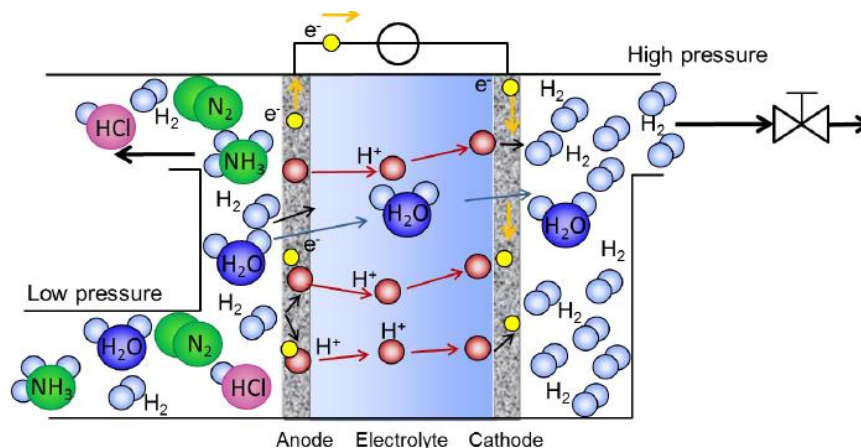
Component	Kookpunt (°C)
Waterstof	-253
Kooldioxide	-79
Koolmonoxide	-192
Stikstof	-196
Argon	-186
Zuurstof	-183
Zwavelwaterstof	-60
Methaan	-162

De techniek is minder geschikt gebleken voor het verwijderen van koolmonoxide, stikstof en argon. Tevens dient het in het gas aanwezige water vooraf te worden verwijderd om bevriezing te kunnen voorkomen. Om deze redenen wordt de techniek veelal toegepast in combinatie met andere zuiveringstechnieken, zoals PSA en membranen. [4]

A.5 Elektrochemie

Bij reiniging met een elektrochemische cel worden de waterstofatomen geoxideerd aan de anode, zodat deze -als enige- door de elektrolyt naar de kathode kunnen migreren, alwaar waterstofmoleculen worden gevormd. De technologie bevindt zich momenteel nog in de demonstratiefase.

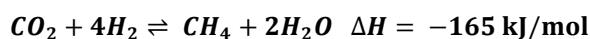
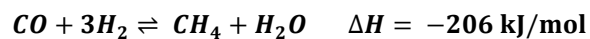
Met elektrochemische reiniging kan een zuiverheid van 99,9% worden gehaald. De recovery wordt geschat op 91-94%. [referentie bekend bij de auteurs]



Figuur A.5: Electrochemical purification

A.6 Methanisatie

Koolmonoxide en kooldioxide kunnen uit waterstof worden verwijderd met behulp van methanisatie. In beide gevallen worden de koolstofoxiden gereduceerd tot methaan, waarbij als bijproduct water wordt gevormd:



Reducties tot ca. 50 ppm aan koolstofoxiden kunnen worden gerealiseerd. Om de reactie te kunnen laten verlopen is een katalysator nodig. Hiervoor wordt veelal nikkeloxide gebruikt. Bij de reductie van de koolstofoxiden wordt ca. 3% van het in het gas aanwezige waterstof gebruikt. De reactie is exotherm, wat betekent dat er warmte wordt gevormd. Tevens kan de reactie zowel bij nagenoeg atmosferische omstandigheden als bij hoge druk kan plaatsvinden. Wel dient het gas vrij te zijn van zwavelcomponenten om zo de katalysator niet te vergifigen.



De optimale plaats en –technologiekeuze wordt nagenoeg geheel bepaald door de kosten. De kosten van de diverse reinigingstechnieken zijn zeer lastig in te schatten. Met name de gewenste kwaliteit is hierbij een issue: de kosten lopen exponentieel op met de gewenste zuiverheid. Over de kosten van reiniging in het lagedruk gedeelte (lees: distributienet) is momenteel nog niets bekend omdat deze tot op heden in de praktijk niet zijn toegepast.

A.7 Samenvatting

In tabel A.2 zijn de technische aspecten van de diverse reinigingstechnieken samengevat weergegeven.

Tabel A.2: Typische specificaties reinigingstechnieken [42-45]

Feature	PSA/TSA	Membrane	Cryogenic	Methanation	Electro-chemical
H ₂ Purity	98 – 99.9999%	90 – 98%	95 – 99%	>99%	>99.9%
H ₂ Recovery	75 – 92%	85 – 95%	90 – 98%	>95%	>90 – 100%
Min. H ₂ content	> 40%	>25 – 50%	> 10%	<25%	>8 – 100%
Typical Capacity [H ₂ Nm ³ /hr]	< 400,000	< 50,000	10,000 – 75,000		1 – 1,000
Operating Pressure [bar]	10 – 40	20 – 200	20 – 50	<100	Very high pressure (up to 600 bar)
Operating Temperature [°C]	Room temperature	0 – 100	-180	250-750	20 – 80
Pre-treatment	No	Minimal, H ₂ S removal	CO ₂ and H ₂ O removal	Sulphur removal	Sulphur removal
Start up Time	Minutes	Minutes	Hours	Hours	Minutes
Availability	Traditional method	Traditional method	Traditional method	Traditional method	Early stage of commercialization
Investment Costs	Medium	Low	Higher	Medium	High, but potential to reduce
Scale Economics	Moderate	Modular	Good	Modular	Modular
Reliability	High	High	Average	High	High, no moving parts
Typical Impurities	CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ (HCs), CO	Hydrocarbons, CO	Hydrocarbons	CO ₂ , CO, CH ₄	H ₂ O
Comments	The recovery is relatively low as hydrogen is lost in the purging step	He, CO ₂ and H ₂ O may also permeate the membrane	Prepurification step necessary to remove CO ₂ , H ₂ S and water	Sulphur-containing compounds poison the catalyst	Sulphur-containing compounds poison the electro-catalysts



BIJLAGE B: Economische aspecten

De uiteindelijke keuze voor de meest geschikte reinigingstechniek en -plaats zal worden gemaakt op basis van de laagst maatschappelijke kosten. Deze zijn afhankelijk van de samenstelling bij de productiebron, gewenste zuiverheid en gekozen zuiveringstechnologie en plaats van de zuivering in het gassysteem.

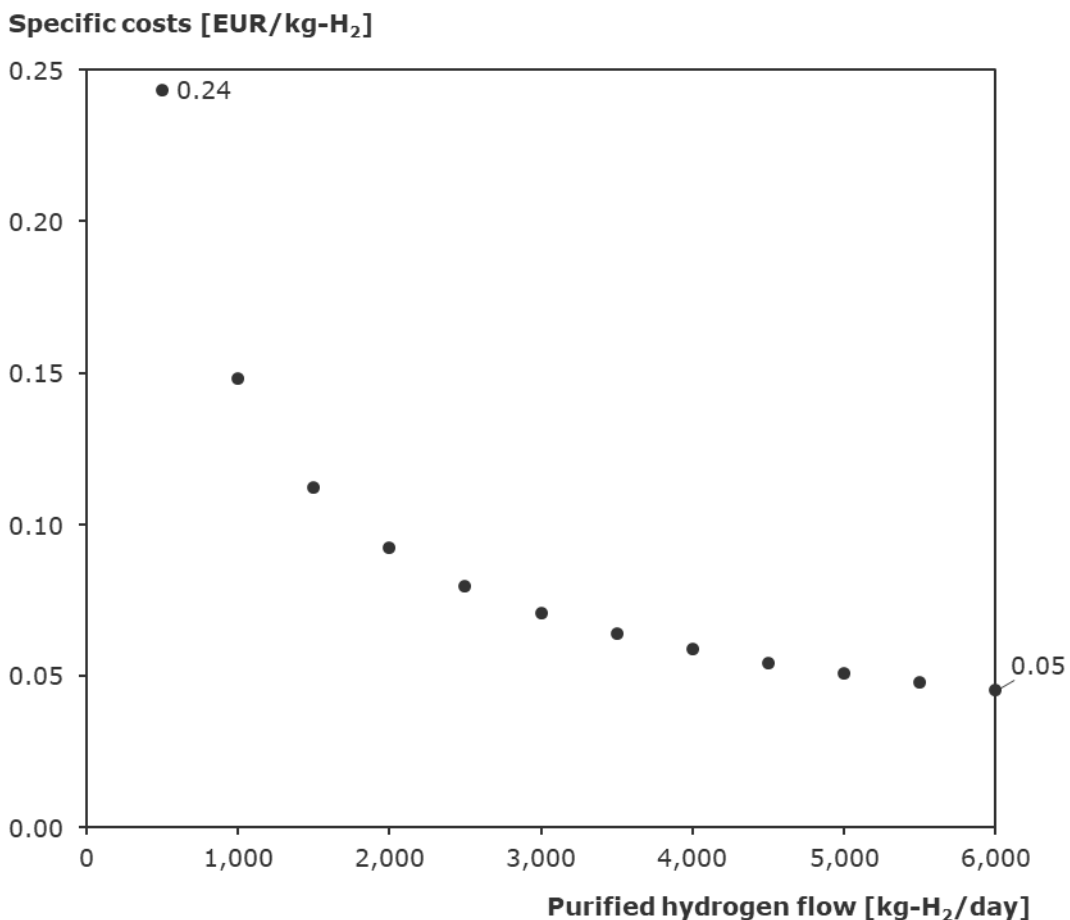
In deze bijlage worden de economische aspecten behandeld. Hierbij dient te worden opgemerkt dat vele kosten niet- of slechts ten dele in kaart kunnen worden gebracht. Deels is dit te wijten aan het feit dat de gehele waterstof economie nog in ontwikkeling is en vele technologieën -met name voor de kleinere schaal- nog in de ontwikkel- of demonstratiefase zijn. Waterstofproductie en -reiniging voor 'dedicated' toepassingen wordt wel al decennia toegepast, maar ook voor deze capaciteiten zijn de bekende prijsranges afhankelijk van de gewenste zuiverheid en capaciteit. De in dit hoofdstuk opgetekende kosten dienen dan ook als indicatief te worden beschouwd.

NREL [46] heeft de kosten voor reiniging met een PSA-systeem als functie van de gereinigde uitgaande waterstofhoeveelheid ($H_2 > 98\%$) gekwantificeerd als:

$$\begin{aligned} \text{New PSA costs} &= \text{BaseCost} * (\text{NewBedSize} / \text{BaseBedSize})^{\text{Costfactor}} \\ &= \text{USD } 54,750 * (\text{xx kg-H}_2\text{-day}^{-1} / 115 \text{ kg-H}_2\text{-day}^{-1})^{0.4} \end{aligned}$$

Waarin X de gewenste uitgaande capaciteit is.

In figuur B.1 is dit grafisch weergegeven.

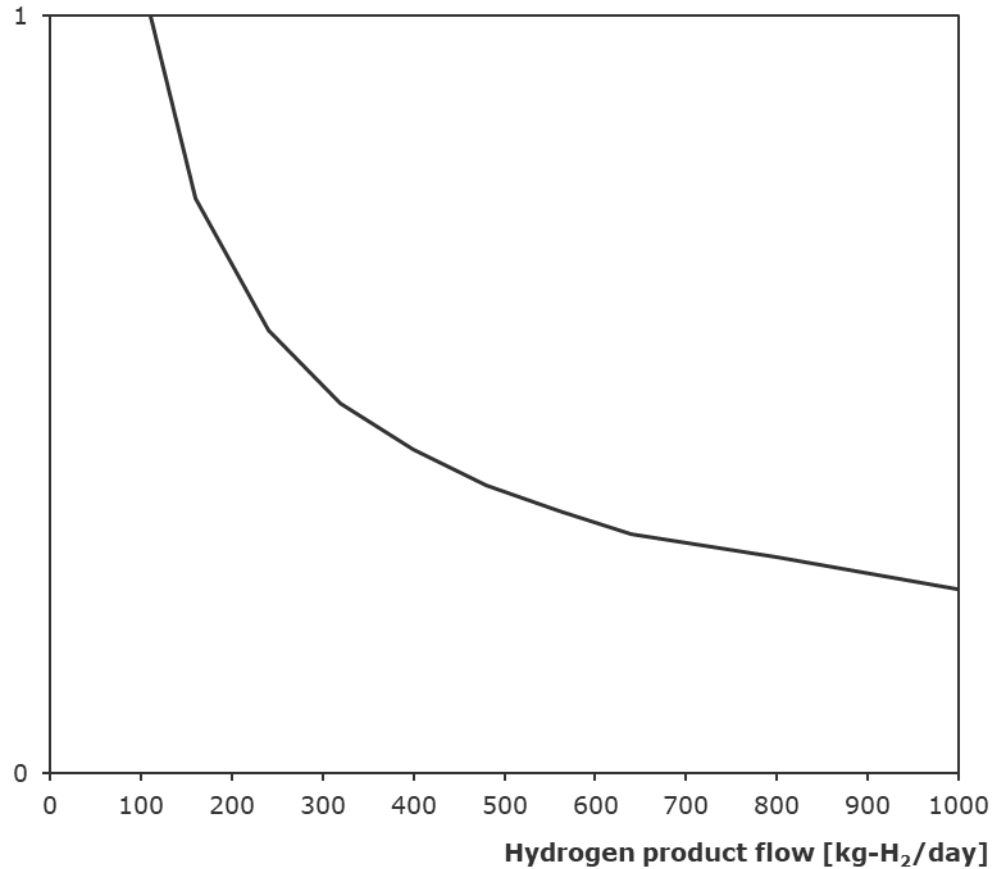


Figuur B.1: Kosten voor reiniging op basis van pressure swing adsorptie [46]



Bij lagere debieten (<1000 kg/dag) nemen deze kosten exponentieel toe, zoals is gevisualiseerd in figuur B.2.

Extraction costs [EUR/kg-H₂]



Figuur B.2: Kosten voor reiniging voor lagere capaciteiten op basis van pressure swing adsorptie [47]

Naast de capaciteit zijn de kosten afhankelijk van de onzuiverheden in het productiegas en de gewenste uitgaande kwaliteit. In tabel B.1 zijn deze -voor zover bekend- samengevat weergegeven.

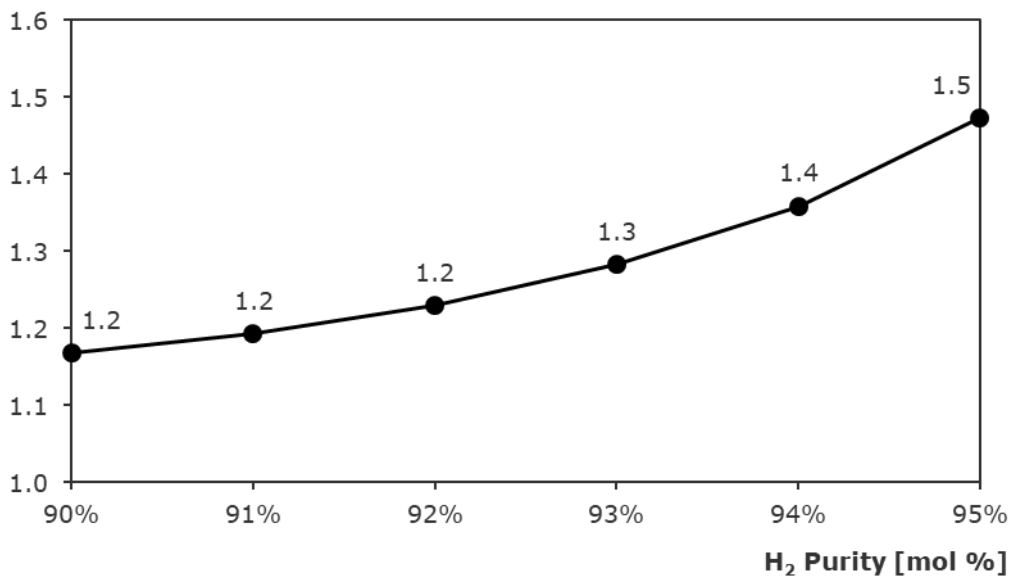


Tabel B.1: Berekende productie kosten van waterstof (LCOH) bij variërende zuiverheid [4, met 1pound=1.33euro en 39kWh=1kg (HHV)]

Productie technologie:		ATR	SMR
Zuiverheid	Technologie	LCOH(EUR/kg)	
Standaard (na CCS)	Geen	1,77	1,88
CO < 50 ppm	Methanisatie	1,83	1,96
CO < 250 ppm	PSA	1,87	2,04
CO < 50 ppm	PSA	1,88	2,04
CO < 1 ppm	PSA	1,89	2,06
CO < 0.2 ppm	PSA	1,90	2,07
CO < 0.2 ppm, N ₂ < 300 ppm	PSA	1,90	2,07
CO < 0.2 ppm, Ar < 300 ppm	PSA	2,12	2,25

Mores [48] geeft een overzicht van de zuiveringskosten als functie van de uitgaande kwaliteit voor membranen. Deze is gevisualiseerd in figuur B.3. Uit de studie is gebleken dat de reinigingskosten hoog zijn ten opzichte van de waterstofprijs uit SMR (1,5-2 €/kg). Opgemerkt dient te worden dat de studie geen informatie geeft voor zuiverheden >95%, alhoewel dat voor nagenoeg alle toepassingen wel nodig zal zijn.

Purification Costs [EUR/kg]



Figuur B.3: Zuiveringskosten als functie van de uitgaande kwaliteit voor membranen [48]

Conclusies

- Vooralnog zijn de kosten voor reiniging bij grootschalige toepassingen niet in kaart te brengen. Wel is duidelijk dat de kosten voor reiniging ter plaatse van het productieproces significant lager zijn dan die van reiniging ter plaatse van het afnamepunt
- Het verschil in de kosten voor reiniging, ter plaatse van het productieproces, als functie van de gewenste kwaliteit variëren ca. 25%. Dit wordt grotendeels bepaald door het gewenste waterstofgehalte en is nagenoeg niet afhankelijk van de uitgaande specificaties m.b.t. de sporencomponenten (veelal koolmonoxide en inerten).



BIJLAGE C: Rekenvoorbeelden

Impact van sporenc componenten op de Wobbe-index

In de PAS4444 zijn voor een aantal componenten grenswaarden opgegeven. Navolgend is de impact van deze componenten op de Wobbe [0,25] weergegeven.

Spec 1: totaal argon + stikstof + helium \leq 2 mol%						
	H ₂ [mol%]	Ar [mol%]	N ₂ [mol%]	He [mol%]	W [MJ/m ³ n]	Opmerking
	100	0	0	0	48,35	
	98	2	0	0	40,39	
	98	0	2	0	42,25	
	98	0	0	2	46,92	
Spec 2: totaal methaan + kooldioxide + koolwaterstoffen \leq 1 mol%						
	H ₂ [mol%]	CH ₄ [mol%]	CO ₂ [mol%]	C _x H _y [mol%]	W [MJ/m ³ n]	Opmerking
	99	0	0	0	48,35	
	99	1	0	0	47,74	
	99	0	1	0	43,55	
	99	0	0	1	47,32	C _x H _y als C ₂ H ₆
	99	0	0	1	46,95	C _x H _y C ₃ H ₈
	99	0	0	1	46,16	C _x H _y C ₆ H ₁₄

Impact van waterinlek op de Wobbe-index

Bij de voorbeeldberekeningen is uitgegaan van een waterdauwpunt van 10 °C bij 30 mbar(o), overeenkomend met 1,1 vol% water. De concentraties van brandstofgassen worden standaard opgegeven op mol-basis (mol%). Voor de eenvoud is er in het navolgende voorbeeld vanuit gegaan dat water zich als een ideaal gas gedraagt en dat vol% en mol% aan elkaar gelijk mogen worden gesteld.

		Aardgas (G-gas)		Waterstof	
		Droog	nat	droog	nat
Methaan	mol%	81,29	80,40		
Ethaan	mol%	2,87	2,84		
Propaan	mol%	0,38	0,38		
Butanen	mol%	0,15	0,15		
Pentanen	mol%	0,04	0,04		
Hexanen	mol%	0,05	0,05		
Stikstof	mol%	14,32	14,16		
Zuurstof	mol%	0,01	0,01		
Kooldioxide	mol%	0,89	0,88		
Waterstof	mol%			100	98,90
Water	mol%		1,10		1,10
Wobbe [0,25]	MJ/m ³ (n)	43,724	43,283	48,351	45,937
Verschil W	MJ/m ³ (n)	-0,441		-2,414	
	%relatief	1,0%		-5,0%	