

# Technology Assessment Waterstof

**Analyse van de mogelijkheden van verschillende waterstofketens en de rol die TKI Gas kan spelen in de innovatieondersteuning in Nederland**

studio  
Gear Up |

September 2015 |

in opdracht van TKI Gas



# Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd opdracht van:

TKI-Gas

Dhr. J. Gigler

Directeur TKI Gas

Groen van Prinstererlaan 37

3818 JN Amersfoort

Het rapport is opgesteld door:

studio Gear Up

Dhr. E.J.M.T. van den Heuvel

Rooseveltlaan 80-1

1078 NM Amsterdam

+31-6-83223098

info@studiogearup.com

www.studiogearup.com

Aan dit rapport kunnen .geen rechten worden ontleend.

Overname en publicatie van informatie uit dit rapport is toegestaan, mits met vermelding van "studio Gear Up, 2015, Technology Assessment Waterstof, in opdracht van TKI-Gas".

Datum rapportage: september 2015

# Inhoudsopgave

Colofon	1	Huidige technologiestatus voor integratie van variabele duurzame elektriciteit in energiesysteem	19
Aanleiding voor dit onderzoek	4	IEA over positie waterstofgebaseerde opslag van elektriciteit	20
Belangrijkste conclusies	5	Mogelijkheden en showstoppers voor bijmenging van waterstof in aardgasnet	21
Belangrijkste 'Take-away boodschappen'	6	Welke lessen kunnen getrokken worden uit de UK Technology Innovation Needs Assessment voor "Hydrogen for Transport"?	22
Aanbevelingen voor een TKI-Gas programmalijn voor waterstof	7	(Inter)nationale netwerken - Welke nederlandse spelers zijn actief en op welke onderwerpen?	24
Annexen	8	Subsidieregelingen voor brandstofcellen en waterstof	25
Hoe ziet het waterstofsysteem er uit?	9	Praktijkvoorbeeld van onbalans tussen vraag en aanbod in elektriciteitsmarkt - een julidag in Duitsland	26
Belangrijkste punten uit IEA- Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells	10	Hoe groot is het aandeel hernieuwbare energie in elektriciteit?	27
Sleutelacties voor de komende tien jaar	11	Huidige technologiestatus van brandstoftechniek in gebouwen	28
IEA: Waterstof schakelt verschillende energiesectoren aan elkaar: hogere operationele flexibiliteit	13	EU-omschrijving van Technology Readiness Levels	29
Huidig gebruik van waterstof (2013)	14	Afkortingen	30
Huidige technologiestatus van sleuteltechnologieën voor waterstofproductie	15	Geraadpleegde literatuur, websites en gesproken experts	31
Elektrolyse-technologie	16		
Huidige technologiestatus in transportsector	17		
IEA voorziet voor waterstofauto's concurrentie met plug-in hybrides	18		

# Aanleiding voor dit onderzoek

TKI Gas overweegt om rond het thema waterstof in brede zin aan het Topteam Energie te adviseren om innovatiegelden beschikbaar te stellen. TKI Gas ziet namelijk veel beweging in de markt en allerlei partijen maken zich klaar voor de marktintroductie. Er is zelfs een Green Deal Waterstof in voorbereiding en in de zomer van 2015 is een Nationaal Waterstof Platform opgericht.

Om hierover goed onderbouwde keuzes te kunnen maken en een advies aan het Topteam Energie te kunnen opstellen wil TKI Gas over meer informatie beschikken.

TKI Gas zoekt inzicht op de volgende aspecten:

- Wat is momenteel de status van de technologie van kansrijke waterstofketens, waar liggen grote knelpunten en waar wacht men op grote doorbraken?
- Welke rol zou Nederland kunnen spelen op het gebied van waterstof, aansluitend bij de specifieke infrastructuur, kennispost en bedrijvigheid.  
Op welke thema's zou TKI GAs moeten inzetten om een sterke internationale positie van Nederland te kunnen realiseren?
- Welke partijen kunnen hierbij een rol spelen.

Studio Gear Up is verzocht een beknopte notitie aan te leveren op basis waarvan TKI Gas een advies kan opstellen aan het TopTeam Energie over een al dan niet in te richten programmalijn voor waterstof.

In het voorliggende concept-rapport worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen gerapporteerd. Deze conclusies en aanbevelingen zijn gebaseerd op de analyses die in de annex van dit rapport zijn weergegeven.

Voor deze opdrachten is een aantal externe bronnen geraadpleegd (zie pagina 31). Ook is met een aantal Nederlandse waterstof-experts gesproken

# Belangrijkste conclusies

## Wat zijn de sleuteltechnologieën?

Voor de ontwikkeling van waterstof als energiedrager in een duurzame en klimaatneutrale energievoorziening geven diverse studies aan dat met name twee technologieën (voor productie van waterstof voor meerdere markten en voor gebruik als energiedrager in vervoer) zich verder moeten ontwikkelen om waterstof concurrerend te kunnen laten zijn t.o.v. andere low-carbon alternatieven.

- De elektrolyse-technologie zal aangepast moeten worden voor toepassing van waterstof in nieuwe markten: meer flexibiliteit in bedrijfsvoering, lagere investeringskosten, langere levensduur;
- De brandstofcel-technologie zal verdere procesinnovatie moeten ondergaan om kosteneffectief zero-emissie vervoer mogelijk te maken.

## Wat zijn de voornaamste knelpunten voor maatschappelijke acceptatie?

- De prijs van waterstof. Momenteel ligt de prijs van duurzame/klimaatneutraal waterstof enkele factoren boven de prijs van op aardgas steam-reforming gebaseerde waterstof;
- Het beschikbaar krijgen van low-carbon waterstof. Huidig waterstof wordt opgewekt voor industriële doelen. Waterstof wordt alleen maatschappelijk aanvaard als de oorsprong ervan van duurzame of klimaatneutrale origine is. Onderzocht moet worden in hoeverre waterstof uit fossiele bron met CO<sub>2</sub>-opslag acceptabel wordt geacht.
- Het is nog onzeker hoe de veiligheid van grote hoeveelheden waterstof in ons energiesysteem beleefd wordt. Ervaringen uit experimenten in Amsterdam met waterstofbussen zijn positief, maar het onderwerp verdient aandacht.'

## Waar wacht men op grote doorbraken?

- In de transportsector zal met behulp van demonstratie in de markt - voertuigen en tankinfrastructuur - aangetoond moeten worden dat er een haalbare business is te realiseren én dat er zicht is op significante CO<sub>2</sub>-reductie tegen aanvaardbare kosten; In het Verenigd Koninkrijk is de innovatiestrategie erop gericht om door middel van marktintroductie van de waterstofketen voor de transportsector te verkennen of de kosten voldoende verlaagd kunnen worden om de business case gezond te krijgen en - en passant - inzicht te krijgen in de next-generation technologieën voor verdere opschaling na de 2020-2030 periode.
- In de elektriciteitsmarkt is er een grote verwachting ten aanzien van de noodzaak voor elektriciteitsopslag. Het is echter onzeker of die opslag in de praktijk in de verwachte mate noodzakelijk zal zijn en dat maakt grote investeringen in infrastructuur die hierop gebaseerd is risicovol. Bovendien is op dit moment nog onzeker of waterstof dan de 'storage of choice' zal zijn. De Power-to-X aanpak in de programmalijn Systeemintegratie, waarbij meerdere opties hiervoor worden verkend, helpt bij het verkrijgen van inzicht over de verschillende alternatieven.

- In de aardgassector wordt verkend of en in welke mate duurzaam/klimaatneutraal waterstof kan worden bijgemengd. Hierdoor kan het aardgasnetwerk een additionele strategische functie krijgen. Door de bijmenging van duurzaam/klimaatneutraal waterstof wordt de koolstofintensiteit van het gasmengsel verlaagd. Dit kan overigens ook met bijmenging van groengas worden verkregen. Hoewel in het pijpleidingennet 10% (op volume-basis) niet als belemmerend wordt beoordeeld, wordt wel door diverse studies aanbevolen case-by-case te beoordelen of waterstofbijmenging mogelijk is. Een aantal eindtoepassingen kan mogelijk niet voldoende H<sub>2</sub>-tolerant te zijn. Beter inzicht in waar dit wel en niet mogelijk is kan de betekenis van bijmengen van waterstof verhogen.

## Innovatiebeleid

Het Verenigd Koninkrijk heeft een no-regret innovatieondersteuningstrategie rondom waterstof die ook van toepassing kan zijn voor de Nederlandse situatie:

- Op korte termijn ondersteuning bieden aan innovaties die de toekomstige besluitvorming voor nieuwe energie- en transportinfrastructuur kunnen versterken;
- Voor langere termijn Onderzoek en Ontwikkelingsondersteuning leveren aan de Next-generation technologieën (TRL 1-6). Hierbij valt te denken aan de verdere ontwikkeling van o.a. Proton Exchange Membrane elektrolyzers, van Solid Oxide Membrane elektrolyzers, materialen-onderzoek voor brandstofcellen en elektrolyzers, aanpassingen aan gasapparatuur die om moet kunnen gaan met waterstof-verrijkt aardgas;
- Besluiten over grote infrastructurele investeringen met lock-in risico's pas nemen nadat de resultaten van de marktdemonstraties voldoende onderbouwing geven voor de noodzaak en wenselijkheid van deze infrastructuur.

# Belangrijkste 'Take-away boodschappen'

De belangrijkste boodschappen die TKI Gas uit deze studie kan destilleren zijn de volgende:

- Vanuit het duurzaam/klimaatneutraal waterstof-perspectief is de transportmarkt de meest urgente voor verdere uitrol en innovatieontwikkeling. De enorme afhankelijkheid van fossiele bronnen is in deze markt ongekend en vraagt om een grootschalige transitie wil een sterke CO<sub>2</sub>-reductie in deze sector gerealiseerd worden.
- Waterstof is momenteel niet of nauwelijks duurzaam of klimaatneutraal geproduceerd. Om bij te dragen aan de low-carbon doelen in de verschillende energiesectoren is het van belang dat op zo realistisch mogelijke termijn stappen worden gezet naar een volledig duurzame waterstofproductie. Omdat er in Nederland reeds een conventionele waterstofinfrastructuur beschikbaar is kan marktdemonstratie sneller geschieden en kan Nederland zich op dit vlak mogelijk onderscheiden tov concurrerende landen.
- De technologie voor waterstofproductie en transport en distributie voor toepassing in de transportsector en voor energieopslag zijn nog niet volwassen en vereisen andere prestatieprofielen dan de huidige industriële waterstof, zoals meer flexibiliteit in productiecapaciteit (sneller op- en afschakelen).
- Bovendien dient de waterstof voor deze nieuwe markt gebaseerd te zijn op waterstof met een lage CO<sub>2</sub>-footprint, omdat dat het Leitmotiv is voor de toepassing van de alternatieve energiedrager. Maatschappelijke draagvlak voor de toepassing van waterstof en acceptatie van hogere initiële kosten zal immers alleen groeien als waterstof van hernieuwbare en low-carbon energiebronnen zal zijn gemaakt.
- Om in de toekomst in Europa transport van waterstof te voorzien is het viervoudige van de huidige wereldwijde productie nodig.
- De technologische uitdaging om waterstof te produceren voor de transportsector is enorm. De elektrolyse-technologie nodig voor de productie van deze waterstof uit duurzame of low-carbon elektriciteit is nog niet technologisch volwassen. En om een indruk te geven van de omvang van de schaal waarin deze elektrolyzers moeten worden gebouwd: als in 2050 40% van het wegverkeer in Europa op waterstof rijdt, dan moet er in Europa meer dan 11 maal zoveel elektrolyse-capaciteit staan dan momenteel wereldwijd geïnstalleerd is.
- Waterstof is uiteraard niet de enige alternatieve brandstof voor de transportmarkt. Het competitieveld voor alternatieve brandstoffen en energiedragers is inmiddels goed gevuld met diverse 'concurrerende' alternatieven (elektriciteit, LPG, aardgas gebaseerde opties als CNG en LNG, duurzame biobrandstoffen). Waterstof zal steeds opnieuw t.o.v. deze alternatieven een duidelijke meerwaarde moeten aantonen.
- Een reeds bestaande markt is de productie van waterstof voor industriële toepassingen (o.a voor olieraffinage en staalproductie). Deze bestaat al decennialang, is groot in omvang (7,2 EJ/jaar, ca. 60 miljoen ton), volledig fossiel gebaseerd (voornamelijk op basis van aardgas en steenkool gebaseerde steam reforming). Slechts 4% van dit waterstof wordt geproduceerd met behulp van elektrolyse-technologie (grootschalige alkaline elektrolyse). Deze industriële waterstof noemen ze ook wel captive hydrogen - on-purpose gemaakt om meteen in andere processen gebruikt te worden. Slechts een klein deel van deze waterstof is beschikbaar voor verkoop.
- De markttoepassing 'opslag van elektriciteit' kent onzekerheden. Overschotten in elektriciteitsproductie kunnen gaan verminderen: energiebedrijven zullen verdergaande efficiëntie in het elektriciteitssysteem nastreven om vraag en aanbod zo nauw mogelijk op elkaar aan te sluiten. De behoefte aan opslag van elektriciteit zou daardoor lager kunnen zijn dan nu verondersteld wordt. Een andere overweging is dat de energiebedrijven de potentiële toegevoegde waarde van energie-opslag naar zich toe zullen willen trekken. Op momenten van lage prijzen voor elektriciteit zullen ze in eigen beheer de energie willen opslaan om op momenten met hogere elektriciteitsprijzen deze weer in de markt te brengen. Het feit dat een aantal energiebedrijven hiermee experimenteert kan hiervan een voorbode zijn (E.on, RWE). Het is van belang dat de bedrijven die actief zijn in de gassector zich hierop voorbereiden om hun marktpositie ook in de toekomst te versterken. Buurlanden waar al een groter aandeel hernieuwbare elektriciteit bestaat - Denemarken, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk - hebben een concurrentievoordeel tov Nederland omdat ze al praktijkervaring met een variabel hernieuwbare elektriciteitsaanbod hebben.
- Gebruik de specifieke competenties van de gasinfrastructuur. TKI Gas kan innovaties voor waterstof initiëren, waarbij het voor de hand ligt om zich te concentreren op de raakvlakken tussen de eigenschappen van waterstof en de gasinfrastructuur. Hier kan een initiatief zoals het onlangs opgerichte Nationaal Waterstof Platform (NWP) dat zich richt op marktintroductie en de toepassing van waterstof in o.a. de transportsector van profiteren. Dit biedt de mogelijkheid om de aanwezigheid van de bestaande gasinfrastructuur optimaal uit te nutten.
- Het no-regret principe in de innovatieondersteuningsaanpak van het Verenigd Koninkrijk kan als voorbeeld dienen voor een aanpak van TKI Gas
- Sluit aan bij internationale consortia om voordeel te behalen van landen met hogere aandelen hernieuwbare elektriciteit om ervaring op te doen met de integratie van duurzaam geproduceerd waterstof. Deelname in de IEA Hydrogen Implementing Agreement is een handige stap om snel over de juiste informatie te beschikken.
- Lift mee met andere ontwikkelingen - waaronder ook de beschikbare ondersteuningsprogramma's in EU - Horizon 2020 FCH-JU gelden en onderwerpen.

# Aanbevelingen voor een TKI-Gas programmaliijn voor waterstof

TKI Gas onderzoekt de noodzaak voor een aparte programmaliijn waterstof, o.a. omdat er 'veel beweging in de markt is', zowel nationaal als internationaal. Binnen een steeds sterker wordend streven naar een klimaatneutraal energiesysteem in de richting van 2050 kan waterstof een sleutelpositie vervullen. Het TKI Gas wil daarbij aansluiten.

Een aparte programmaliijn is wenselijk en noodzakelijk om de focus op innovaties voor waterstof te stimuleren. Momenteel bestaan er al verschillende mogelijkheden om ondersteuning voor onderzoek en ontwikkeling voor waterstofprojecten te verkrijgen (zie pagina 24). Op dit moment worden echter deze initiatieven vergeleken met andere alternatieve projecten en ontbreekt de strategische samenhang om de kansen van waterstof voor de Nederlandse industrie te verzilveren.

## **Integrale focus aanbrengen op waterstofinnovatie**

Met behulp van een programmaliijn Waterstof kan duidelijk worden aangegeven dat gezocht wordt naar mogelijkheden om met waterstof de verbinding tussen verschillende energiesystemen te leggen: de elektriciteitsmarkt, de transportmarkt en de aardgasdistributiemarkt.

## **Lift mee**

Uit het onderzoek komt duidelijk naar voren dat de marktdemonstratie van waterstof in de transportsector bepalend zal zijn voor verdere uitrol van een duurzame/klimaatneutrale waterstofketen in andere sectoren. Voor TKI Gas is het daarom van belang om aansluiting te zoeken bij initiatieven die op dit terrein in ontwikkeling zijn. De gasector, het 'gassysteem' de gaskennisinfrastructuur, en de aan gas verbonden bedrijven kunnen hun expertise en competenties (oa. in de transport- en distributielogistiek) inbrengen om de marktdemonstratie van waterstof in de transportsector mede tot een succes te maken.

## **Bouw uit**

Dit voorgaande betreft een 'enabling' strategie voor verdere uitrol van waterstoftoepassingen in de elektriciteitssector, waarbij surplus-elektriciteit in de vorm van methaan of als waterstof in het aardgasnet opgeslagen zou kunnen worden.

## **Internationale oriëntatie**

De ontwikkeling van alternatieve brandstof- en energiedragers speelt niet alleen in Nederland, maar is een Europese aangelegenheid. Ga actief op zoek naar internationale partnerships en samenwerkingsverbanden, zoals het Joint Undertaking Hydrogen and Fuel cells, en de IEA Hydrogen Implementing Agreement, uitgaande van de specifieke competenties van partners van TKI-GAS.

## **Transitie naar duurzaam/klimaatneutraal waterstof**

De focus van een programmaliijn voor waterstof moet er mede op gericht om de overstap te maken van fossiel naar duurzaam geproduceerd waterstof. In Nederland bestaat al een infrastructuur voor productie en distributie van industrieel waterstof. Dit betekent dat er onder TKI-gas waterstofprojecten een vliegende start kunnen maken.

Centraal in de programmaliijn zou moeten worden gesteld dat het programma de transitie naar duurzame of klimaatneutrale waterstof nastreeft. Zonder deze focus kunnen de lange termijn doelen van de carbonisatie niet gerealiseerd worden.

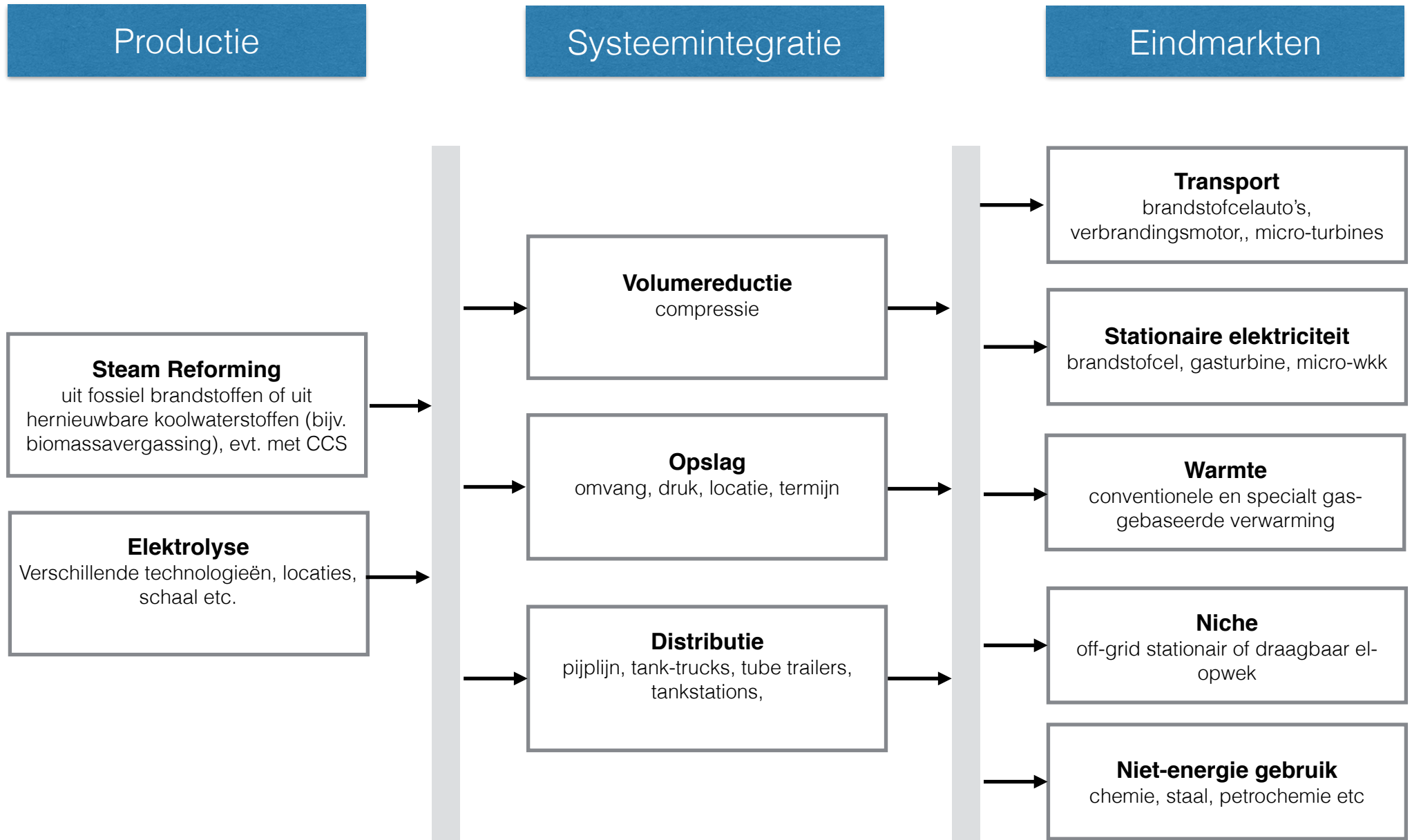
# Technology Assessment Waterstof

## Annexen



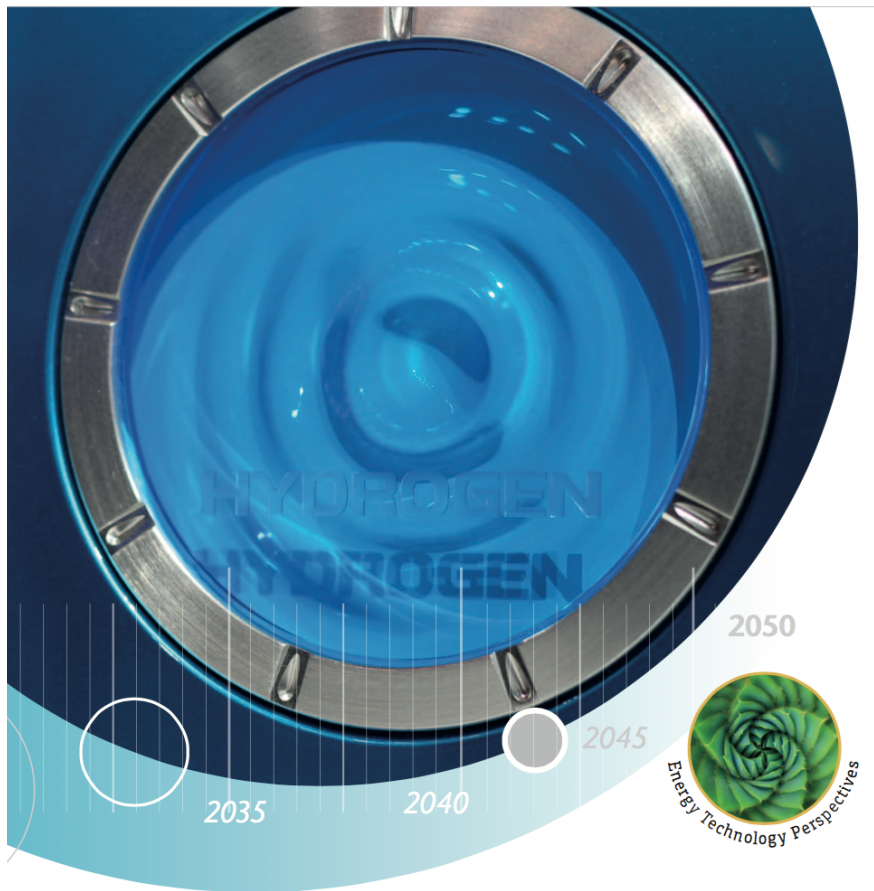


# Hoe ziet het waterstofsysteem er uit?



Gebaseerd op: 2014, LCICG, TINA Hydrogen for Transport Summary Report

# Belangrijkste punten uit IEA Technology Roadmap on Hydrogen and Fuel Cells



## Technology Roadmap

### Hydrogen and Fuel Cells



IEA beschrijft als volgt de belangrijkste mogelijkheden en functies van waterstof:

#### Waterstof opportuniteiten:

Waterstof is een flexibele energiedrager die:

- Gemaakt kan worden van elke regionaal en lokaal beschikbare primaire energiebron;
- Omgezet kan worden in elke gewenste vorm van energie voor verschillende eindtoepassingen;
- In het bijzonder geschikt is voor gebruik in een brandstofcel voor elektriciteitsproductie.

Waterstof met een lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk kan helpen energie-gerelateerde CO<sub>2</sub>-emissies te reduceren.

Gebruik van waterstof draagt bij aan verlagen van lokale luchtverontreiniging en verminderd geluidsemissies.

Waterstof draagt bij aan het vergroten van de energievoorzieningszekerheid en het diversificeren van de brandstofmix.

Als energiedrager kan waterstof een intermediaire rol tussen energievraag en -aanbod vervullen en daarmee de flexibiliteit van het algehele energiesysteem versterken.

#### Belangrijkste functies van waterstof:

Opslag:

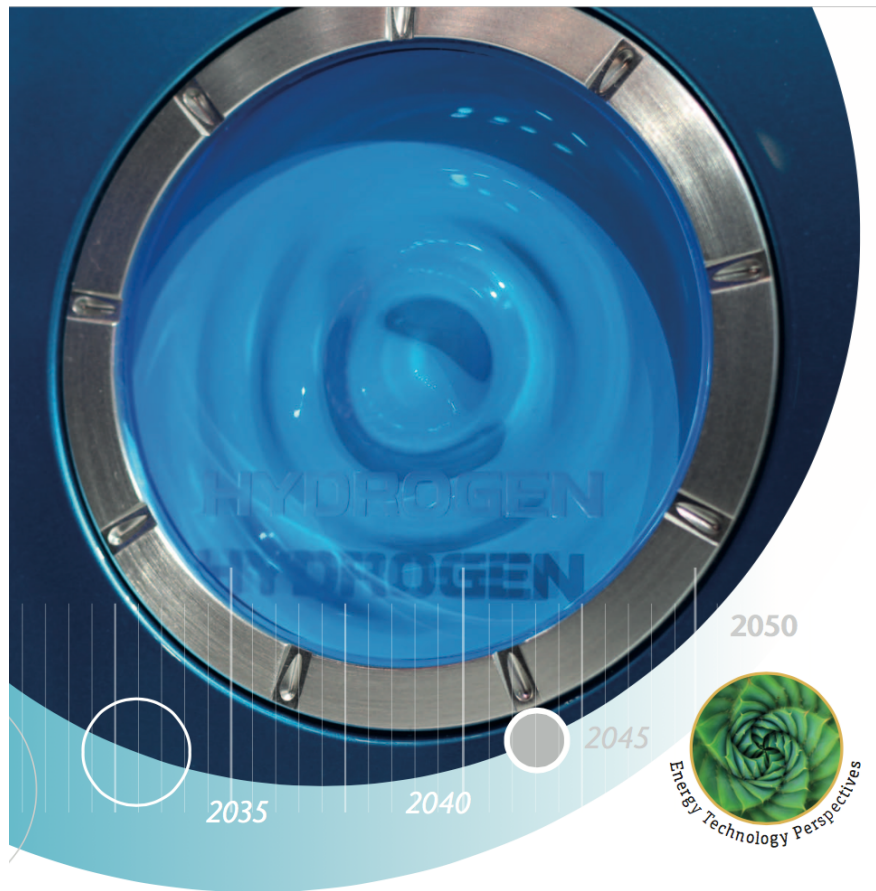
- Korte termijn, kleine volumes voor mobiele toepassingen;
- Lange termijn voor maximale integratie van variabel aanbod duurzame elektriciteit met eindtoepassing in verschillende markten, zoals power-to-power, power-to-gas of power-to-fuel.

Energietoepassing in:

- Transportsector;
- Industrie;
- Gebouwde omgeving (huishoudens, commerciële gebouwen).

Grondstoftoepassing in de industrie.

# Sleutelacties voor de komende tien jaar [1 van 2]



## Technology Roadmap

### Hydrogen and Fuel Cells



IEA geeft in haar rapport aan dat de focus in het komende decennium op de volgende punten zou moeten liggen:

#### **Algemene ontwikkeling:**

Stimulering de introductie van brandstofefficiënte en low-carbon technologieën in alle energiesectoren met marktgericht en technologie- en brandstofneutraal beleid.

#### **Stimuleren van vroege markttoepassingen**

Stimulering van investeringen en vroege markttoepassing van waterstof-brandstofceltechnologie en de benodigde infrastructuur met gericht beleid om kosten te verlagen. nationale en regionale prioriteiten om de gewenste waardeketens en te verwijderen marktbarrières te bepalen.

#### **Aandacht voor standaardisatie en veiligheid**

Harmonisatie van internationale codes en standaarden om veiligheid en betrouwbaarheid te vergroten bij gebruik en monitoren van waterstof in eindtoepassingen.

#### **voortdurende R&D steun voor sleuteltechnologieën**

Voortzetting van ondersteunen van technologische vooruitgang en innovatie, door middel van publieke en private RD&D gelden voor sleuteltechnologieën, zoals brandstofcellen en elektrolyzers. Versterk focus op sectordoorsnijdende onderzoeksgebieden zoals materialen, om verbeterde systeemprestaties te realiseren.

#### **Optimaliseren van systeemintegratie**

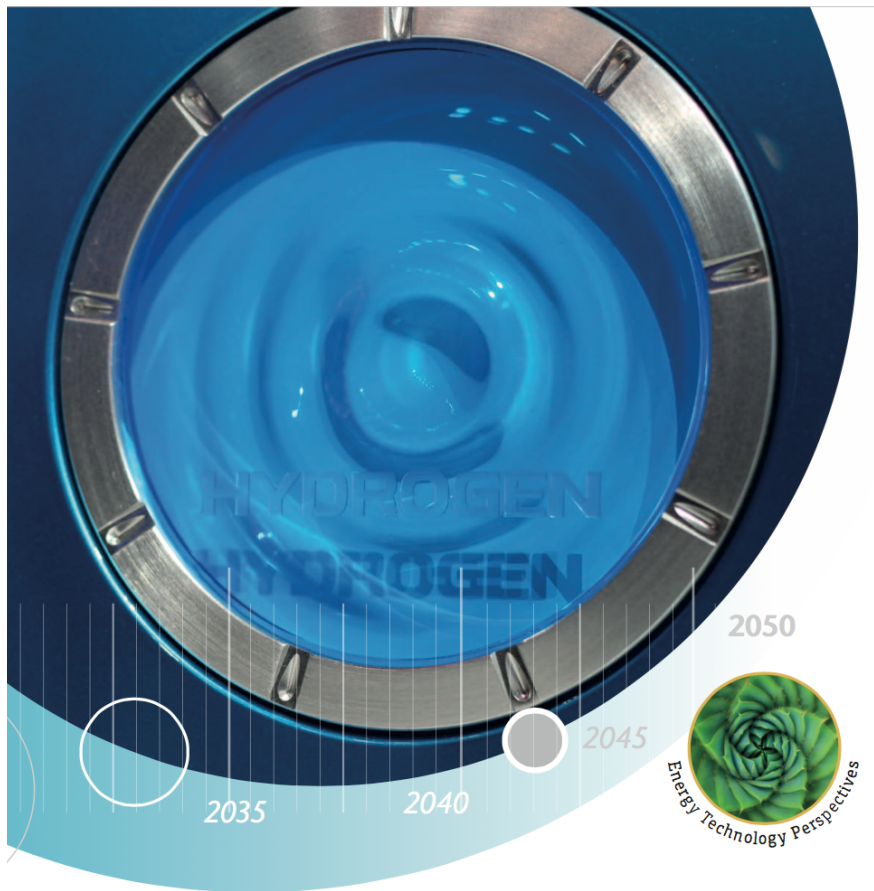
Optimalisatie van interactie tussen diverse energiesectoren om voordelen van energiesysteemintegratie.

#### **Onderzoek mogelijkheden CCS voor bijdrage in klimaatneutraliteit**

Ontwikkel waar mogelijk de Carbon Capture en Storage mogelijkheden voor fossiel-gebaseerde waterstofproductie tot volwassen bedrijfsactiviteit.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

# Sleutelacties voor de komende tien jaar [2 van 2]



## Technology Roadmap

### Hydrogen and Fuel Cells



IEA ziet de voornaamste prioriteit en mogelijkheden voor waterstof in de transportsector. De urgentie in deze markt, afhankelijkheid van olie, wordt het sterkst gevoeld. Hiervoor wordt momenteel het grootste industriële momentum voor ontwikkeld. Op de tweede plaats ziet IEA een rol van betekenis weggelegd voor de link van waterstof met de elektriciteitssector en voor invoeging in het aardgasnetwerk.

De belangrijkste acties die volgens de IEA moeten plaatsvinden zijn de volgende:

#### Voor mobiliteit:

Bouw praktijk- en economische ervaring op met een waterstof/brandstofcel keten op door marktintroductie van eerste 10 duizend voertuigen, in samenhang met waterstofproductie, transport-, distributie en tankinfrastructuur (500 tot duizend stations) in geschikte regio's (incl. grensoverschrijdende samenwerking)

Betrek internationale stakeholders van relevante industrie als overheden (lokaal, regionaal en nationaal) om risico-mijdende introductiestrategieën te ontwikkelen, incl. financieringsinstrumenten en innovatie businessmodellen die de infrastructuur.

#### Voor intermediaire energieopslag:

Bouw het aantal waterstof-gebaseerde energieopslagsystemen voor de integratie van variabele duurzame elektriciteit en verzamel en analyseer praktijk gebaseerde performance data

Ontwikkel regelgevingkaders die de belemmeringen van netwerktoegang voor elektriciteitsopslagsystemen, waaronder power-to-fuel en power-to-gas.

Waar relevant, ontwikkel regelgeving voor het bijmengen van waterstof in het aardgasnetwerk.

#### Betekenis voor TKI-Gas:

Sluit aan bij de ontwikkelingen in de transportsector. In deze sector zal de komende jaren de marktdemonstratie verkend worden om de business cases voor waterstof financieel haalbaar te krijgen. De TKI-gas gelieerde bedrijven kunnen hun met producten en diensten voor waterstofproductie, transport- en distributie en infrastructuur bijdragen aan deze ontwikkeling.

Voor intermediaire energieopslag geldt hetzelfde: de benodigde technologie kan goed ontwikkeld en aangeleverd worden door TKI-Gas bedrijven.

opslag van waterstof in het aardgasnetwerk vereist nog het oplossen van enkele technologies issues, zoals de geschiktheid van gasturbines, compressiestation en CNG-tanks in voertuigen voor waterstof-verrijkt aardgas.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

# IEA: Waterstof schakelt verschillende energiesectoren aan elkaar: hogere operationele flexibiliteit

In het IEA rapport Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells wordt benadrukt dat waterstof de verschillende energiesectoren en de energietransport- en -distributienetwerken met elkaar kan verbinden en daarmee de operationele flexibiliteit van een toekomstige, low-carbon energiesysteem kan vergroten. (zie de figuur hiernaast). Wat in deze figuur overigens opvalt is dat de IEA het 'liquid and gaseous fuels and feedstocks T&D' netwerk als een netwerk beschouwd. In Nederland, maar ook West-Europa zijn de netwerken voor vloeibare brandstoffen en voor aardgas twee afzonderlijk netwerken.

Deze claim is overigens niet exclusief voor waterstof van toepassing. Ook methaan (van aardgas, groengas, synthesesgas), methanol of andere energiedragers kunnen deze schakelfunctie hebben.

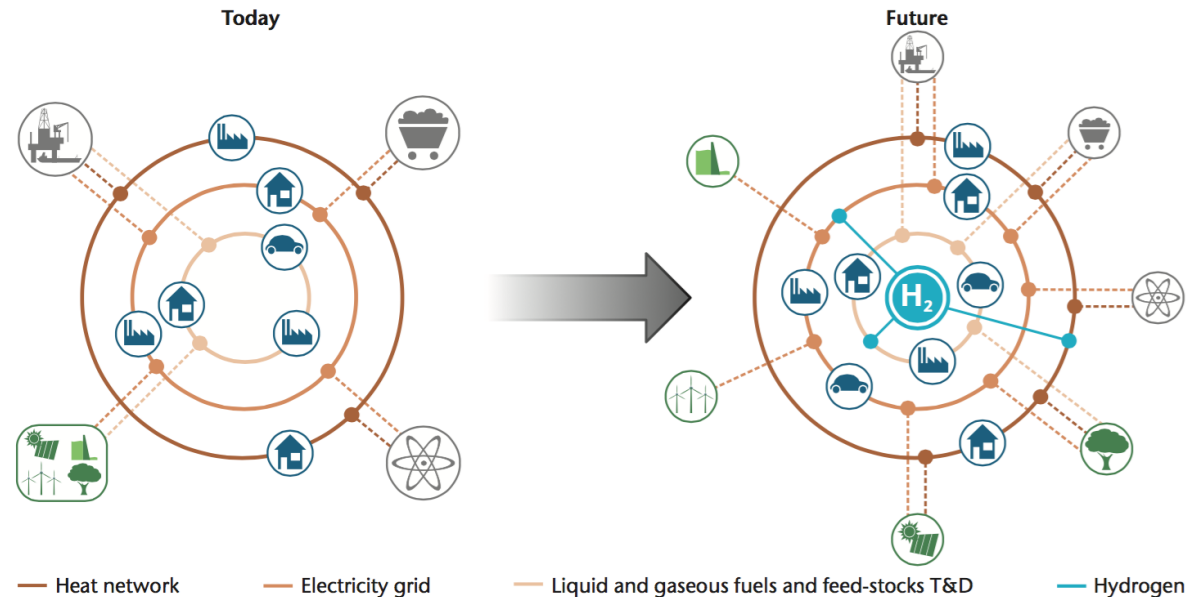
Van belang is het gegeven dat in de nabije toekomst deze verschillende systemen met elkaar verbonden zullen worden. voor TKI-Gas is dat een belangrijk gegeven, aangezien dit 'verbindingsperspectief' voor alle gasvormige energiedragers geldt. De gasector zal in de toekomst de functie van het gasnetwerk als buffer en verbindingsinstrument moeten blijven benadrukken.

Voor aardgas en (bio)methaan worden al in voldoende mate deze mogelijkheden verkend.

Alhoewel al sinds enkele decennia de mogelijkheden voor bijmenging van waterstof in het aardgasnet onderzocht worden, lijkt de urgentie hiervan nu groter te worden. Bijmengen van (duurzaam of klimaatneutraal) waterstof verlaagt de koolstofintensiteit van het gasmengsel en daarmee krijgt het (aard)gassysteem een centrale functie in de decarbonisering van het energiesysteem. Studies (zoals DGWW) geven daarbij wel aan dat bij toenemend bijmengpercentage van waterstof verschillende randapparatuur (gasturbines, CNG-tanks in voertuigen en bijv. gaschromatografen) een tolerantiegrens bereiken.

Aanbevolen wordt dat TKI-Gas een innovatie- en ondersteuningsagenda opstelt voor het verhogen van de waterstoftolerantie van deze gasapplicaties. De strategische en toekomstige betekenis van het gasnetwerk kan daarmee worden versterkt.

Figure 1: Energy system today and in the future



**KEY POINT:** Hydrogen can link different energy sectors and energy T&D networks and thus increase the operational flexibility of future low-carbon energy systems.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

## Betekenis voor TKI-Gas:

Voor de systeemintegratiefunctie van het aardgasnetwerk ook voor waterstof te versterken wordt aanbevolen een innovatie- en R&D-agenda op te stellen voor het vergroten van de waterstoftolerantie in aardgasmengsels voor onder andere gasturbines, CNG-tanks in voertuigen en andere eindgebruiksapparaten.

Ontwikkel daarnaast een lange termijn ingroei-strategie voor het stapsgewijs verhogen van waterstofconcentraties in het aardgasnet.

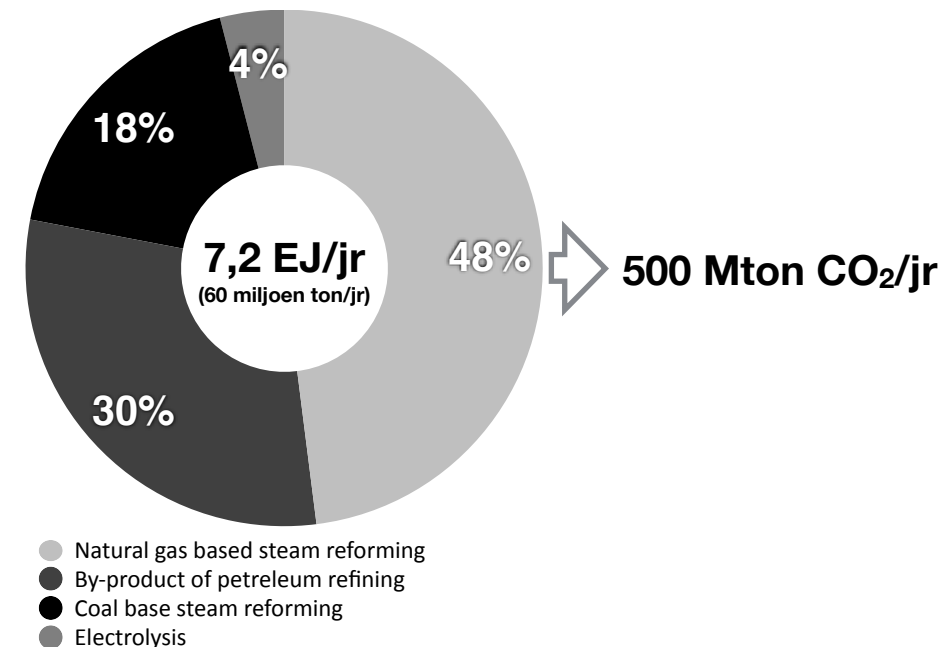
# Huidige gebruik van waterstof (2013)

## Waterstof wordt al op industriële schaal gebruikt in raffinaderijen, in de chemische sector en als industrieel gas voor verschillende toepassing

De IEA rapporteert het wereldwijde industriële verbruik van waterstof op 7,2 EJ per jaar (in 2013). Dit komt overeen met ca. 60 miljoen ton waterstof per jaar

De aan waterstof toe te rekenen CO<sub>2</sub>-emissies zijn volgens de IEA 500 miljoen ton CO<sub>2</sub>. (dit is exclusief CO<sub>2</sub>-emissies die toegerekend worden naar de eindproducten waarvoor waterstof geproduceerd werd. Dit komt overeen met ca 70 gCO<sub>2</sub>/MJ industrieel waterstof.

De jaarlijkse hoeveelheid industrieel waterstof dat momenteel m.b.v. elektrolyse wordt geproduceerd is 4% van 60 miljoen ton per jaar: 2,4 miljoen ton waterstof, gelijk aan 288 PJ. Dhr. Weeda van ECN merkt hierbij op dat het merendeel van deze elektrolyse-waterstof vrijkomt bij de productie van chloor uit keuzenzout. De conventionele en PEM elektrolyse van waterstof uit water is slechts weer een kleine fractie van de genoemde 4%.



Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

## Hoe verhoudt zich het wereldwijde verbruik van industrieel geproduceerd waterstof tot het energieverbruik, wereldwijd en in Europa?

### En hoe tot het energieverbruik in de Europese transportsector?

Om de productie van industrieel waterstof in perspectief te plaatsen ten opzichte van de toekomstige vraag naar waterstof in de transportsector wordt hieronder een schatting gemaakt van de mogelijke vraag naar waterstof in de Europese transportsector. Vervolgens wordt ingeschat hoe groot de productiecapaciteit, op basis van elektrolyzers zou moeten zijn. Deze wordt dan vergeleken met de capaciteit van elektrolyzers voor industrieel waterstof.

In 2013 was het mondiale energieverbruik 533 EJ (2015, BP, statistical review).

In EU was in 2012 het finale energieverbruik 46,2 EJ (2014, EC, Energy in figures).

Het energieverbruik in de EU28-transportsector bedroeg in 2012 31,8% van het totale energieverbruik, ofwel 14,7 EJ. (2014, EC, Energy in figures).

Het wegtransport bedraagt ca. 81% van het totale verbruik in de transportsector (2014, EC, Transport in figures)

In het deelrapport Brandstofafel Duurzaam waterstof (2014, onderdeel van Visie Duurzame Brandstoffenmix) wordt de ambitie uitgesproken dat in 2050 40% van de vloot in het wegverkeer uit waterstofgedreven auto's bestaat. Aangenomen wordt dat deze ambitie vertaald kan worden naar EU-28 niveau. Ook is uitgegaan van het feit dat het energierendement van waterstofvoertuigen ca. 1,5 maal het rendement van conventioneel aangedreven auto's is. Tenslotte is aangenomen dat de behoefte aan mobiliteit in 2050 onveranderd is, met enige correctie het energierendement voor inzet van waterstof.

In 2050 zou dit leiden tot een energieverbruik van waterstof inhouden van ca 3,2 EJ, ofwel 27 miljoen ton waterstof er jaar.

Zowel in Europa als in Nederland is de doelstelling dat in 2050 in de transportsector de CO<sub>2</sub>-uitstoot 60% minder is dan in 1990. Dit vereist inzet van duurzaam of klimaatneutraal waterstof, dat met behulp van elektrolyse wordt opgewekt.

Het resultaat is dat in Europa in 2050 de totale elektrolyse-capaciteit tenminste een factor factor 11 groter moet zijn dan de huidige mondiale elektrolyse-capaciteit om in Europa 40% van de vloot in het wegverkeer op waterstof te kunnen laten rijden. Volgens de opmerking van Dhr. Weeda van ECN, zie hiernaast, zou zelfs op een significant hogere factor duiden.

Voor TKI-Gas is het daarom van belang om innovaties voor elektrolyse-technologie te stimuleren. Steam-reforming van waterstof uit biomassa of steenkool/aardgas met CCUS blijft ook een mogelijke wijze van waterstofproductie.

# Huidige technologiestatus: sleuteltechnologieën voor waterstofproductie



Application	Power or energy capacity	Energy efficiency	Investment cost (USD/kW)	Lifetime	Maturity	TRL estimate
Steam methane reformer large scale	150 - 300 MW	70 - 85%	400 - 600	30 years	Mature	<b>9</b>
Steam methane reformer small scale	0,15 - 15 MW	up to 51%	3.000 - 5.000	15 years	Demonstration	<b>6</b>
Alkaline electrolyser	up to 150 MW	65 - 82% (HHV)	850 - 1.500	60.000 - 90.000 hours	Mature	<b>9</b>
Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyser	up to 150 kW (stacks) up to 1 MW (systems)	65 - 78% (HHV)	1.500 - 3.800	20.000 - 60.000 hours	Early Market	<b>7/8</b>
Solid Oxide (SO) electrolyser	Lab scale	85 - 95% (HHV)				<b>1-3</b>

## Belangrijkste bevindingen uit IEA rapport:

- Bijna de helft van de huidige waterstof wordt geproduceerd door steam reforming van aardgas.
- Omdat bij steam reforming van koolstofhoudende energiedragers de concentratie van CO<sub>2</sub> in de afvoergassen hoog is, is deze waterstofproductie tegelijkertijd interessant voor Carbon Capture and Storage (CCS), of Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS).
- Bij grootschalige waterstofproductie zijn de kosten voornamelijk afhankelijk van de prijs van aardgas. IEA schat de kosten voor waterstof in haar rapport op 0,9 US\$/kg in de VS, ca 2,2 US\$/kg in Europa en 3,2 US\$/kg in Japan
- Steam reforming kan ook op basis van andere waterstofrijk grondstoffen, zoals steenkool, biomassa (hout, maar ook vloeibare varianten als ethanol), organisch afval, of plastic, mits eerst via vergassing omgezet in gasvormige componenten. volgens studie van NREL liggen de kosten van biomassa-gebaseerde waterstof vooralsnog hoger (ca. 5,4 US\$/kg bij 1e installaties, zakkend naar mogelijk 2,3-3,4 US\$/kg) en zijn bovendien afhankelijk van variabele kosten en de onzekerheden rondom kapitaalkosten voor biomassavergassing.
- Van de elektrolyzers is de alkaline variant het meest ontwikkeld, maar met hogere kosten voor waterstof (5,0-6,1 US\$/kg). Proton Exchange Membrane en Solid oxide elektrolyzers hebben momenteel nog hogere productiekosten maar hebben meer perspectief of hogere omzettingsefficiëntie en lagere kapitaalkosten (zie volgende pagina)

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells; 2015, IEA, Technical Annex of Roadmap Hydrogen and Fuel Cells

# Elektrolyse-technologie: sleuteltechnologieën voor toekomstige waterstofproductie



IEA geeft aan dat elektrolyzers zeer flexibele vanwege het modulaire karakter van de technologie. Dit maakt el dat er moeilijker economies-of-scale mee kan worden bereikt., aangezien ook grotere eenheden gebouwd worden rondom identieke cellen en 'stacks'.

PEM en SO elektrolyzers hebben wel een groter potentieel voor toekomstige kostenverlaging voor waterstofproductie.

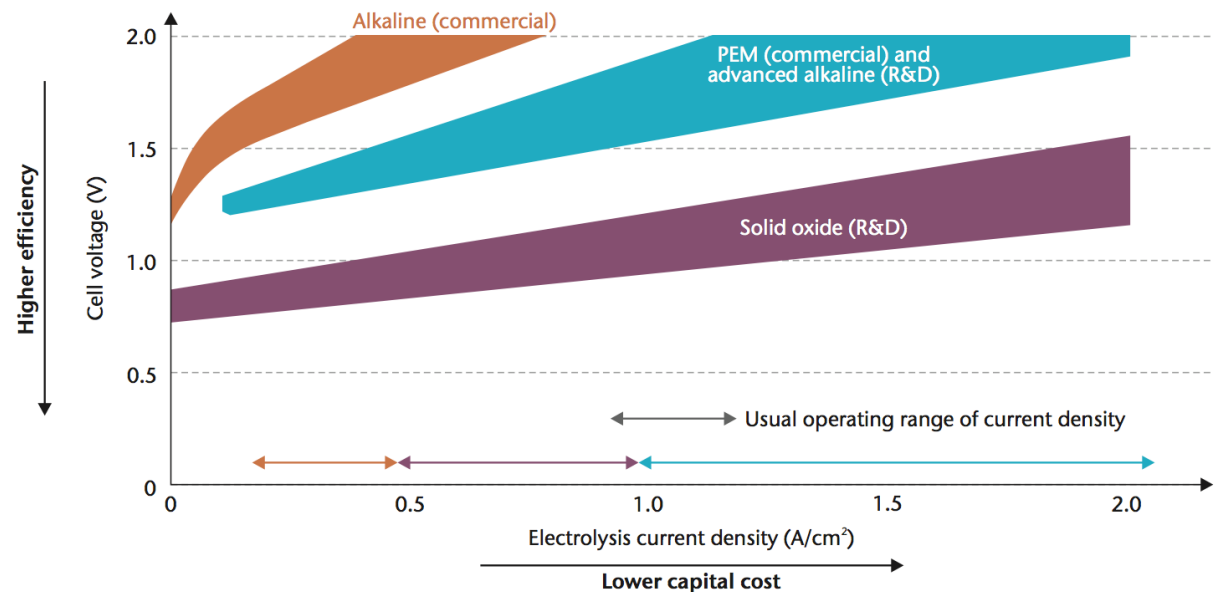
Belangrijke beperking voor de technologie is de levensduur van de elektrolyse-cel in de installatie. R&D aandacht zou zich dan ook hierop moeten richten.

De kosten van waterstof op basis van elektrolyse worden voor een groot gedeelte bepaald door de kosten van de elektriciteit en de investeringskosten van de elektrolyzers.

Om de business case van waterstofproductie uit elektrolyse rond te krijgen zal gezocht moeten worden naar zo laag mogelijke elektriciteitskosten. Daar staat onherroepelijk tegenover dat dit druk zet op de mogelijke benuttingsgraad, en schaalgrootte van een elektrolyse. een lagere benuttingsgraad leidt tot hogere investeringskosten en lagere omzettingsrendementen.

Algemeen wordt verwachting dat bij hogere aandelen hernieuwbare energie in de elektriciteitssector er meer onbalans tussen vraag en aanbod zal zijn. Op pagina 25 en 26 gaan we daar verder op in.

Figure 9: Schematic representation of technology development potential of different electrolyzers



Note: A/cm<sup>2</sup> = ampere per square centimetre.

Source: adapted from Decourt et al. (2014), *Hydrogen-Based Energy Conversion, More Than Storage: System Flexibility*.

**KEY POINT:** Although alkaline electrolyzers are a mature and affordable technology, PEM and SO electrolyzers show a greater potential to reduce capital costs and to increase efficiency.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells; 2015, IEA, Technical Annex of Roadmap Hydrogen and Fuel Cells



# Huidige technologiestatus: gebruik waterstof in transportsector



Application	Power or energy capacity	Energy efficiency	Investment cost (USD)	Lifetime	Maturity	TRL estimate
Fuel cell vehicles	80-120 kW	Tank-to-Wheel efficiency 43-60 (HHV)	60k-100k	150000 km	Early market introduction	<b>7/8</b>
Hydrogen retail stations	200 kg/day	-80%, incl compression to 70 MPa	1,5M-2,5M		Early market introduction	<b>7/8</b>
Tube trailer (gaseous) for hydrogen delivery	up to 1000 kg	-100% (without compression)	1M (1k per kg payload)		Mature	<b>9</b>
Liquid tankers for hydrogen delivery	Up to 4000 kg	Boil-off stream: 0,3% loss per day	750k		Mature	<b>9</b>

## Belangrijkste uitdagingen:

- Verlagen kosten van de brandstofcel aangedreven voertuigen door reduceren brandstofcel en vergroten van levensduur. Recent O&O let nadruk op kostenreductie van composietmateriaal voor hogedruktank voor waterstof in voertuigen
- On-site productie van waterstof bij tankstation vraagt kleinschalige electrolyse-installaties, maar vermijdt opbouw van transport- en distributieinfrastructuur
- Verbeteren van Business Case voor tankstations. afhankelijk van dagelijkse vraag naar waterstof, omvang van tankopslagcapaciteit in voertuig en wijze van toelevering of lokale productie op tankstation
- Momenteel wordt in Nederland waterstof op de beschikbare tankstations (o.a. in Rhooon) aangeboden voor 10 €/kg. Deze prijs is gebaseerd op de vergelijking met de kosten voor benzine (communicatie A. Hablé, Min IenM).

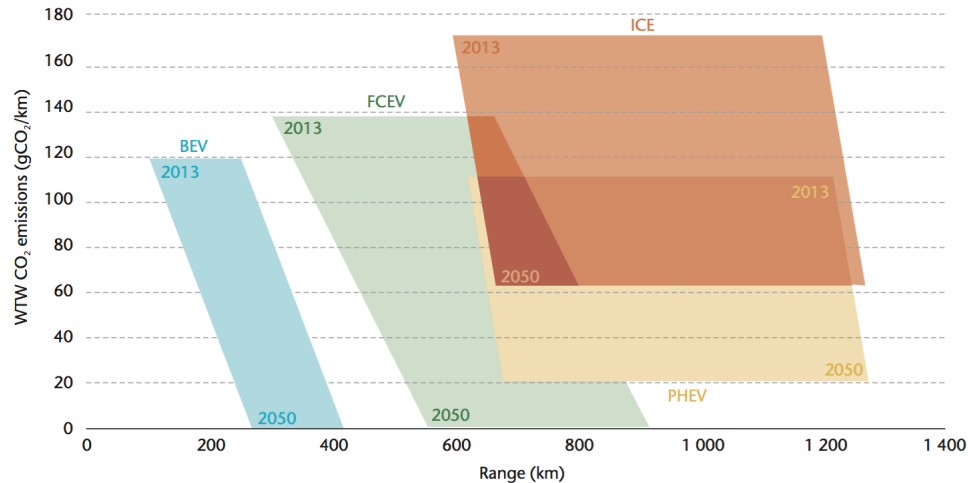
Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

# IEA voorziet voor waterstofauto's vnl. concurrentie met plug-in hybrides

## Aandacht nodig voor de claim van lage WtW CO<sub>2</sub>-emissies



Figure 2: Well-to-wheel (WTW) emissions vs. vehicle range for several technology options



Notes: gCO<sub>2</sub>/km = grams carbon dioxide per kilometre; WTW = wheel-to-wheel; the upper range of BEV emissions takes into account today's average world power generation mix, the lower range is based on 100% renewable electricity; the upper range of FCEV emissions takes into account a. hydrogen production mix of 90% NG SMR and 10% grid electricity, the lower range is based on 100% renewable hydrogen; the lower range of PHEV emissions takes into account 65% electric driving; by 2050, a biofuel share of 30% is assumed for PHEVs and ICEs.

**KEY POINT:** FCEVs can achieve a mobility service compared to today's conventional cars at potentially very low WTW carbon emissions.

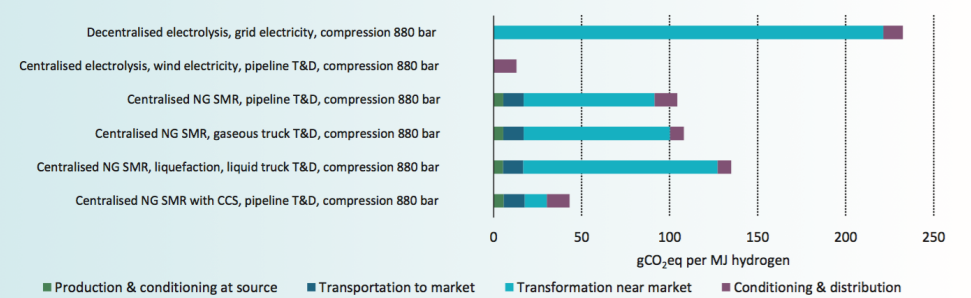
### Hoge actieradius

IEA schat in dat brandstofcel-auto's niet zozeer zullen concurreren met batterij-elektrische voertuigen maar voornamelijk met Plug-In Hybride voertuigen. Beide hebben vergelijkbare actieradius en beogen dezelfde (midden)klasse voertuigen. IEA ziet markt voor elektrische voertuigen meer voor intra-urbaan verkeer en kleinere klasse voertuigen. Qua prijsontwikkeling zullen FCEV's daarom in de buurt van PHEV's moeten komen.

Overigens is het voor de situatie in Nederland de vraag hoe de verkoop van plug-in hybrides zich vanaf 2016 zal ontwikkelen, vanwege aangepast stimuleringsbeleid voor bijtellingsvrijstelling. Dit aangepaste beleid zal naar verwachting een impuls geven aan zowel de batterij-elektrische als waterstofbrandstofcelvoertuigen.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

Figure 4: Today's carbon footprint for various hydrogen pathways and for gasoline and compressed natural gas in the European Union



Source: adapted from JRC (2013), Technical Reports – Well-to-tank Report Version 4.0 – JEC Well-to-Wheels Analysis, Joint Research Centre, Publication Office of the European Union, Luxembourg.

**KEY POINT:** Depending on the generation, T&D and retail pathway, the carbon footprint of hydrogen can vary between almost 20 and more than 230 gCO<sub>2</sub> per MJ.

### Lage WTW emissies?

Als waterstof in transport wil bijdragen aan verlagen van de WtW Co<sub>2</sub>-emissies is het nodig dat waterstof op basis van duurzame energie of fossiele brandstoffen met CCS wordt geproduceerd.

Bij elektrolyse op basis van elektriciteit uit Europese grid is de WtW emissie 230 gCO<sub>2</sub>/MJ, zoals bovenstaande figuur laat zien. voor de Nederlandse context zou dit vanwege de lagere carbon intensiteit van Nederlandse elektriciteitsopwekking, een WtW emissie van ca. 180 gCO<sub>2</sub>/MJ. Dit benadrukt de noodzaak voor een productie van waterstof uit hernieuwbare of klimaatneutrale bronnen.

De productie van waterstof uit klimaatneutrale fossiele bronnen behoeft wel aandacht vanwege de mogelijk geringe maatschappelijke acceptatie van deze optie. Technologisch gezien is CCS ook nog met onzekerheden omgeven.

# Huidige technologiestatus: integratie van variable duurzame elektriciteit in energiesysteem



Application	Power or energy capacity	Energy efficiency	Investment cost (USD/kW)	Lifetime	Maturity	TRL estimate
Power-to-power (including underground storage)	Gwh to TWh	29% (HHV, with alkaline EL) - 33% (HHV, with PEM EL)	1900 (alkaline EL) - 6300 (PEM EL) + 8 USD/kWh storage	20000 - 60000 hour (stack lifetime electrolyser(	Demonstration	5
Underground storage	Gwh to TWh	90-95%, incl. compression	8 USD/kWh	30 years	Demonstration	5
Power-to-Gas (hydrogen enriched natural gas, HENG)	Gwh to TWh	~ 73% excl. gas turbine (HHV)  ~26% incl. gas turbine (PtP)	1500 (alkaline EL) - 3000 (PEM EL), excl. gas turbine 2400 (alkaline EL) - 4000 (PEM EL), incl gasturbine (PtP)		Demonstration	5
Power-to-Gas (methanisation)	Gwh to TWh	~ 58% excl. gas turbine (HHV)  ~21% incl. gas turbine (PtP)	2600 (alkaline EL) - 4100 (PEM EL), excl. gas turbine 3500 (alkaline EL) - 5000 (PEM EL), incl gasturbine (PtP)		Demonstration	5

## Belangrijkste uitdagingen:

- Integratie van groter aandeel variabele duurzame elektriciteit vraagt om meer operationele flexibiliteit en noodzaak voor opslag van elektriciteit danwel omzetting in andere vorm van energiedrager voor gebruik elders in het energiesysteem
- Vergroten van overall energy efficiency nodig
- Langdurige beschikbaarheid van elektriciteit met lage prijs onzeker
- Reductie van investeringskosten

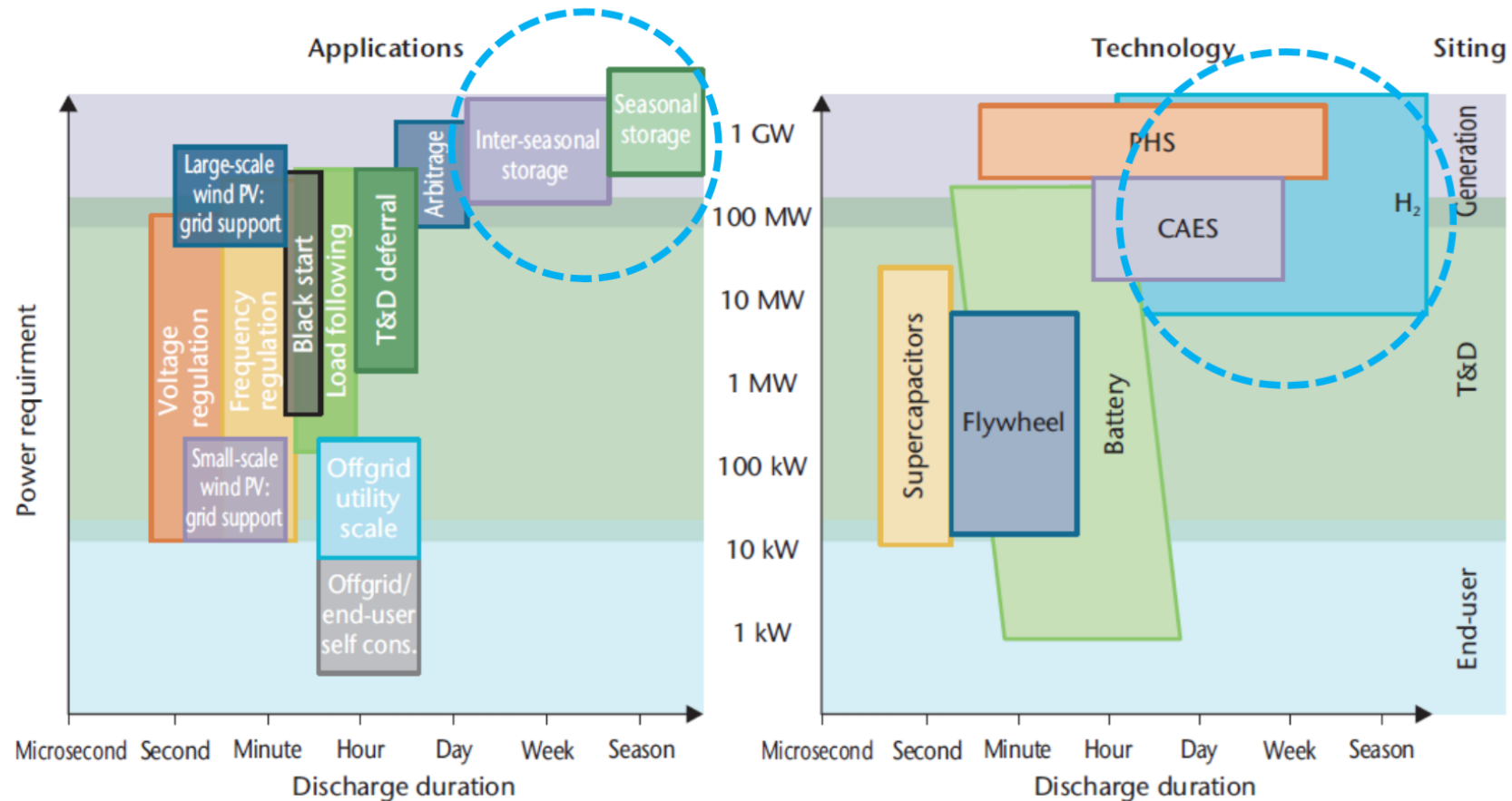
## Concurrentie in de 'PtX'-markt

Naast omzetting in waterstof zijn er andere mogelijkheden om elektriciteit op te slaan. Opslag in batterijen, in de vorm van methaan, in de vorm van methanol, of in de vorm van waterbekkens zijn allemaal mogelijke concurrenten voor waterstof. Welke optie in de nabije en lange toekomst een dominante positie zal verwerven moet zich nog uitwijzen.

Een mogelijk verbond tussen waterstof en methaan zou overigens kunnen liggen in de productie van waterstof via steam reforming van biomassa met CCS, waarbij de afgevangen CO<sub>2</sub> ingezet kan worden voor de power-to-methane route. Zo blijft het C-atoom zo lang mogelijk in het energiesysteem circuleren.

Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

# IEA over positie waterstofgebaseerde opslag van elektriciteit



Note: CAES = compressed air energy storage; PHS = pumped hydro energy storage.

© OECD/IEA 2015

## Opslag van elektriciteit via waterstof

- Opslag van elektriciteit kan geclassificeerd naar omvang input- en outputcapaciteit en duur van de opslag. IEA concludeert dat waterstoftechnologieën meest geschikt zijn voor grootschalige elektriciteitsopslag (MW-niveau) voor tijdsperiodes variërend van uren tot seizoenen (zie bovenstaande figuur).
- In Nederlandse context met aanwezige gasinfrastructuur kan power-to-waterstof waarschijnlijk niet op tegen power-to-methane, mits voldoende CO<sub>2</sub> voorhanden is.

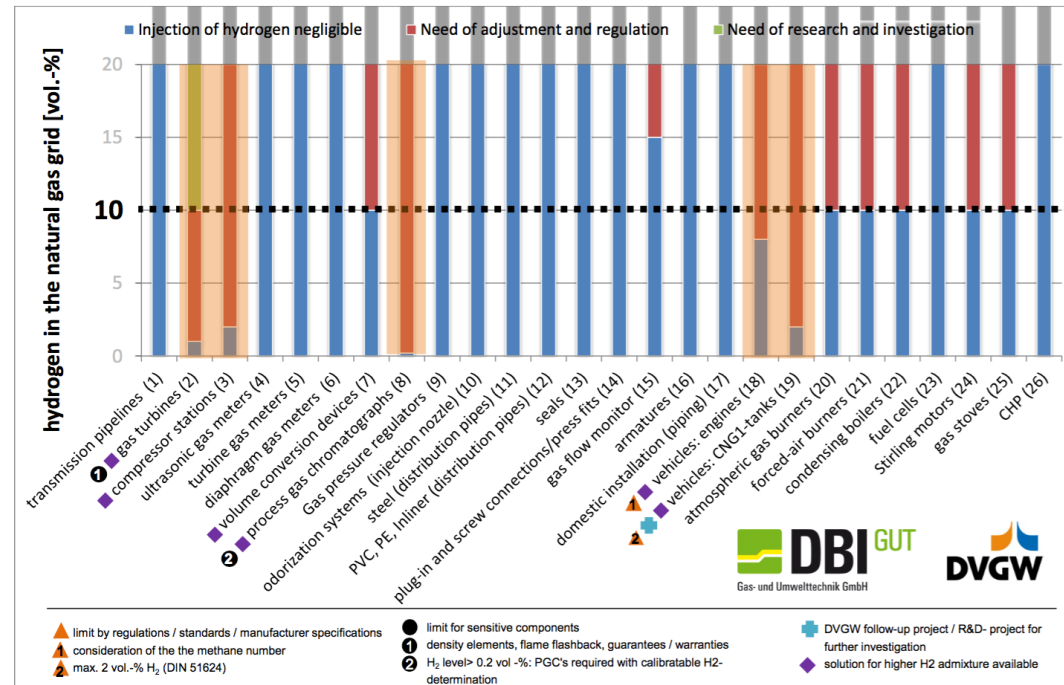
Source: 2015, IEA, Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells

# Mogelijkheden en showstoppers voor bijmenging waterstof in het aardgasnet

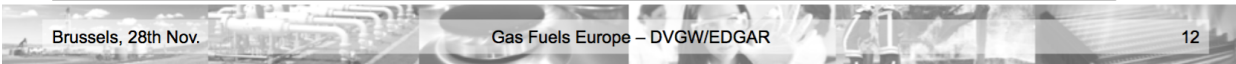
## Diverse studies hebben de afgelopen jaren de waterstof-tolerantie van het aardgasnet onderzocht

- Eind jaren 90 rapporteerde Gastec, in het kader van het GAVE-programma van Novem, voorloper van het huidige RVO, dat 5% op volumebasis bijmengen van waterstof technisch gezien mogelijk zou moeten zijn.
- In de EU-projecten 'Naturalhy' 2004-2009), 'Ameland' (2007-2011) en 'HIPS' (2011-2012) en de Duitse studie DVGW Energy Storage Concepts' (2010-2012) is naar de stand van zaken van waterstof in het aardgasnet gekeken. Uit deze studies komt oa naar voren dat (zie ook figuur hiernaast):
  - in het gaspijpleidingnet zelf géén showstoppers zijn geïdentificeerd;
  - een case-by-case evaluatie nodig is vanwege aan aangesloten eindtoepassingen in het betreffende deel van het netwerk;
  - tot 10 vol% bijmenging van waterstof over het algemeen technisch mogelijk lijkt, maar behalve bij koppeling met gasturbines, drukstations, gaschromatografen en bij toepassingen in voertuigen, zowel bij motor als in de CNG-tank. In alle gevallen is er de behoefte aan aanpassingen van de toepassingen en aan aangepaste regelgeving
  - boven de 10 vol-% bijmenging zijn er meerdere onderdelen en installaties waarvoor aanpassingen nodig zijn

## Current state of knowledge Preliminary H<sub>2</sub> tolerances results from DVGW project



[2]



## Hoeveel waterstofenergie kan er in het gasnetwerk opgeslagen?

IEA concludeert in haar rapport Roadmap Hydrogen and Fuel Cells 5 vol-% waterstof in Europese gasnetwerk ca 60 Twh aan energieinhoud van waterstof vertegenwoordigd. Dit komt ongeveer overeen met 1,8 miljoen ton waterstof op jaarbasis.

Voor een scenario met 40% van het wegverkeer op waterstof is op pagina 14 berekend dat 27 miljoen ton waterstof per jaar nodig is. Dit geeft aan dat de opslagcapaciteit in het aardgasnet relatief beperkt is. Anders gesteld: als waterstof via het aardgasdistributienet naar voertuigen zou worden 'geleid' kan maar ca. 10% van het wegverkeer waterstofaangedreven zijn.

## Opties voor de lange termijn

Dhr. Weeda van ECN geeft aan dat er alternatieven zijn voor bijmenging van aardgas twee mogelijke, langetermijn-alternatieven zijn:

- een volledig gescheiden waterstofnetwerk inbrengen in het bestaande aardgasnetwerk, waardoor de issues van verschillende concentraties waterstof en gasmengsels overkomen kunnen worden
- productie van vloeibaar waterstof, met een aan de vloeibare brandstof gelieerde T&D infrastructuur. Vloeibaar maken van waterstof kost momenteel nog veel energie: eenderde van de energie inhoud van waterstof.

Source: 2014, DBI Gut, Müller-Syring, G., HIPS Net, Establishing a European understanding of the admissible hydrogen concentration in the gas grid

# Welke lessen kunnen getrokken worden uit de UK Technology Innovation Needs Assessment voor “Hydrogen for Transport”?

In het Verenigd Koninkrijk (VK) stelt de Low Carbon Innovation Co-ordination Group (LCICG) met enige regelmaat Technology Innovation Needs Assessments (TINAs) op ter ondersteuning voor keuzes over publieke ondersteuning voor low-carbon innovaties.

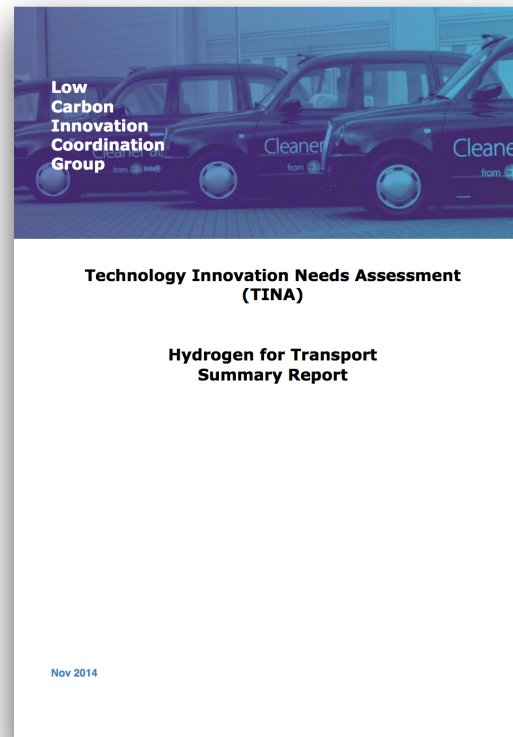
Leden van LCICG zijn de Carbon Trust, Het UK Department for Business Innovation and Skills, Het UK Department of Energy and Climate Change, het energy Technologies Institute, de Engineering and Physical Sciences Research Council, de Schotse overheid en Innovate UK.

Met de TINAs wordt beoogd om de sleuteltechnologieën te identificeren en waarderen op basis waarvan een innovatiestrategie kan worden opgesteld.

In de Hydrogen for Transport TINA wordt aangegeven dat waterstof bij kan dragen aan het decarboniseren van elke sector waar het wordt ingezet, mits op low-carbon wijze geproduceerd. Vanwege de brede potentiële inzetbaarheid is het moeilijk te voorspellen wat de precieze toekomstige rol is. De meeste waterstoftechnieken zijn nog onvolwassen, met een groot maar onzeker verbeterpotentieel. Andere low-carbon technologieën (elektriciteit, biobrandstoffen) waarmee waterstof in de nabije toekomst zal concurreren hebben eveneens een groot maar onzeker verbeterpotentieel.

Vanuit de context dat het energie systeem in het VK tussen nu en 2050 significant zal veranderen en de geconstateerde onzekerheden wordt aanbevolen om de verdere ontwikkeling vanuit een ‘hedge’ of verzekeringstrategie aan te vliegen. Voor de analyse en onderbouwing van deze strategische keuze is gekozen voor één energiesector (Transport - vanwege de industrie-momentum) en een set van waterstoftechnologieën (brandstofcelauto en enkele technologieën voor waterstofproductie en -handling nodig voor deze voertuigen). De opstellers van het rapport geven aan dat energiemodellen aantonen dat het VK, om haar 2050 carbon doelen te halen, belangrijke investeringsbeslissingen over de energie infrastructuur moet nemen in het tijdsvak 2020-2030 en dat deze besluiten het energiesysteem voor de komende decennia zal vormen.

In het VK ziet men momenteel een zeker ‘industrie-momentum’ voor waterstof in transport, waarin de uitrol van een toeleveringsinfrastructuur voor waterstof al voor 2020 wordt gestart.



In het rapport wordt voorgesteld om op dit moment een voorkeur te geven aan investering die het VK voorbereiden op het in het volgende decennium onderbouwd nemen van investeringsbesluiten over de rol van waterstof in het energiesysteem. Dit kan door het ondersteunen van in de markt brengen van waterstof, brandstofcelautos en de bijbehorende retilsystemen zodat de mogelijke lange-termijn waarde kan worden begrepen. Dit leidt er tevens toe om committent voor zeer grote infrastructurele investeringen in waterstoftechnologie uit te stellen tot meer duidelijkheid over die waarde is verkregen.

De belangrijkste conclusies van het rapport zijn:

- De meeste van de technologieën die nodig zijn voor een op waterstof gebaseerde transportsysteem zijn beschikbaar, maar nog niet volwassen of op financieel aantrekkelijk niveau;
- De belangrijkste onzekerheden voor de productie van waterstof betreffen:
  - Als elektriciteitsopwekking met CCS van de grond komt zal dit een van de goedkoopste route naar low-carbon waterstof zijn;
  - Als CCS mislukt maar waterstoftransport wel van de rondkomt is de ontwikkeling van grootschalige elektrolyzers nodig en zullen de kosten voor waterstof hoger liggen. Kleinschalige elektrolyzers zullen nodig zijn voor decentrale waterstofproductie, zeker in opstartperiode
- elektrolyzers kunnen tegelijkertijd van betekenis zijn voor het balanceren van variabele hernieuwbare energieopwekking, waardoor kosten van waterstof zouden kunnen dalen. De specifieke eigenschappen van dit type van balancering vraagt mogelijk om andere materialen in deze elektrolyzers.

## Betekenis voor TKI-Gas:

De beschikbare infrastructuur voor waterstof in het Rijnmond gebied is een belangrijke asset van waaruit een soortgelijke innovatiestrategie voor marktintroductie als in het VK opgestart kan worden. Daarbij dient we gericht gestuurd te worden op het gaandeweg verlagen van de koolstofintensiteit van het gebruikte waterstof.

# Welke lessen kunnen getrokken worden uit de UK Technology Innovation Needs Assessment voor “Hydrogen for Transport”?

## Hieruit volgen de innovatie-prioriteiten in het VK:

### • voor de korte termijn:

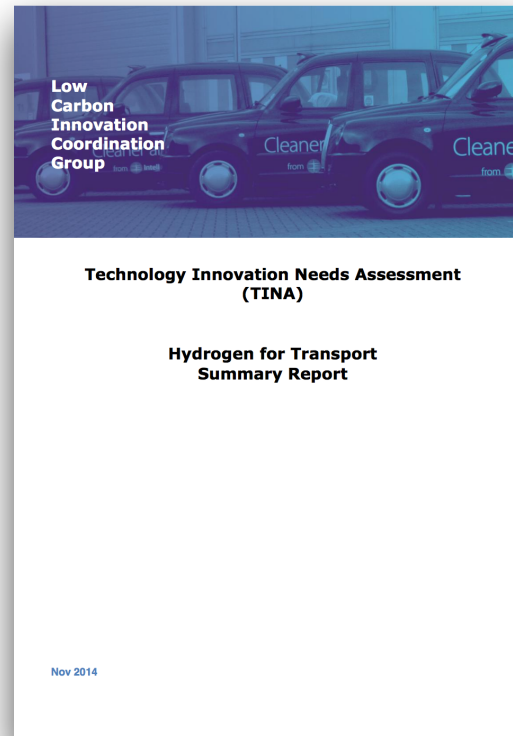
Industrialisatie van het fabricageproces van brandstofcelauto's en het verbeteren van de waarschijnlijkheid van een succesvolle uitrol:

- Meer FCEV om economies of scale te bereiken;
- Doel om 70% reductie in voertuigkosten te bereiken tot ca 30k€ per voertuig;
- Succesvolle uitrol is afhankelijk van betrouwbare en betaalbare technologieën voor de toeleveringsketen van waterstof.

### • voor de lange termijn:

Investeren in next-generation technologie-ontwikkeling om kosten in latere decennia te minimaliseren en het VK een sterke concurrentiepositie op te leveren:

- Grootste kans op lagere TCO van een FCEV liggen in lagere voertuigkosten en lagere waterstofkosten. Hier verwacht het rapport ook de grootste reductiemogelijkheden;
- Op termijn kostenreductie nodig in brandstofcel, de integratie met de elektrische aandrijving en in waterstofopslag. Hier is publieke ondersteuning gewenst;
- Innovatie in elektrolyse-technologie nodig om hogere efficiency, schaal,temperatuur en druk te bereiken;
- Als waterstof op termijn vnl. gebaseerd is op elektrolyse wordt de prijs van elektriciteit bepalend voor waterstofproductie. De ontwikkeling van elektrolyse linkt waterstof in transport met het elektriciteitssysteem.
- Als waterstof op termijn vnl. gebaseerd is op elektrolyse wordt de prijs van elektriciteit bepalend voor waterstofproductie. De ontwikkeling van elektrolyse linkt waterstof in transport met het elektriciteitssysteem. De ontwikkeling van CCS wordt van invloed geacht voor de waterstof in transport route. Geschat wordt dat de prijs van waterstof aan de pomp in een 'CCS-scenario' 30% lager ligt dan in een 'zonder CCS' scenario.



## Groene-groei mogelijkheden:

Het VK hoopt er op met actieve ondersteuning op korte en lange termijn internationale investeringen naar het VK te trekken:

- In de komende jaren zullen er relatief weinig waterstofautofabrieken nodig zijn en men hoopt naar het VK te kunnen halen;
- Daarvoor is op korte termijn nodig om:
  - Bekend te worden als een van de eerste landen met een succesvolle uitrol van waterstof voor transport;
  - Innovatieondersteuning voor de marktintroductie van een compleet waterstoftransportsysteem;
  - Ondersteunen van procesinnovatie om van lab-schaal naar fabriekshal te ontwikkelen (autofabrikanten);
- Op lange termijn vergroten exportkansen van 'made in UK' goederen en diensten en produceren van meer home-made fuels:
  - Op basis van 1<sup>e</sup> waterstoffabrieken zijn er mogelijkheden voor verdere innovaties voor een voertuig-aanleverende industrie in het VK en voor waterstofproductie;
  - De positie van het VK in windenergie maakt het goed geschikt voor toekomst waterstofproductie of energieopslag.

## Betekenis voor TKI-Gas:

Deze VK-aanpak kan leidend zijn voor de innovatie-agenda:

- volg nauwlettend de voortgang van technologie-ontwikkeling (met name elektrolyzers) in de waterstof-voor-transport route en vertaal deze naar commerciële betekenis voor de gas(infrastructuur)sector
- verken de mogelijkheden van inpassing van geproduceerd waterstof in gassysteem
- haak aan zodra de technologie-ontwikkeling van elektrolyzers near-to-market toepassing van waterstof als vorm van energieopslag concurrerend maakt met andere Power-to-X toepassingen

# (Inter)nationale netwerken - welke Nederlandse bedrijven zijn actief en op welke onderwerpen?

## Nationaal Waterstof Platform

Voorjaar 2015 zijn de initiatieven genomen voor de oprichting van het Nationaal Waterstof Platform met als doel het professioneel organiseren van de Nederlandse waterstofketen. Met een bundeling en versterking van losse initiatieven, het opereren als één aanspreekpunt van de waterstofketen voor de overheid wil het Platform een krachtig (inter)nationaal signaal afgeven dat Nederland zich positioneert als koploper op waterstof.

De oprichters zijn:

- Deltalinqs Energy Forum
- Havenbedrijf Amsterdam
- Groningen Seaports
- Energy Valley
- Zero Emission busvervoer
- Platform toekomstbestendige mobiliteit en
- NWBA (Nederlandse Waterstof Brandstofcel Associatie)

Naast bovenstaande organisaties hebben de volgende (industriële) Founding Fathers zich aan het Platform verbonden:

- Shell, Air Liquide, AkzoNobel, Air Products, Linda Gas, Gasunie, GDF Suez, Tata Steel, Schiphol, Stedin-Eneco, VDL, Waterstofnet, Vopak, Hyundai, Toyota, Daimler, Total, Gasterra en LNG24.

er worden vier werkgroepen ingericht:

- Duurzame waterstofeconomie
- Infrastructuur en marktontwikkeling waterstof voor mobiliteit
- Ontwikkeling trucks, bestelwagens en specials
- Bussen

Uit de informatie van het platform valt op te maken dat de komende jaren de nadruk ligt op het opdoen van ervaring met marktintroductie en uitrol van waterstofvoertuigen en bestaande tankinfrastructuur (om haalbare business cases te bereiken) en de mogelijkheden in het medium-duty, heavy-duty en OV-segment te verkennen.

Deze technologie-push oriëntatie komt overeen met de aanbevelingen uit de Technologie Innovation Needs Assessment om op korte termijn te onderzoeken of de marktbeloftes waargemaakt kunnen worden, waarna in het volgende decennium besluiten over infrastructurele investeringen beter gemaakt kunnen worden.

## IEA Hydrogen Implementing Agreement

De Hydrogen Implementing Agreement dat onder de vlag van het Internationaal Energy Agentschap opereert is een samenwerkingsverband tussen 40 landen.

Nederland neemt al geruime tijd deel aan dit samenwerkingsverband. RVO coördineert n opdracht van het ministerie van Economische zaken de IEA-HIA activiteiten

De operationele werkgroepen (Tasks) waar Nederland bij betrokken is zijn:

- Task 28: Large Scale Hydrogen Delivery Infrastructure - Marcel Weeda, ECN, task leader (looptijd task: 2015)
- Task 30: Power to Gas - Marcel Weeda, ECN, betrokken bij task definition (2015)
- Task 32: Hydrogen based storage - De Jongh, RUU (2015)
- Task 33, Local Hydrogen Supply for Energy Application, HyGear (2013-2016)
- Task 34: Biological Hydrogen for Energy and Environment, Stams, WUR (2014-2017)
- Task 35: Renewable Hydrogen Production, Smith, Dam, TU Delft (2014-2017)

De nadruk in IEA Implementing Agreements ligt over het algemeen op samenwerking en uitwisseling van Onderzoek en Ontwikkelingsresultaten. Deelname door bedrijven wordt nagestreefd. HyGear is een bedrijf uit Arnhem dat o.a. systemen voor lokale waterstofproductie op de markt brengt.

## HIT Hydrogen Infrastructure for Transport

[www.hit-tent.eu](http://www.hit-tent.eu)

Het Hydrogen Infrastructure for Transport (HIT) project beoogt het stimuleren van de uitrol van een waterstoftankinfrastructuur for brandstofcelauto's langs de TEN-T corridor. Het HIT project ontwikkelt een Synchronised Implementation Plan (SIP) voor de uitrol van waterstof vulstations langs de eerste 'corridor van Gotenburg naar Rotterdam met de bouw van drie pilot stations in Nederland en Denemarken wordt de technologie gedemonstreerd.

Onder coördinatie van het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Milieu, en implementation door Rijkswaterstaat werken 7 partners samen: Air Liquide, AFHYAC (French National Association for Fuel Cells and Hydrogen), Copenhagen Hydrogen Network (CHN), HyER (the European Association for Hydrogen, fuel cells and Electromobility in European Regions), Hydrogen Link Denmark, and Hydrogen Sweden.



# Subsidieregelingen voor brandstofcellen en waterstof \*)

## • FCH-JU: Fuel Cell and Hydrogen - Joint Undertaking

Belangrijkste EU subsidie-programma voor onderzoek en ontwikkeling (O&O) inzake waterstof en brandstofcellen:

- Vastgesteld in 2008, vernieuwd in 2014;
- Door industrie geleid initiatief;
- Doel is om waterstof en brandstofcellen commercieel haalbaar te maken;
- Coördinatie van nationale en internationale activiteiten om zo technologische en niet-technologische barrières te slechten;
- Financiering komt via Horizon 2020, budget ca. € 700 miljoen voor 2014-2020 periode. Co-financiering is een voorwaarde. 2015 budget is € 125 miljoen;
- deelname mogelijk voor industriële partijen, kennisinstellingen en andere op innovatie gerichte organisaties;
- In TSE-tender Systeemintegratie kunnen in de hoofdlijnen 'P2X' en 'Opslag' O&O-projecten van samenwerkingsverbanden op het gebied van waterstof worden ingediend. 2015-budget is € 2,3 miljoen;
- Ook de TSE-haalbaarheidstudies Systeemintegratie staan open voor waterstof. 2015-budget is € 0,75 miljoen. Per studie max. € 50k beschikbaar;
- de TSE-tender IDEEGO ondersteunt O&O projecten die conceptueel onder Systeemintegratie vallen, maar 'achter de meter' betreffen. Projecten met waterstof in de gebouwde omgeving met regionale/lokale oriëntatie kunnen hier gebruik van maken. Budget in 2015 is € 4,6 miljoen;
- Kabinet en regio's stellen in 2015 gezamenlijk ruim € 50 miljoen beschikbaar voor de MkB-innovatiestimulering Regio en Topsectoren. Waterstof-initiatieven kunnen gebruiken maken, zowel onder de vlag van topsector Energie als Chemie.
- SBIR's (Small Business Innovation Research) die zich focussen op het efficiënt omgaan met variabele gaskwaliteit staan open voor innovaties in gebruiksmateriaal om hogere H<sub>2</sub>-tolerantie te bereiken. 2015 budget is € 2 miljoen.
- De DEI-regeling (Duurzame Energie Innovatie) staat open voor waterstofdemonstratieprojecten, mits ze energie besparen of onderdeel zijn van een energiebesparend of duurzaam-energieconcept. Budget in 2015 is € 34 miljoen.
- MIA/VAMIL kent de volgende categorieën: (i) waterstofafleverstation, (ii) noodstroomvoorziening met brandstofcelsysteem, (iii) kleinschalige stoomreformen voor H<sub>2</sub>-productie op basis van biogas/biobrandstof
- De Energie Investerings Aftrek (EIA) kent een categorie 'brandstofcelsystemen'.

## Betekenis voor TKI-Gas:

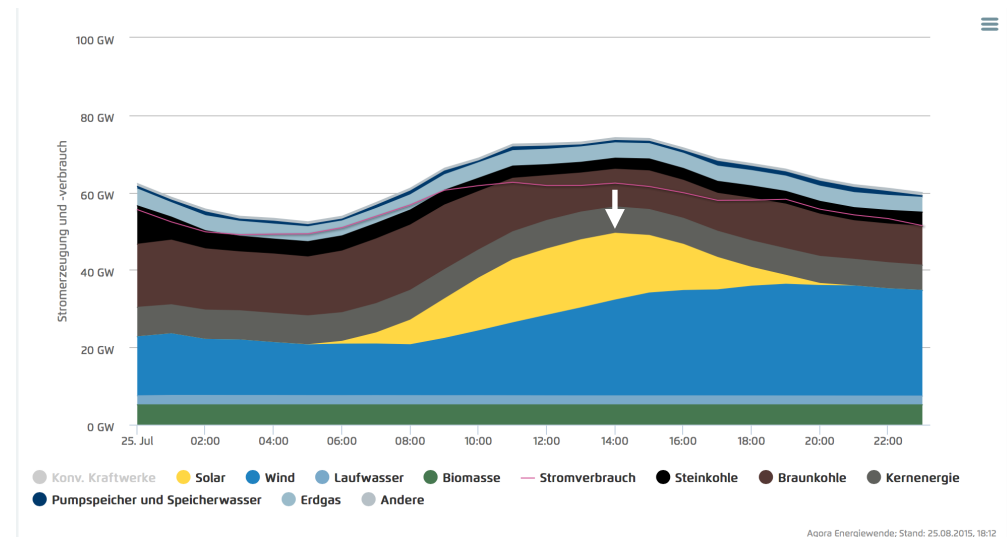
Er zijn veel mogelijkheden voor waterstof om ondersteuning te verkrijgen voor onderzoek en ontwikkeling voor waterstof gerelateerde projecten. Vooral in Europese is in omvang relevante ondersteuning te vinden. Daar zijn ook de internationale netwerken waar aansluiting moet worden gezocht om de strategische functie van het gassysteem te borgen.

Voor TKI Gas is het van belang om in een aparte programmalijn Waterstof de toegang tot de beschikbare middelen te faciliteren voor projecten met waterstof als centrale focus, met name die projecten die aansluiten bij de 'gas'assets, goed gepositioneerd te krijgen bij de toekenning van ondersteuningsmiddelen.

# Praktijkvoorbeeld van onbalans tussen vraag en aanbod in een internationale elektriciteitsmarkt: een juli-dag in Duitsland

## Wat gebeurde er in week 30, 2015 in Duitsland:

- op zaterdag van week 30 was er een groot aanbod van zowel windenergie als zonne-energie.  
Op de websites [energy-charts.de](http://energy-charts.de) en [agora-energiewende.de](http://agora-energiewende.de) wordt in visuals aangegeven hoe stroomproductie is opgebouwd en afgezet tegen de vraag naar elektriciteit (zie rode lijn in figuur rechts).
- Op zaterdag 25 juli werd in de middag rond 14u 79% van de Duitse-stroomvraag voorzien door duurzame bronnen (zie witte pijl in grafiek rechts). De resterende elektriciteit kwam van (gedeeltelijk al afgeschakelde) conventionele opwekking, die groter was dan in Duitsland nodig. Het surplus werd geëxporteerd - o.a.naar Nederland.
- Tegelijkertijd importeerde Duitsland op dezelfde dag, in de ochtend, nucleaire elektriciteit van Frankrijk, omdat die voor een lage prijs beschikbaar was (zie oranje kolommen in grafiek hiernaast) (Bron:
- Internationale import- en exporthandel tussen Europese landen zal naar verwachting van invloed zijn en blijven op de business case van power-to-gas mogelijkheden zijn



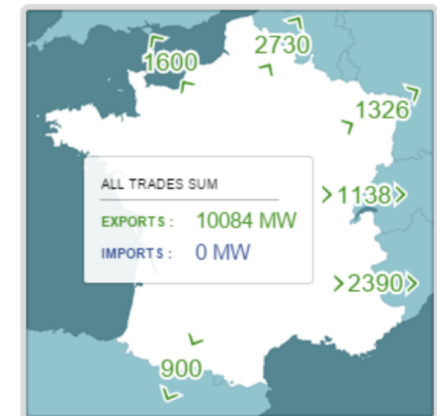
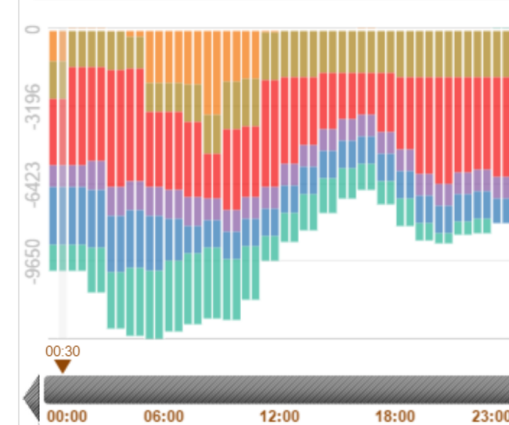
## Commercial electricity exchanges for the date:

Saturday, July 25 2015

HIDE TRADING MAP

MINIMUM

MAXIMUM



1326<sup>MW</sup>

EXPORTS  
GERMANY

1600<sup>MW</sup>

EXPORTS  
ENGLAND

2730<sup>MW</sup>

EXPORTS  
BELGIUM

900<sup>MW</sup>

EXPORTS  
SPAIN

2390<sup>MW</sup>

EXPORTS  
ITALY

1138<sup>MW</sup>

EXPORTS  
SWITZERLAND

## Betekenis voor TKI-Gas:

- Volg nauwlettend de voortgang van technologie-ontwikkeling (met name elektrolyzers) in de waterstof-voor-transport route en vertaal deze naar commerciële betekenis voor de gas(infrastructuur)sector
- Verken de mogelijkheden van inpassing van geproduceerd waterstof in gassysteem
- Haak aan zodra de technologie-ontwikkeling van elektrolyzers near-to-market toepassing van waterstof als vorm van energieopslag concurrerend maakt met andere Power-to-X toepassingen

# Hoe groot is het aandeel hernieuwbare energie in elektriciteit?

De EU lidstaten presteren zeer verschillend met betrekking tot het aandeel hernieuwbare energiebronnen in de productie van elektriciteit in hun land. Tweejaarlijks rapporteert de Europese Commissie over de voortgang op de 2020-doelen aangaande het aandeel hernieuwbare energie in het totale eindverbruik, de CO<sub>2</sub>-emissie reductie en de energie-efficiëntie.

Nederland scoort over het algemeen ondergemiddeld op deze indicatoren. In de figuur hiernaast is aangegeven wat het aandeel hernieuwbare bronnen in de bruto elektriciteitsproductie was in de verschillende lidstaten. Nederland bereikt in 2012 net iets meer dan 10%, terwijl EU gemiddeld al ruim boven de 20% zit.

In sommige EU-lidstaten is inmiddels een veel hoger aandeel hernieuwbare energie in de elektriciteitssector gangbaar. Oostenrijk bijvoorbeeld zat in 2012 op ca. 65% en Zweden was runner-up met 60%. De helft van de hernieuwbare elektriciteit is momenteel afkomstig van waterkracht. Deze bron zal naar verwachting niet meer sterk groeien. Verdere groei zal dus moeten komen van de meer variabele hernieuwbare energiebronnen als wind en zon. Inzet van biomassa zou overigens weer van betekenis zijn als basislastvervanger van steen- en bruinkool.

In de figuur rechtsonder is aangegeven hoe in de periode van 2004 tot 2013 het aandeel van hernieuwbare elektriciteit zich heeft ontwikkeld (zie X-as - gegevens zijn afkomstig uit Eurostat). Op de Y-as staat de ontwikkeling van de koolstofintensiteit van het totale energieverbruik in een lidstaat (ton CO<sub>2</sub>-emissie per ton of oil equivalent energieverbruik). Deze gegevens zijn afgeleid uit de meest recente BP Statistical Review.

Uit de figuur valt af te leiden dat Nederland zich in de achterhoede van Europa bevindt. Voor een ontwikkeling naar duurzaam/klimaatneutraal geproduceerd waterstof dat een verbindende rol kan spelen tussen de verschillende energiesystemen (elektriciteit, transport, gasnetwerk) is het voor Nederlandse organisaties en bedrijven van belang aan te sluiten bij internationale consortia. Landen waar nauwere samenwerking mee gezocht kunnen worden zijn bijvoorbeeld Duitsland, Zweden en Denemarken.

Andere landen waarmee een verbinding kan worden gelegd zijn landen waar een gasdoorvoerinfrastructuur is aangelegd, en waar ook al een hoog aandeel duurzame elektriciteit wordt geproduceerd, zoals bijvoorbeeld Roemenië, waar het aandeel hernieuwbare elektriciteit 37% bedraagt.

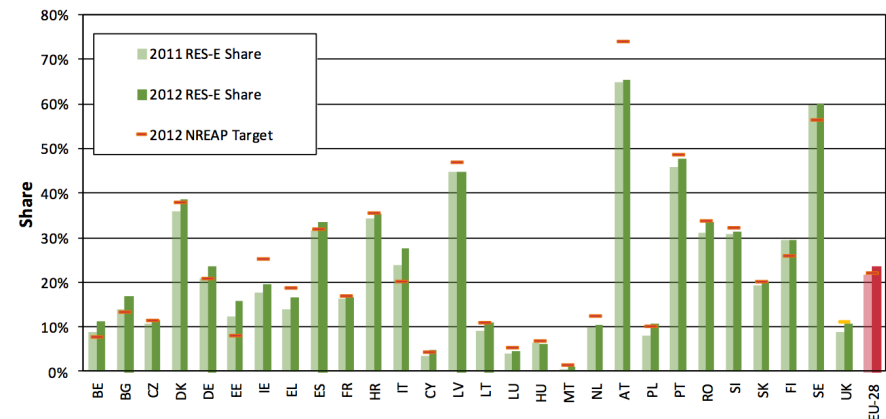
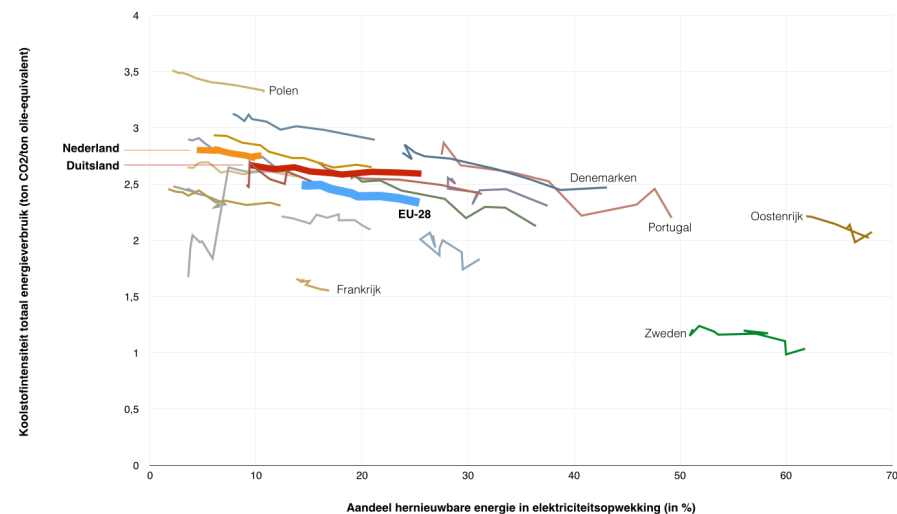


Figure 6. RES-E actual share vs. NREAP indicative target in 2012 (%). Source: Eurostat and NREAPs. Eurostat actual shares are estimated for MT.

Source: Ecofys, 2014, PREBS report

## Ontwikkeling van koolstofintensiteit energieverbruik en aandeel hernieuwbare energie in elektriciteit in EU28 (2004-2013)



# Huidige technologiestatus: brandstofceltechniek in gebouwen



Application	Power or energy capacity	Energy efficiency	Investment cost (USD/kW)	Lifetime	Maturity	TRL estimate
Fuel cell micro co-generation	0,3 - 25 kW	Electric: 35-50% (HHV)  Co-generation: up to 95%	< 20.000 (home system, 1kW <sub>e</sub> )  < 10.000 (commercial system, 25 kW <sub>e</sub> )	60.000 - 90.000 hours	Early market introduction	<b>7/8</b>

## Belangrijkste bevindingen:

- In Japan zijn sinds 2009 met behulp van overheidsondersteuning meer dan 120 duizend aardgas-gestookte brandstofcelssystemen voor gebruik in huishoudens in de markt gezet.
- De systemen hebben een groot verschil nodig tussen lokale aardgasprijs en de stroomprijs (spark-spread) om financieel uit te kunnen.
- Voor verdere uitrol is verdere kostenverlaging nodig is, ondanks een sterke leercurve (-15% bij verdubbeling aantallen)
- IEA verwacht geen grote kostenreducties meer omdat de kosten voor de brandstofcel zelf maar 15% van de totale kosten van de installatie uitmaken
- Uit de rapportage valt op te maken dat IEA deze toepassingen minder van betekenis vind dan de toepassing van waterstof in, vooral, de transportsector en als opslag voor surplus elektriciteit

## Waterstof in nichemarkten:

- IEA stipt nog kort enkele nichemarkten aan waar waterstof-gebaseerde toepassingen bestaan:
  - brandstofcel aangedreven vorkheftrucks
  - autonome stroomvoorzieningen voor stationaire of draagbare off-grid toepassingen
  - back-up stroominstallaties

# EU omschrijving van Technology Readiness Levels

Technology Readiness Level	Description
1	Basic principles observed
2	Technology concept formulated
3	Experimental proof of concept
4	Technology validated in lab
5	Technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
6	Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
7	System prototype demonstration in operational environment
8	System complet and qualified
9	Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

Source: 2013, European Commission, Horizon 2020 Workprogramme 2014-2015, Part 19, General Annexes

# Afkortingen

CCS:	Carbon Capture and Storage
CCUS:	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CO <sub>2</sub> :	Kooldioxide
DEI:	Duurzame Energie Innovatie regeling
H <sub>2</sub> :	Waterstof
HIT:	Hydrogen Infrastructure for Transport
IEA:	Internationaal Energie Agentschap
IEA-HIA	IEA Hydrogen Implementing Agreement
LCICG:	Low Carbon Innovation Co-ordination Group
NL:	Nederland
NWP:	Nationaal Waterstof Platform
O&O:	Onderzoek en ontwikkeling
PEM:	Proton Exchange Membrane
SBIR:	Small Business Innovation Research
SO:	Solid Oxide
TINA:	Technology Innovation Needs Assessment
TKI-Gas:	Topconsortium voor Kennis en Innovatie voor Gas
VK:	Verenigd Koninkrijk

# Geraadpleegde literatuur en experts

Altfeld, K., Pinchbeck, D., The European Gas Research Group, Admissible Hydrogen Concentrations in Natural Gas Systems, 2013 (?)

BP, Statistical Review 2014, Londen, VK, 2015

DBI Gut, Gas- und Umwelttechnik GmbH, Müller-Syring, G. HIPS Net, Establishing a European understanding of admissible hydrogen concentration in the gas grid, Presentation at Gas Fuels Europe, Brussels, Belgium, 28 November 2014

EC, European research shows that hydrogen energy could reduce oil consumption in road transport by 40% in 2050, press release, 2008

EC, Renewable Energy Progress Report, 2015, Brussel, België

ECN, DNV-GL, Exploring the role for power-to-gas in the future Dutch energy system, Petten, Nederland, 2014

Ecofys et. al, Renewable Energy Progress and Biofuels sustainability Report, for EC DG Energy, 2014

Eurogas, Statistical Report 2013, Brussel België, 2014

Eurostat, share of renewable electricity in gross electricity production in EU Member States, 2015

Everts, E., RVO, mondelinge en schriftelijke informatie, augustus 2015

Gigler, J., TKI-Gas, Mondelinge en schriftelijke communicatie, juli-september 2015

Hablé, A., Ministerie van Infrastructuur en Milieu, mondelinge informatie, juli 2015

HIT, Hydrogen Infrastructure for Transport, Towards a comprehensive hydrogen infrastructure for fuel cells electric cars in view of EU GHG reduction targets, 2014

IEA International Energy Agency, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, Paris, France, 2015

Körner, A., IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, Technical Annex, Paris, France, 2015

Laak, W. van der, Waterstofnet, mondelinge informatie, september 2015

Low Carbon Innovation Coordination Group, Technology Innovation Needs Assessment, Hydrogen for Transport, Summary Report, Londen, VK, 2014

Nationaal Waterstof Platform, leaflet, 2015

TKI-Gas, Met gas naar een klimaatneutraal energiesysteem, Innovatie- en Kennisagenda Gas 2016-2019, Amersfoort, 2015

Visie Duurzame Brandstoffenmix, Deelrapport Brandstofafel Duurzaam Waterstof, 2014

Weeda, M., ECN, mondelinge en schriftelijke informatie, augustus 2015