

5. Projectsamenvatting

5.1 Inleiding (openbaar)

Primaire aanleiding voor het project is de klimaatwetgeving Parijs 2015. Om de overeengekomen doelstellingen te behalen gaat waterstof een belangrijke rol spelen. Deze haalbaarheidsstudie richt zich op de toepassingen en gebruikers kant, en niet op de distributie kant. Er zijn twee mogelijkheden voor waterstof in voertuigen: 1) brandstofcel, 2) in de verbrandingsmotor.

De huidige maak-industrie is voor de tweede mogelijkheid het best ontwikkeld. Met verbrandingsmotoren is veel meer ervaring dan met fuel cells in de industrie. Waterstof in de verbrandingsmotor zou een versnelling kunnen betekenen van deze toepassing in de praktijk. In het belang van versnelling van de uitrol van infrastructuur is het goed dat de potentiële toepassingen in aantal toenemen.

5.2 Doel (openbaar)

Het doel van het project is om voor de verbrandingstoepassing te onderzoeken welke verbrandingsvorm het best geschikt is voor twee verschillende scenario's: de variabele snelheid toepassing, en de vaste snelheid toepassing. Grofweg komt dit neer op een onderscheid in toepassing op de weg versus toepassing op een vaste locatie, denk aan generator sets, waar de motor een vast werkpunt heeft. In het

project wordt de technische haalbaarheid van verschillende concepten, als functie van de tijd onderzocht. Tevens zal een korte marktverkenning worden uitgevoerd om vast te stellen hoe groot het potentieel is van de scenario's.

De scope van het project is beperkt tot zwaar transport (Heavy Duty toepassingen) en andere grote motoren.

5.3 Werkwijze (openbaar)

Het project is volgens plan uitgevoerd. Potentiële verbrandingsconcepten voor waterstof zijn geïdentificeerd op basis van literatuur, basisberekeningen en gesprekken met verbrandingsdeskundigen uit industrie en kennisinstellingen (met name TNO (Powertrains) en de Technische Universiteit Eindhoven (Werktuigbouwkunde, Power and Flow)). Praktische aspecten van de toepassing van waterstof in een verbrandingsmotor zijn in kaart gebracht door gesprekken met experts van TNO en industrie, o.a. NPS Diesel en opnieuw literatuur. Data vanuit literatuur is waar mogelijk ondersteund met berekeningen om aanwezige potentieel en limieten te kwantificeren. Hierbij moet o.a. worden gedacht aan het kwantificeren van zelfontstekingsgedrag en bepaling van de haalbare compressieverhouding als cruciale factor voor rendement. Wanneer waterstof zeer arm wordt verbrand heeft waterstofverbranding het potentieel om hoge efficiëntie te combineren met extreem lage motor-uit emissies zodat geen uitlaatgasnabehandelingstechnologie nodig is om aan huidige wetgeving (EURO VI, Stage V) te voldoen. Het realiseren van deze verbranding met hoge luchtvermaat heeft significante impact op het luchtpad (turbocharger, EGR, vuldruk) van de motor. Ook hier is a.h.v. berekeningen het aanwezige potentieel in kaart gebracht. Hierbij is de huidige stand der techniek voor dieselmotoren als uitgangspunt genomen voor de bepaling van de systeemgrenzen zoals bijv. de maximaal mogelijke vuldruk en in-cilinder druk.

Uitgevoerde activiteiten op hoofdlijnen:

- 1) Literatuurstudie, marktverkenning, gesprekken met experts en instellingen
- 2) Inventariseren van het potentieel van bestaande en nieuwe gas motorconcepten
- 3) Het rangschikken van de verwachte tijdpaden van de motorconcepten

5.4 Conclusies (openbaar)

De belangrijkste conclusies vanuit dit project kunnen als volgt worden samengevat:

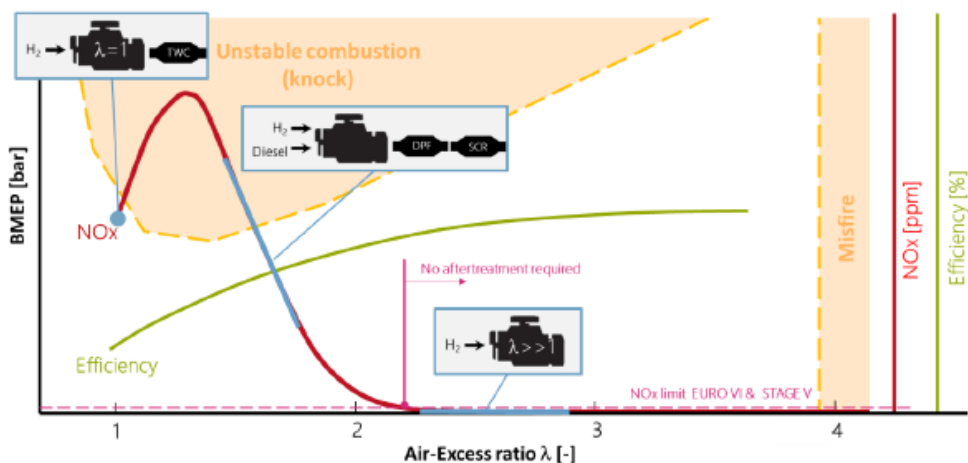
- 1) Waterstof heeft een groot potentieel als duurzame brandstof voor heavy duty applicaties
 - Geen CO₂ emissies, 100% waterstofverbrandingsconcepten zijn haalbaar
 - Motorrendementen gelijk aan dan wel potentieel hoger dan huidige diesel verbrandingsmotor
 - Potentieel voor extreem lage motor-uit emissies (NO_x, deeltjes) waarbij er geen noodzaak is voor toepassing NO_x nabehandeling
 - Gebaseerd op bestaande en bewezen motorentechnologie. Gebaseerd op de kosten van de benodigde technologie hoeft de waterstof verbrandingsmotor niet duurder te zijn dan de huidige dieselmotor. Met name het wel of niet noodzakelijk zijn van uitlaatgasnabehandeling heeft grote invloed op de systeemkosten.
 - De Interne verbrandingsmotor is meer tolerant aangaande waterstof brandstof kwaliteit. In verbrandingsonderzoeken wordt typisch gewerkt met een zuiverheid van 99.9% ("standaard trailer kwaliteit 3.0"). Dit is een significant lagere kwaliteit dan momenteel

wordt toegepast voor onderzoek/toepassing waterstof brandstofcellen waar een minimale zuiverheid van 99.999% ("kwaliteit 5.0") wordt gehanteerd.

- Bij toepassing van port fuel injection zal de vermogensdichtheid lager zijn dan die van de huidige dieselmotor. Een reductie van ~20 – 30% in vermogensdichtheid mag hier verwacht worden. De vermogensdichtheid is sterk afhankelijk van het gebruikte verbrandingsconcept. Het efficiënt kunnen toepassen van uitlaatgasrecirculatie (EGR) en ontwikkeling van (hoge druk) directe injectie waterstoftechnologie kunnen het verlies van vermogensdichtheid beperken. Dit heeft verder onderzoek.

De onderstaande figuur geeft een overzicht van verschillende waterstof verbrandingsmotor concepten en indicatie van motor-uit NOx niveau c.q. noodzaak voor uitlaatgasnabehandeling. De concepten welke als meest haalbaar zijn geïdentificeerd zijn (in willekeurige volgorde):

- 100% waterstof, stoichiometrische motor met vonkontsteking en nabehandeling in de vorm van 3-weg katalysator
- Dual-fuel waterstof/diesel, motor met compressie-ontsteking en "standaard" diesel uitlaatgasnabehandelingstechnologie (DPF en SCR)
- 100% waterstof, lean-burn motor met vonkontsteking zonder uitlaatgasnabehandeling



Naast deze 3 concepten is er een vierde concept geïdentificeerd dat als veelbelovend toekomstig concept (> 2030) wordt beschouwd. Dit concept is de waterstof-Argon verbrandingsmotor met directe waterstof- en zuurstof injectie. Het gebruik van Argon in plaats van lucht heeft het potentieel om een rendement > 60% te realiseren. Hiermee overtreft het systeem huidige technologieën voor vermogensopwekking zoals de brandstofcel (rendement ~60%) en gasturbines (rendement ~50 – 60%). Omdat er geen stikstofhoudende lucht wordt gebruikt, is de NOx emissie voor dit concept gelijk aan 0. De uitlaatgassen bevatten alleen water en argon. Door condensatie kan het water gescheiden worden van de Argon zodat de Argon weer hergebruikt kan worden. Het betreft hier dan ook een gesloten systeem.

De onderstaande figuur toont een overzicht van enkele karakteristieke aspecten per motor concept. De huidige diesel motor is genomen als referentie.



*EAS = Engine Aftertreatment System (uitlaatgasbehandeling)

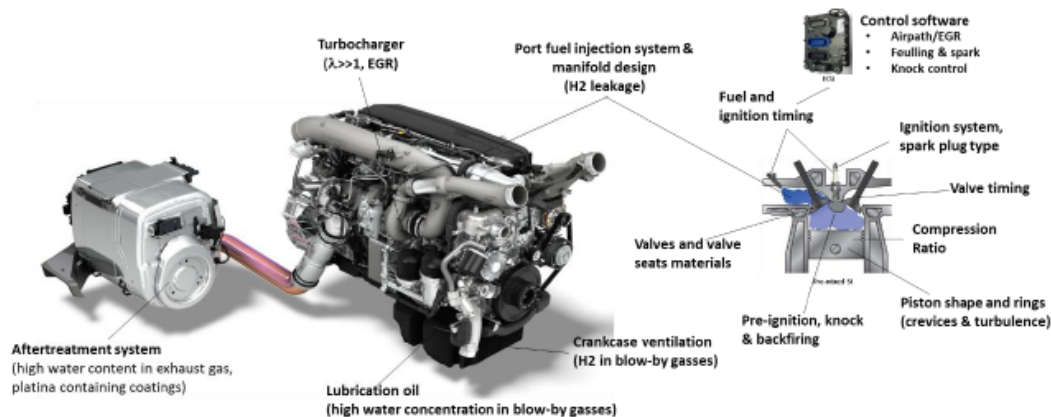
Bovenstaande tabel geeft voor ieder concept een inschatting van het haalbare rendement (best point) en vermogensdichtheid. Daarnaast is de noodzaak voor uitlaatgasbehandeling aangegeven als bepalend onderdeel voor de totale systeemkosten. De thermische belasting is gebruikt om een indicatie te geven van de robuustheid van het concept. Uit het bovenstaande overzicht kan worden afgeleid dat het motorconcept met $\lambda \gg 1$ (lean burn) zonder uitlaatgasbehandeling een groot potentieel heeft.

De beperkende factoren ("limits") welke bepalend zijn voor het maximale rendement en de vermogensdichtheid zijn tevens aangegeven in het overzicht. De concepten met vonkontsteking en verbranding middels vlamvoortplanting zijn allen gelimiteerd door het optreden van vroegtijdige zelf-ontsteking, zgn "kloppen" (Engels: knock). Tevens zal de hoge verbrandingssnelheid van waterstof resulteren in snelle drukstijgingen (dpdca). De maximaal toelaatbare snelheid van drukstijging wordt bepaald door de constructie van de motor en gewenst maximale geluidsniveau. Voor de concepten waarin een grote overmaat lucht wordt toegepast ($\lambda \gg 1$, lean burn) zal de gevoeligheid voor "klop" lager zijn, maar zal de vermogensdichtheid eerder begrenst worden door de maximaal toelaatbare in-cilinder druk.

2) In de uitgevoerde haalbaarheidsstudie is o.a. geïventariseerd welke specifieke aanpassingen er benodigd zijn aan een huidig motorplatform om deze geschikt te maken voor waterstof. Hierbij zijn een aantal belangrijke aandachtsgebieden geïdentificeerd welke ook bepalend zullen zijn voor de benodigde ontwikkelinspanning:

- Luchtpad (inlaatspruitstuk, turbocharger, EGR systeem)
- Brandstofsysteem (H₂ injectoren, voorkomen van H₂ lekkage)
- Verbrandingssysteem (compressieverhouding)
- Uitlaatgasbehandeling (hoge water content uitlaatgas, gebruik platina in katalysatoren)
- Gebruikte materialen (voorkomen van corrosie door waterstof en hoge waterconcentratie in de verbrandingsgassen)
- Motorbesturing (luchtpad (o.a. inlaathrottle, EGR systeem, turbo), timing vonkontsteking, knock control)
- Veiligheid (voorkomen "backfiring", H₂ lekkage van injectoren en H₂ accumulatie in carter)

In bovenstaande is uitgegaan van een 100% waterstofmotor met vonkontsteking. Onderstaande figuur geeft een samenvattend overzicht.

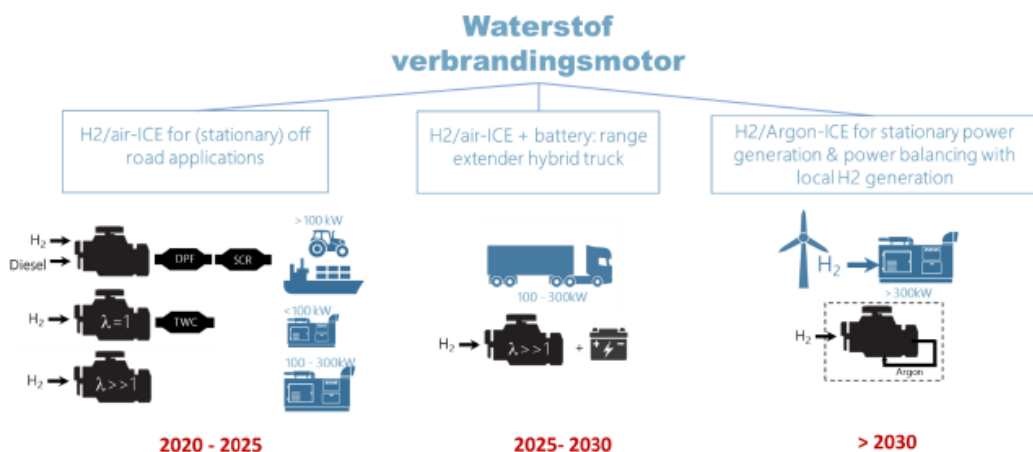


3) Voor ieder van de geïdentificeerde mogelijke verbrandingsconcepten is de benodigde ontwikkeltijd om tot toepassing in de markt te komen in kaart gebracht. Om resultaten te kwantificeren is gebruik gemaakt van de "Technical Readiness Level" TRL. Belangrijkste conclusies uit deze analyse zijn:

- De conventionele dual fuel diesel-waterstof verbrandingsmotor met een waterstofaandeel van maximaal ~30% is haalbaar op meest korte termijn (TRL ~7-8). Benodigde aanpassingen t.o.v. huidige dieselmotoren zijn relatief beperkt. Er kan hierbij bijv. gebruik worden gemaakt van reeds bewezen diesel nabehandelingstechnologie (DPF en SCR). Toepassing voor met name off-road applicatie in schepen en tractoren wordt hierbij voorzien.
- Het 100% waterstof verbrandingsmotorconcept dat haalbaar is op meest korte termijn is de stoichiometrische ($\lambda=1$) verbrandingsmotor met vonkontsteking (TRL ~7). Toepassing is voorzien voor grotendeels stationaire energievoorziening (aggregaten en generatoren) met kleinere vermogens (< ~100kW). De thermische belasting is relatief hoog in dit concept. Motor-uit NOx emissies zijn hoog maar kunnen worden door bewezen Drie-weg-katalysator technologie worden gereduceerd tot onder de huidige meest strenge wetgevinglimieten (NRMM Stage IV).
- De lean burn ($\lambda > \sim 2.2$) 100% waterstofverbrandingsmotor met vonkontsteking heeft groot potentieel m.b.t. combineren van hoog rendement (minimaal gelijk aan huidige dieselmotor) en zeer lage motor-uit emissies (EURO VI haalbaar zonder uitlaatgasnabehandeling). Dit concept bevindt zich nog in de ontwikkelfase (TRL ~5). Een eerste toepassing is voorzien voor stationaire vermogensopwekking (aggregaten, generatoren). Deze stationaire toepassing kan gezien worden als een eerste stap richting meer transiente applicaties.
- Overige – meer geavanceerde – (lage temperatuur) verbrandingsconcepten zoals RCCI, HCCI, dual fuel liquid spark, spark-assisted compression ignition, bevinden zich in de (academische) onderzoeksfase of staan aan het begin van de ontwikkelfase (TRL ~3 – 4/5).

- 4) De uitgevoerde marktverkenning heeft geresulteerd in 3 verschillende scenario's voor de waterstofverbrandingsmotor. In deze scenario's zijn het verbrandingsmotorconcept, de beoogde applicaties en realistische tijdspad tot marktintroductie aan elkaar gekoppeld.
- 1) 2020-2025, Waterstof verbrandingsmotor voor stationaire off-road applicatie
 - 2) 2025-2030, Hybride waterstof verbrandingsmotor in combinatie met batterij als range-extender voor truck toepassing. Dynamisch gedrag van de motor wordt belangrijker en deze motor kan dan ook worden gezien als een doorontwikkeling van de stationaire toepassing voor 2020-2025. In 2025-2030 tijdvenster wordt de eerste toepassing van deze 100% waterstof motor met voorontsteking en overmaat lucht ($\lambda >> 1$) verwacht in een on road applicatie. Doel is hierbij een systeem zonder uitlaatgasbehandeling en met toepassing van directe injectie van waterstof voor maximaliseren van de vermogensdichtheid.
 - 3) > 2030, Waterstof-Argon verbrandingsmotor voor grote stationaire vermogenopwekkingsinstallaties. Windenergie of zonne-energie kan worden omgezet in elektriciteit naar de grid/toepassing en opgeslagen worden in waterstof moleculen. Wanneer er niet genoeg wind of zonne-energie voorradig is of de vraag naar elektriciteit is te groot, dan kan de waterstof gebruikt worden in deze H2-Argon verbrandingsmotor om de gevraagde hoeveelheid elektriciteit te leveren, zogenaamde "peak shaving" of ookwel "power balancing". Dit geldt zowel voor een over- als ondercapaciteit van de electriciteitsvoorziening.

De onderstaande figuur geeft een samenvattend overzicht van deze 3 scenario's.



5.5 Aanbevelingen (openbaar)

Er is verder onderzoek nodig om het aanwezige potentieel van de waterstof verbrandingsmotor te realiseren. Dit vraagt om zowel meer fundamenteel onderzoek als ook om toegepast onderzoek en ontwikkeling. Fundamenteel onderzoek zal leiden tot de introductie van verbrandingsconcepten met hoog rendement en zeer lage emissies. Op kortere termijn is meer toegepast onderzoek & ontwikkeling nodig om de haalbare concepten om te zetten in toepassingen in de markt. Hiervoor is de ontwikkeling van demonstrators essentieel.

6. Publicaties

Link naar on-line seminar "Opties voor waterstof in transport" inclusief opgenomen livestream en alle presentaties in pdf format: <https://platformduurzamebiobrandstoffen.nl/brandstoffen-en-motoren-fuels-and-engines/2020-seminar-hydrogen-in-transport/>