



Education in Hydrogen Technologies Area

WATERSTOF VOOR INTERNE VERBRANDING MOTOREN



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

INHOUD

INHOUD	2
INLEIDING	3
1 GESCHIEDENIS	4
2 HET WATERSTOFGAS	8
3 REFUELING	12
3.1 TANKEN IN UW EIGEN WONING	14
3.2 BENZINE EN DIESEL.....	15
HET VIERTAKTPRINCIPE IN EEN OTTO- EN DIESELMOTOR	17
4.1 DE OTTO-MOTOR	18
4.1.1 SLAG 1. DE INLAAT SLAG.....	18
4.1.2 SLAG 2. DE COMPRESSIE SLAG.....	19
4.1.3 STROKE 3. DE KRACHT SLAG	19
4.1.4 SLAG 4. DE UITLAAT SLAG.....	19
4.3.1 SLAG 1. DE INLAAT SLAG.....	20
4.3.2 SLAG 2. DE COMPRESSIE- SLAG	20
4.3.3 STROKE 3. DE KRACHT SLAG	20
4.3.4 SLAG 4 DE UITLAAT SLAG	21
5 HOE WERKT WATERSTOF IN EEN VERBRANDINGSMOTOR?	21
5.1 HET OMBOUWEN VAN EEN VERBRANDINGSMOTOR OM OP WATERSTOF TE LOPEN.....	22
5.1.1 STAP 1	22
5.1.2 STAP 2	23
5.1.3 STAP 3.....	24
5.2 TWEË VERSCHILLENDE MANIEREN OM DE MOTOR VAN WATERSTOF TE VOORZIEN	24
6 DE ONDERZOEKSFASE	26
6.1.1 WATERSTOF PORT FUEL INJECTION, PFI	27
6.1.2 HOMOGENE LADINGCOMPRESSIEONTSTEKING, HCCI	27
6.1.3 BRANDSTOFINJECTIE MET VONKONTSTEKING:.....	28
6.1.4 WAAKVLAMONTSTEKING MET WATERSTOFINJECTIE AAN DE POORT	29
6.1.5 WATERSTOFVERBRANDING MET DIRECTE INJECTIE	29
6.1.6 GLOEIBOUGIE ONTSTEKING.....	30
6.1.7 VONKONTSTEKING MET BOUGIE	30
6.1.8 DUAL-FUEL HOGE DRUK DIRECTE INJECTIE MOTOR MET COMPRESSIEONTSTEKING.....	31
6.2 VOOR- EN NADELEN VAN DE VERSCHILLENDE METHODEN.....	32
6.3.1 ELEKTROHYDRAULISCH GEACTIVEERD (NTSEL).....	33
6.3.2 SOLENOÏDE-GEACTIVEERD (WESTPORT).....	34
6.3.3 PIËZO-AANGEDREVEN (WESTPORT)	34
7 CONCLUSIES	34
8 REFERENTIES	37
9 BEELDEREFERENTIES	39
10 AFKORTINGEN	41

Ondersteund door de Europese Unie. De standpunten en meningen zijn echter uitsluitend die van de auteurs en komen niet noodzakelijkerwijs overeen met die van de Europese Unie of het Uitvoerend Agentschap voor onderwijs en cultuur (EACEA). Noch de Europese Unie, noch het EACEA kan verantwoordelijk worden gehouden.

Het voortdurende energiedebat, vanwege de milieuvernietiging die rechtstreeks verband houdt met het gebruik van de bekende fossiele brandstoffen, heeft ertoe geleid dat wij gedwongen zijn nieuwe energiebronnen te vinden. Alle fossiele brandstoffen, zoals alle olie en aardgas die uit de grond komen, bevatten koolstof, dat bij verbranding verandert in koolstofdioxide. Alles wat koolstof bevat en we vervolgens op verschillende manieren verbranden, leidt ertoe dat we de uitstoot van koolstofdioxide niet verminderen, maar in de meeste gevallen juist verhogen.

Met een wereldwijd toenemende bevolking groeit de behoefte aan transportmiddelen voor particulieren, bedrijfsvoertuigen, scheepvaart en vliegtuigen. Hierdoor neemt de behoefte aan brandstof voor deze groeiende vloot toe. Met andere woorden, met een grotere wereldbevolking neemt ook de behoefte aan brandstof toe. De laatste tijd wordt steeds duidelijker dat onze manier van leven het klimaat beïnvloedt. In sommige delen van de wereld leidt klimaatverandering tot droogte en enorme bosbranden, terwijl andere delen worden getroffen door enorme regenbuien die tot overstromingen leiden. Op verschillende plaatsen in de wereld wordt onderzoek gedaan en nieuwe technologieën voor al deze vervoermiddelen staan bovenaan de agenda. Er is onderzoek gedaan naar alternatieve brandstoffen en sommige zijn al in gebruik, andere bevinden zich nog min of meer in de projectfase. De elektrificatie van verschillende soorten voertuigen is iets wat we steeds meer zien, maar deze voertuigen zijn nog relatief duur en misschien nog niet voor iedereen toegankelijk, de actieradius van deze voertuigen is ook nog niet helemaal gelijk aan die van traditionele benzine- en dieselveertuigen. Bovendien wordt de productie van elektriciteit ook niet altijd volledig milieuvriendelijk opgelost. Andere brandstoffen die kunnen worden genoemd zijn biobrandstoffen, dat zijn restproducten uit ons huishoudelijk afval en de landbouw. Alcohol of ethanol is een brandstof die al geruime tijd bestaat als aanvulling op auto's die op benzine rijden. Koolzaadolie is ook een alternatief voor fossiele brandstoffen. Geen van deze alternatieve brandstoffen verhoogt de uitstoot van koolstofdioxide, maar houdt deze op een neutraal niveau. Ze maken deel uit van de natuurlijke cyclus.

Waterstof is in verschillende perioden van onze wereldgeschiedenis onderzocht. Een relevante vraag is waarom het onderzoek op bepaalde momenten lijkt te zijn gevorderd en vervolgens is vertraagd om later weer op te starten. Waterstofvoertuigen die op zogenaamde brandstofcellen rijden, beginnen in sommige delen van de wereld te verschijnen, hoewel niet zo gangbaar als personenauto's in Zweden. Maar in het openbaar vervoer, zoals het busverkeer, zie je ze hier en daar een beetje opduiken. Zelfs vandaag kun je nog geen auto of vrachtwagen kopen met een verbrandingsmotor die op waterstof loopt, maar sommige fabrikanten zijn dicht bij een voltooid voertuig.

1 GESCHIEDENIS

Dit hoofdstuk vertelt in het kort de geschiedenis van waterstof, vanaf de 18e eeuw tot nu. U leert over enkele vroege uitvindingen van waterstofverbrandingsmotoren en ideeën die vandaag de dag nog steeds relevant zijn bij de ontwikkeling van waterstof.

SLEUTELWOORDEN:

geschiedenis van waterstof, auto, Rivaz.

STUDIEVRAGEN

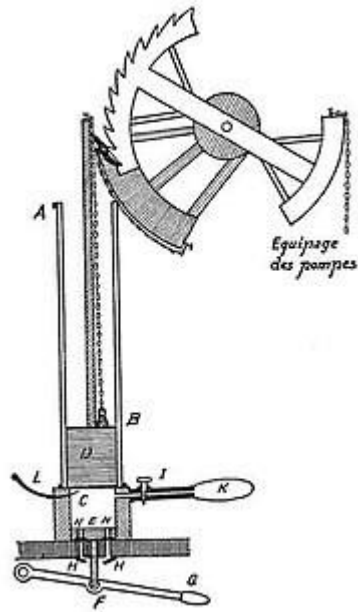
1. Wie was de man die als eerste een functionele verbrandingsmotor had?
2. Wat dwong de snelle verandering in het brandstofgebruik in Leningrad 1941?
3. In welk opzicht was 1966 een succesvol jaar wat betreft de ontwikkeling van waterstof?

We weten dat er al in 1700 pogingen werden ondernomen om zelfrijdende koetsen uit te vinden, zonder gebruik te maken van een paard als vervoermiddel. De Fransman Cugnot bouwde een door een stoommachine aangedreven rijtuig, met als doel een kanon voor het leger te vervoeren. Deze zelfrijdende koets kreeg de naam automobiel van het Griekse woord autos dat zelf betekent en het Latijnse woord mobilis dat bewegen betekent. Helaas eindigde het allemaal erg abrupt. Cugnot's koets reed tegen een muur en werd totaal vernietigd.

Als je de geschiedenis over motoren leest, zie je dat Nicolaus Otto de uitvinder was van, naar verluidt, de eerste motor met een interne verbrandingskamer. De dieselmotor werd uitgevonden door Rudolf Diesel; hij gaf ook de naam aan de brandstof. Dit alles vond plaats ergens in het midden van de jaren 1800, helaas is het moeilijk om precies te weten wanneer de uitvinding werd gepatenteerd. Otto was de eerste met de moderne verbrandingskamer motor in 1876, maar zelfs daarvoor vond Etienne Lenoir rond 1860 met succes een verbrandingskamer motor uit voor commercieel gebruik. Met dit alles in gedachten was een heer genaamd Francois Isaac de Rivaz nog eerder dan Étienne, Rudolf en Otto.¹ Hij werd geboren in Frankrijk

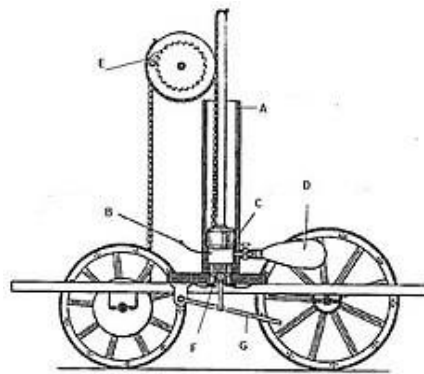
¹(Wikipedia, 2019)

1752 en verhuisde later naar Zwitserland waar hij uitvinder en politicus werd. Begin 1800 had Francois een primitieve motor klaar.



Eerste versie van de motor van de Rivaz (Plaatje 1)

Even later had hij ook een paardloze koets, waarin hij nog een van zijn motoren plaatste, waarvan werd beweerd dat het de eerste verbrandingsmotor ter wereld was die een auto aandreef. En rond 1809, reisde hij rond het meer van Genève.



Een van Rivaz's vroege wagens (Plaatje 2)

Maar Francois was waarschijnlijk te vroeg voor zijn tijd, want weinigen geloofden in hem, en beweerden dat zijn uitvinding nooit zou kunnen concurreren met de stoommachines. Maar wat Francois als brandstof gebruikte was geen diesel of benzine, hij gebruikte waterstof.

We gaan een halve eeuw vooruit, 1860, en een andere uitvinder, een Fransman met de naam Etienne Lenoir, ontwikkelde de Hippomobiel met drie wielen. Lenoirs Hippomobiel werd aangedreven door een één cilinder tweetaktmotor. De waterstof werd geproduceerd door water te elektrolyseren, en het gas werd naar de motor gevoerd.

De volgende waterstofauto in de rij werd uitgevonden in Noorwegen in 1933, toen het Noorse energiebedrijf Norsk Hydro een kleine vrachtwagen ombouwde. De vrachtwagen was uitgerust met een ammoniak omzetsysteem die waterstof produceerde die vervolgens naar de motor met interne verbrandingskamer werd gevoerd.



Eerste tot waterstof omgebouwde vrachtwagen in Noorwegen (Plaatje3)

In 1941, toen de wereld in oorlog was, had het Duitse nazileger Leningrad omsingeld, waardoor de benzine voor de militaire voertuigen langzaam opraakte. Het gebrek aan benzine dwong tot "nieuwe" uitvindingen. Daarom bouwde de Russische Boris Shelishch 200 GAZ-AA vrachtwagens om op waterstof, waarbij bleek dat ze schoner brandden en langer reden dan die op benzine. Om de een of andere reden zijn alle gedetailleerde documenten over waterstof als brandstofalternatief na de Tweede Wereldoorlog op mysterieuze wijze verdwenen, en ze zijn nog steeds zoek.

1959 Harry Karl Ihrig paste een Allis-Chalmers landbouwtractor aan om het eerste brandstofcelvoertuig in de geschiedenis te creëren. Brandstofcellen zullen hier niet worden beschreven, alleen wordt erop gewezen dat er zo vroeg in de geschiedenis een voortdurende parallelle ontwikkeling plaatsvond in deze beide wegen naar alternatieven voor fossiele brandstoffen.

2

²(National Museum of American History, n.d.)



Harry Karls Ihring brandstofceltrekker (Plaatje 4)

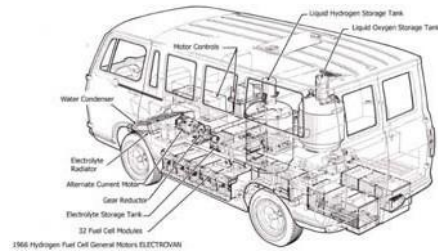
1966 was een succesvol jaar voor waterstof, zowel voor verbrandingsmotoren als voor waterstof voor brandstofcelvoertuigen. Roger Billings gaf een nieuw licht op de waterstofbrandstof en bouwde een gewone Ford model-A vrachtwagen om, om op waterstof te rijden in zijn normale benzinemotor.³



Roger Billings waterstof omgebouwde model A, 1966 (Plaatje 5)

In datzelfde jaar creëerde General Motors de GM Electrovan brandstofcelauto, die door velen wordt erkend als de eerste brandstofcelpassagiersauto.

³Roger Billings (Billings, 2013)



GM's eerste brandstofcelwagen uit 1966 (Plaatje6)

Sindsdien is de ontwikkeling van zowel waterstof in verbrandingsmotoren als brandstofcelvoertuigen vooruitgegaan.

2 HET WATERSTOFGAS

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van waterstofgas en een van de productieprocessen zonder ecologische voetafdruk en presenteert verschillende soorten voertuigen op waterstof. De productie van waterstofgas wordt in een andere module nader toegelicht.

KEYWORDS:

productie van waterstofgas, gewichtsverhouding, door waterstof aangedreven schepen, electrofuel.

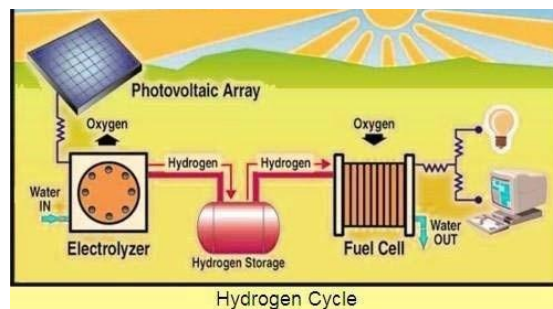
STUDIEVRAGEN

1. Wat is de gewichtsverhouding tussen lucht en waterstofgas?
2. Geef een voorbeeld van waar waterstof uit geraffineerd kan worden?
3. Wat voor soort voertuigen/vaartuigen zouden mogelijk zijn voor het gebruik van waterstof?

Waterstofgas is het lichtste van alle elementen in het heelal, het is ongeveer 14 keer lichter dan lucht en dat betekent dat de waterstof zich bij een lek zeer snel verspreidt. Waterstof bestaat uit twee waterstofatomen en heeft daarom de chemische aanduiding H_2 . Het is kleurloos, reukloos, niet giftig en dan nog licht ontvlambaar. Waterstof is de meest voorkomende chemische stof in het heelal en maakt ongeveer 75% uit van alle normale materie. Op aarde is het aanzienlijk zeldzamer, slechts 0,15% van de massa, het wordt gebonden gevonden in verschillende vormen van materie, bijvoorbeeld in water, H_2O .

Productie van waterstof

De eerste gedocumenteerde keer dat waterstof kunstmatig werd geproduceerd was aan het begin van de 16e eeuw met zuren die reageerden op verschillende metalen. Tegenwoordig zijn er een aantal manieren om waterstof te produceren, de verschillende manieren hebben meer of minder invloed op het milieu, en er wordt voortdurend gewerkt aan een zo groen mogelijke productie. Wat we vandaag weten dat het beste is voor het milieu is als je zonne-energie of windturbines kunt gebruiken, maar zelfs deze methoden hebben een zeker negatief effect op het milieu.⁴



Waterstof geproduceerd door zonne-energie (Plaatje7)

Hier zal slechts één van de manieren zeer vereenvoudigd worden uitgelegd. Je kunt zeggen dat het zo gebeurt dat je de zuurstof en de waterstof van elkaar scheidt. Dit gebeurt door het water op te laden met elektriciteit. Zout water is een voordeel om te gebruiken omdat het elektriciteit beter geleidt, het kan ook genoemd worden het splitsen van het water. Wat er dan gebeurt is dat er zuurstof en waterstofgas uitkomt, maar gescheiden van elkaar. In dit hoofdstuk zullen we niet te veel ingaan op hoe de productie zelf gaat, behalve dat het eigenlijk thuis gedaan kan worden, als je de juiste apparatuur hebt. Tegelijkertijd moet je bedenken dat het een zeer brandbaar gas is waar je mee te maken hebt.⁵

⁴Kumar (2016)

⁵(Bureau voor energie-efficiëntie en hernieuwbare energie, 2019)

Verschillende soorten voertuigen

De ontwikkeling heeft een lange weg afgelegd en het gebruik van waterstof in alle mogelijke soorten voertuigen is vandaag de dag te zien. De meeste grote autofabrikanten over de hele wereld testen hun auto's waarbij zij motoren hebben ontwikkeld die alleen op waterstof lopen, of liever gezegd aangepast om alleen op waterstof te lopen. Wat hier moet worden toegevoegd is dat de ontwikkeling zo snel gaat dat het moeilijk is om volledig up-to-date te zijn over het onderwerp, en wat hier vandaag wordt geschreven kan morgen oud zijn. In verschillende delen van de wereld hebben bussen met succes op waterstof gereden met traditionele verbrandingsmotoren.



Een bus aangedreven door waterstof met een conventionele motor, Keyou is het bedrijf erachter (Plaatje 8)

Een van de problemen is dat de uitstoot niet volledig nul is, omdat het gehalte aan koolstofdioxide, CO, en kooldioxide, CO₂, vrijwel nihil is. Maar met het stikstofdioxidegehalte, NO_x, wordt op verschillende manieren geworsteld om het tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. Bij een verbrandingsproces wordt lucht gebruikt en de stikstof in de lucht wordt dan omgezet in stikstofdioxide, wat betekent dat deze voertuigen niet voldoen aan de eisen om te worden geclassificeerd als een voertuig met nuluitstoot, maar daar verdere ontwikkeling wordt ook hier aan gewerkt. We zullen hier later op terugkomen en uitleggen hoe we hiermee kunnen werken. Ook binnen de andere sector van de zware voertuigen wordt onderzoek gedaan naar het gebruik van waterstof als brandstof voor de reeds bestaande verbrandingsmotoren. Langeafstandsrijders die tot nu toe volledig afhankelijk waren van fossiele brandstoffen hoeven dat binnenkort niet meer te zijn.

Nu al kun je in theorie volledig fossielvrij rijden en alleen waterstof als brandstof gebruiken. De motoren hebben bewezen minstens even goed te werken op waterstof als op diesel, en het motorvermogen, het koppel en het brandstofrendement zijn net zo goed als voorheen, sommige bedrijven die zich ontwikkelen op het gebied van brandstofinjectie beweren zelfs dat hun product hogere cijfers geeft voor zowel het effect als het koppel. Bovendien worden de problemen die

eigenaars van elektrische auto's hebben met betrekking tot oplaadstations en de tijd die nodig is om op te laden volledig vermeden, want tijd is kostbaar in deze transportsector.

In de scheepvaart is het dezelfde ontwikkeling, bovendien bereik je hier een nog groter milieudoel omdat er geen beperkingen zijn op de brandstof die gebruikt wordt, er is ook geen zuivering van water uit komt, verschillende scheepvaartmaatschappijen testen vandaag al waterstof.

De luchtvaart ontwikkelt ook alternatieve bronnen van aandrijving voor vliegtuigen, en één alternatief is waterstof. Onlangs zijn succesvolle pogingen gedaan om met waterstof te vliegen, in dit geval met een mengsel van een andere brandstof, electrofuel genaamd. Elektrobrandstof is een verzamelnaam voor koolstofhoudende brandstoffen die worden geproduceerd met elektriciteit als belangrijkste energiebron. De koolstofatomen in de brandstof zijn afkomstig van kooldioxide dat wordt opgevangen uit de lucht, de zee of uit brandstofgassen van elektriciteitscentrales, je kunt het een vorm van kooldioxide-recycling noemen.



Verschillende soorten luchtvaartuigen worden getest (Plaatje 9)

Ruimteshuttles hebben ook waterstof gebruikt, maar dan in vloeibare vorm, samen met zuurstof, eveneens in vloeibare vorm. De tanks waren 15 verdiepingen hoog en bevatten 530.000 liter vloeibare zuurstof en 1,5 miljoen liter vloeibare waterstof. Deze worden vergast in een verbrandingskamer en zorgen voor de voortstuwing van de raket. Al deze hoeveelheid brandstof werd opgebruikt in 8 minuten en 20 seconden.⁶

⁶(KSC, n.d.)



Een spaceshuttle geladen met waterstof en zuurstof (Plaatje 10)

Kortom, men kan stellen dat de brandstof waterstof zeker kan worden gebruikt in min of meer alle soorten voertuigen en vaartuigen. In de sector personenauto's lijkt de ontwikkeling echter nog niet echt op gang te zijn gekomen, althans nog niet vandaag, maar er verschijnen hier en daar prototypes van diverse fabrikanten over de hele wereld.

3 REFUELING

In het volgende hoofdstuk leert u over de risico's van het tanken van waterstof. U leert ook over de voordelen in vergelijking met het opladen van elektrische voertuigen en de toekomst van waterstofbrandstof en het tanken ervan.

KEYWORDS:

tanken, potentiële risico's, benzine en diesel versus waterstof.

STUDIEVRAGEN

1. Hoe is het een voordeel om waterstof te tanken in vergelijking met het opladen van een elektrisch voertuig?
2. Waarom staat het waterstofgas onder zo'n hoge druk?
3. Wat kan een veiligheidsrisico zijn bij het tanken van waterstof?

Tanken kan vandaag, op het moment van schrijven, mei 2022, op vijf locaties in Zweden, en in Europa zijn er in totaal ca. 230 stations waar je waterstof kunt tanken. Duitsland loopt voorop met zijn 101 stations, gevolgd door Frankrijk met 41 stations, Groot-Brittannië heeft er 19, Zwitserland 12 en Nederland 11. Het gebrek aan tankstations kan alleen maar verondersteld worden dat het momenteel de ontwikkeling om over te schakelen op waterstof belemmert, maar ook hier is de ontwikkeling in volle gang.⁷



Het is duidelijk dat er veel meer tankstations met waterstof moeten komen om de ontwikkeling in een goed tempo te laten verlopen (Plaatje 11).

Het grote voordeel van waterstof tanken in vergelijking met het opladen van een elektrische auto is enorm qua tijd, het duurt niet langer dan het tanken van een benzine- of dieselauto, namelijk ongeveer 2-5 minuten, afhankelijk van de grootte van de tank. Een elektrische auto thuis opladen duurt ongeveer 8-12 uur, bij een laadstation met een zogenaamde snellader met een hoger voltage kun je dat inkorten tot ongeveer 20 minuten. Maar dan heb je nog geen volledige lading van de accu's bereikt, slechts ongeveer 80%.

⁷(Autovista SE, n.d.)

Het tanken van waterstof gebeurt vanuit een druktank bij het station in de auto, waar het ook onder druk staat. De druk in een tank van een vrachtwagen is 350 bar, in een auto is dat 700 bar. Het gas wordt onder druk gezet om meer op te vangen, maar zoals gezegd is er een constante ontwikkeling, wat betekent dat die cijfers al veranderd kunnen zijn.



Het vulmondstuk voor gas lijkt sterk op dat voor andere gassen voor voertuigen (Plaatje 12).

De risicobeoordeling dat zich bij het tanken een ongeval zou kunnen voordoen, komt aan bod in een andere module die zich juist daarop toespitst: "Laadstations". Maar door de hoge druk in de tanks is er een potentieel risico van lekkage, aangezien het gas vele malen lichter is dan lucht. De druk neemt toe, en aangezien het tanken meestal buiten plaatsvindt, neemt deze snel toe en vermengt zich met de lucht. Als het daarentegen onder een dak blijft steken en er een vorm van thermische ontbranding optreedt, is er een groot risico van een snelle brand. Het is daarom van groot belang dat er sensoren zijn die vroegtijdig kunnen waarschuwen voor gaslekken en dat de ruimten waarin zich lekken kunnen voordoen zodanig zijn uitgerust dat ventilatievoorzieningen snel kunnen worden geactiveerd.

3.1 TANKEN IN UW EIGEN WONING

Tanken bij je eigen huis zou mogelijk kunnen zijn, die vraag is echt wat onze beleidsmakers bedenken, maar het zal zeker haalbaar zijn. We kunnen nu al onze eigen elektrische auto "tanken", en ook die van anderen. Dus met de juiste apparatuur, als we milieuvriendelijk willen zijn, d.w.z. groene stroom, wat betekent zonnecellen op het dak of een windturbine, kun je je eigen waterstof produceren, het moet "alleen" gecomprimeerd worden om het in een voertuig te hebben.



Hier is een tankstation voor thuisgebruik ontwikkeld door Honda, deze voorziet het huishouden ook van elektriciteit door een brandstofcel (Plaatje 13)

3.2 BENZINE EN DIESEL

Bijna 150 jaar lang hebben we min of meer vertrouwd op benzine en diesel om onze voertuigen en vaartuigen voort te sturen op de weg, in het water en in de lucht. Eigenlijk waren er meer dan honderd jaar geleden ook andere opties die waarschijnlijk zo goed als succesvol waren. Elektriciteit, bijvoorbeeld, was ver vooruit, er bestonden meer dan 100 jaar geleden allerlei verschillende soorten elektrische voertuigen. Snelheidsrecords van meer dan 200 km/u met elektrische auto's werden in het begin van de vorige eeuw in Amerika gevestigd op de hogesnelheidsbanen. Ook stoomvoertuigen waren een optie, niet alleen treinen maar ook personenauto's. Maar wat maakte dat de benzine en de diesel het spel wonnen? Op deze vragen krijg je geen antwoord. Een andere relevante vraag is: hoe zou het milieu er vandaag de dag hebben uitgezien als er toen andere alternatieven waren gevonden?

Zouden we de huidige wereldwijde temperatuurstijging hebben gehad als we in iets anders hadden geïnvesteerd in plaats van in diesel en benzine? Maar het feit is dat toen de auto en de verbrandingsmotor hun intrede deden aan het begin van de vorige eeuw, het beschouwd werd als een goede milieu-investering, de grote steden over de hele wereld grote problemen hadden met alle paarden in de steden die wagens trokken met zowel goederen als mensen. Een groot probleem was dat de paarden ook hun natuurlijke behoeften moesten vervullen, zowel nummer 1 als nummer 2, en dat gebeurde natuurlijk overal midden in de stad.



Zo zagen de steden er in het begin van de vorige eeuw uit, de geur moet uitgesproken zijn geweest (Plaatje 14).

Bovendien was dit iets wat de paarden 24 uur per dag deden, ongeacht of ze in gebruik waren of niet, in tegenstelling tot de auto, als er niet mee werd gereden, zette je hem natuurlijk gewoon uit, en dan verbruikte hij helemaal geen benzine of diesel, en stootte hij ook geen uitlaatgassen uit.

De waterstof daarentegen had in die tijd geen groot toepassingsgebied, het was in ieder geval niet meer relevant als aandrijving voor voertuigen op de weg, althans niet voor algemeen gebruik, op onderzoeksgebied was er een proces gaande. Wat ze in plaats daarvan bedachten was dat je het lichte gas kon gebruiken om andere vaartuigen te laten vliegen, de Zeppelin. Deze waren eigenlijk bedoeld voor helium en waren gebruikt om de Atlantische Oceaan over te vliegen. Ferdinand Adolf Heinrich Von Zeppelin, geboren in Duitsland in het begin van de 19e eeuw, was de man achter deze toestellen.⁸ Omdat Amerika in die tijd wereldleider was op het gebied van heliumproductie, maar tegelijkertijd geen export toestond, werd het vaartuig gevuld met waterstof. Helaas wordt dat samen met lucht of zuurstof zeer brandbaar. In 1937 vloog de Zeppelin Hindenburg tijdens een vlucht in Amerika bij de landing plotseling in brand. Men denkt dat het door de bliksem werd getroffen, maar het is nog steeds niet duidelijk of dit de oorzaak was van het ongeluk, of dat het een sabotage was. In ieder geval werd het hele gebeuren op film vastgelegd. Het toestel daalde snel naar de grond en de brand vorderde zeer snel. 35 mensen aan boord en één op de grond kwamen om het leven. Of dit ongeluk al dan niet tot grote scepsis over waterstofgas heeft geleid, kan men alleen maar speculeren, maar de sterke rampenfilm heeft waarschijnlijk een grote invloed gehad op het gebruik van het gas. In ieder geval betekende de ramp met de Hindenburg voor die tijd het einde van het tijdperk van de grote luchtschepen.⁹



Het luxueuze luchtschip Hindenburg vastgelegd op camera toen de ramp plaatsvond 1937, 36 mensen kwamen om (Plaatje 15)

⁸(Deze dag in de luchtvaart, 2023)

⁹.(SO-rummet, 2022)

Vandaag is de ontwikkeling op het gebied van grote luchtschepen hervat, maar of ze met waterstof of helium zullen worden opgeblazen is nog steeds niet duidelijk. De reden voor de hernieuwde belangstelling is dat luchtschepen veel beter zijn voor het milieu dan gewone vliegtuigen.

HET VIERTAKTPRINCIPE IN EEN OTTO- EN DIESELMOTOR

In dit hoofdstuk worden de beginselen uitgelegd van twee soorten motoren, de Otto-motor en de dieselmotor, die met waterstof als brandstof kunnen worden gebruikt. U leert ook meer over het viertaktprincipe dat met deze motoren samenhangt.

KEYWORDS:

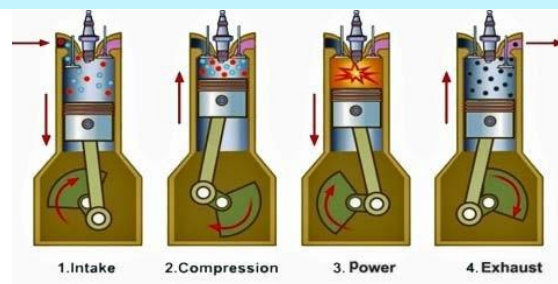
Otto-motor, dieselmotor, het viertaktprincipe.

STUDIEVRAGEN

1. Wat veroorzaakt de onderdruk in de cilinder?
2. Wat wordt in een Otto-motor gebruikt om de brandstof te ontsteken?
3. Wat is er nodig om de brandstof in een dieselmotor te ontsteken?

Hier komt een kleine herhaling in de viertaktmotor, de Ottomotor en de Dieselmotor, dit alles om het gemakkelijker te maken waterstof als brandstof in een motor te begrijpen met deze principes als basis. In een viertaktmotor vindt het hele werkproces plaats in vier slagen, waarbij een slag de zuiger is die van het ene dode punt naar het andere beweegt, bijvoorbeeld van het bovenste dode punt naar het onderste dode punt of omgekeerd. De term dood centrum betekent dat wanneer de zuiger zijn onderste positie in de cilinder bereikt, of boven, hij zo sterk vertraagt dat hij gewoonlijk stilstaat, voordat hij zijn richting omkeert en de andere kant op gaat, hij zijn dood centrum bereikt en in de verschillende slagen gebeuren verschillende dingen. Het bovenste dode punt wordt soms afgekort als TDC en het onderste dode punt als BDC. In één werkcyclus draait de krukas twee omwentelingen, de nokkenas één. Voor elke cilinder is ten minste één inlaatklep en één uitlaatklep nodig. Een bougie is nodig om het brandstof-luchtmengsel te ontsteken.

4.1 DE OTTO-MOTOR



De viertakt in een Otto-motor (Plaatje 16)

4.1.1 SLAG 1. DE INLAAT SLAG

Bij deze slag beweegt de zuiger naar beneden in de cilinder. De inlaatklep staat open en de lucht wordt aangezogen door de onderdruk die in de cilinder ontstaat. In de inlaatslag, ook wel inlaatslag genoemd, zit een injectieklep die op een bepaald moment benzine inspuut en zich met de lucht vermengt. De uitlaatklep is gesloten. Bij een motor met zogenaamde directe inspuiting wordt alleen lucht aangezogen en wordt de brandstof rechtstreeks in de verbrandingskamer gespoten op het tijdstip dat optimaal wordt geacht. Bij een zogenaamde supercharger die gebruik maakt van een uitlaatcompressor, een turbo of een mechanische compressor die door een soort riem of ketting wordt aangedreven, wordt het mengsel met behulp van de daardoor ontstane overdruk naar binnen geperst.

4.1.2 SLAG 2. DE COMPRESSIE SLAG

De zuiger bevindt zich nu in het onderste dode punt en is naar boven gericht. De inlaatklep sluit, de uitlaatklep blijft gesloten, waarbij het brandstof-luchtmengsel wordt samengeperst. Wanneer het brandstof-luchtmengsel wordt samengeperst, wordt het effect op de motor vergroot en wordt de verbranding efficiënter. Vlak voordat de zuiger zijn bovenste dode positie bereikt, wordt het brandstof-luchtmengsel ontstoken door een vonk van de bougie.

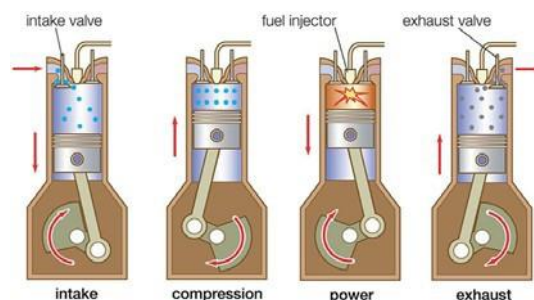
4.1.3 STROKE 3. DE KRACHT SLAG

In dit tempo is het brandstof-luchtmengsel net ontstoken en zet het met hoge snelheid uit, waardoor de zuiger met een zeer grote kracht naar beneden wordt gedrukt. De inlaatklep is gesloten, de uitlaatklep ook. Deze slag is de enige die vermogen creëert van alle vier de slagen.

4.1.4 SLAG 4. DE UITLAAT SLAG

Bij deze slag beweegt de zuiger omhoog in de cilinder. De uitlaatklep staat open, waardoor de uitlaatgassen, die eerst uit brandstof en lucht bestonden, naar buiten worden geduwd en verder door de uitlaatpoort en verder door de uitlaatpijp naar buiten gaan.

4.2 HET VIERTAKTPRINCIPE VAN DE DIESELMOTOR



De viertakt in een dieselmotor (Plaatje 17)

Je kunt zeggen dat de werking van een Otto-motor en een dieselmotor sterk op elkaar lijken. Er zijn vier slagen nodig, net als bij de Otto-motor. Voor elke cilinder is ook minstens één inlaatklep en één uitlaatklep nodig. De krukas draait twee omwentelingen om een arbeidscyclus te voltooien, en de nokkenas één

maar omdat de brandstof anders is dan benzine, is een bougie niet nodig. De diesel wordt ontstoken door de grote hitte in de cilinder. De hoge hitte wordt bereikt doordat een dieselmotor een aanzienlijk hogere compressie heeft dan een Otto-motor. De compressie is ongeveer 20-30 bar.

4.3 DE DIESELMOTOR

4.3.1 SLAG 1. DE INLAAT SLAG

De zuiger beweegt door de cilinder, de inlaatklep staat open en de uitlaatklep is gesloten. De onderdruk in de cilinder helpt om lucht aan te zuigen. Als de motor overbelast is met een uitlaatcompressor, turbo of mechanische compressor die wordt aangedreven door een riem of iets dergelijks, dan wordt de lucht in de cilinder geperst.

4.3.2 SLAG 2. DE COMPRESSIE- SLAG

De zuiger beweegt nu omhoog in de cilinder. De inlaatklep is gesloten en de uitlaatklep blijft ook tijdens deze slag gesloten. De lucht wordt nu samengeperst, waarna de lucht ook warm wordt door de hoge druk. Net aan het einde van de compressieslag wordt de diesel in de warme lucht geïnjecteerd en door de hoge temperatuur ontstoken. Bij een dieselmotor wordt de diesel altijd rechtstreeks in de verbrandingskamer geïnjecteerd, nooit in het inlaatspruitstuk zoals bij de meeste benzinemotoren. Bij een koude start moet de lucht worden verwarmd, in de verbrandingskamer zit een zogenaamde gloeibougie, die de lucht verwarmt tot de temperatuur die nodig is om de diesel te laten ontbranden.

4.3.3 STROKE 3. DE KRACHT SLAG

De ontstoken diesel zet nu snel uit en duwt de zuiger naar beneden in de cilinder. De inlaatklep is gesloten, de uitlaatklep ook. Dit is de slag die vermogen levert aan de aandrijflijn. De diesel en de lucht zijn nu uitlaatgassen geworden.

4.3.4 SLAG 4 DE UITLAAT SLAG

De zuiger beweegt omhoog in de cilinder. De inlaatklep is gesloten. De uitlaatklep is geopend. De zuiger duwt nu de uitlaatgassen door de geopende uitlaatklep verder door de uitlaatpoort naar buiten en in de uitlaatpijp.

5 HOE WERKT WATERSTOF IN EEN VERBRANDINGSMOTOR?

In het volgende hoofdstuk leert u hoe relatief eenvoudig een Otto- of dieselmotor stap voor stap kan worden omgebouwd om op waterstof te lopen. In dit hoofdstuk wordt ook uitgelegd hoe de waterstofbrandstof in een omgebouwde motor op verschillende manieren kan worden ingespoten en ontstoken en wat de mogelijke risico's zijn bij een verkeerde ontsteking.

SLEUTELWOORDEN:

Ontsteking, ontstekingstijdstip, brandstofinjectie, conversie.

STUDIEVRAGEN:

1. Wat brandt het snelst, waterstof of benzine?
2. Hoe kan de zelfontsteking een risico zijn voor de motor?
3. Waarom zijn platina gecoate bougies geen goede keuze voor waterstofmotoren?

Kun je een verbrandingsmotor, benzine of diesel, alleen op waterstof laten lopen? -Ja, maar niet zonder bepaalde veranderingen aan te brengen. Zoals we eerder hebben behandeld, is de verbrandingssnelheid op waterstof veel hoger dan op benzine en diesel. Het kan nuttig zijn als je maar weet hoe je met deze snelheid moet omgaan. Als je een motor op benzine laat draaien, moet je bij hoge toerentallen een vroegere ontsteking hebben, zodat alle brandstof de tijd heeft om te verbranden voordat de volgende slag begint, anders loop je het risico vermogen te verliezen, slechtere uitlaatgaswaarden te krijgen en hogere motortemperaturen te krijgen. Met waterstof in de tanks is het bijna omgekeerd, je kunt geen traditioneel ontstekingsstelsel van een benzineverbrandingsmotor gebruiken. Door de ontvlambaarheid van waterstof bestaat het risico dat de ontsteking te vroeg plaatsvindt, wat in dat geval kan leiden tot pieken, wat ook kan leiden tot

slechtere uitlaatgaswaarden. Een motor die op deze manier gebruikt blijft worden riskeert daardoor grote motorschade, grote schade aan zuigers en kleppen, in het ergste geval motorcrash. Dit probleem kan opgelost door een latere ontsteking, vlak voordat de zuiger zijn bovenste dode positie heeft bereikt, of dicht bij het nulpunt. Dit werkt goed bij waterstof omdat de verbrandingssnelheid zo hoog is. Bij lage toerentallen daarentegen is het een voordeel als je een iets hogere ontsteking hebt. Vereenvoudigd zou je kunnen zeggen dat je een ontstekingsstelsel nodig hebt dat precies het tegenovergestelde werkt van een ontstekingsstelsel dat je nu in een benzine-motor hebt.

5.1 HET OMBOUWEN VAN EEN VERBRANDINGSMOTOR OM OP WATERSTOF TE LOPEN

Een verbrandingsmotor ombouwen om alleen op waterstof te lopen in plaats van op benzine/diesel is in principe mogelijk. Wij zullen hier twee manieren uitleggen, maar er zijn er meer.

Als je zegt "mogelijk", staat dat tussen aanhalingstekens. Altijd als je moet ombouwen/verbouwen/modificeren, komt er veel meer bij kijken dan je aanvankelijk had verwacht. Op het moment van dit schrijven zijn er nog geen kant en klare ombouwkits op de markt, misschien komen die er ook nooit.

De volgende vraag die opkomt is welk motortype en modeljaar om te bouwen, maar we zullen ons beperken tot volledig algemene uitleg zonder al te diep in te gaan op de kleinste details. Er zijn tegenwoordig bedrijven die ombouwkits maken voor CNG, gecomprimeerd aardgas, LNG, vloeibaar aardgas en deze gassen lijken sterk op waterstofgas.¹⁰

5.1.1 STAP 1

Het eerste waar we aan moeten denken is het brandstofsysteem. De tank moet worden vervangen door een die de hoge druk van 700 bar aankan. Aan zo'n tank komen zal een vraag op zich zijn, momenteel zijn deze niet verkrijgbaar bij de plaatselijke auto-accessoires winkel, maar er zijn bedrijven gespecialiseerd in het ontwikkelen en produceren van tanks voor waterstof onder hoge druk, of eventueel kun je een fles krijgen van een gasleverancier.¹¹

¹⁰(Dimitriou en Tsujimura, 2017)

¹¹(Kroyan et al. 2022)



Hier ziet u een voorbeeld van een waterstoftank die door het bedrijf Doosan is geproduceerd (Plaatje 18).

5.1.2 STAP 2

De volgende stap is het vervangen van alle gewone brandstofleidingen die voorheen benzine vervoerden met een relatief lage druk en vrij weinig risico op lekkage. De waterstof zal onder zeer hoge druk worden opgeslagen en ook worden vervoerd via leidingen van de tank naar de motor, waar het risico van lekkage bij alle aansluitingen groot is. Met andere woorden, alle leidingen die worden geïnstalleerd moeten worden gedimensioneerd op basis van de hoge druk en het volume.

Hetzelfde geldt voor alle verbindingen en fittingen, deze moeten ook voldoen aan de eisen die waterstof stelt om lekkage te voorkomen.¹²



Verschillende fittingen voor waterstof onder hoge druk (Plaatje 19).

¹²(Dimitriou en Tsujimura, 2017)

5.1.3 STAP 3

De motor krijgt dan de brandstof en zoals gezegd zullen we twee verschillende benaderingen volgen. Wat ongeacht de verschillende benaderingen moet gebeuren, is dat de injectieklep(pen) die vroeger voor benzine waren bedoeld, worden vervangen door injectiekleppen die voor gas zijn bedoeld. Er zijn berichten dat het gebruik van injectiekleppen die voor gas bedoeld zijn, goed heeft gewerkt.¹³

5.2 TWEE VERSCHILLENDE MANIEREN OM DE MOTOR VAN WATERSTOF TE VOORZIEN

Een van de manieren om de motor van waterstof te voorzien is via injectiekleppen die in het inlaatspruitstuk aan de buitenkant van de inlaatklep zijn gemonteerd en waardoor de waterstof zich kan gaan mengen met de lucht/zuurstof die zich al buiten de verbrandingskamer bevindt, en vervolgens met behulp van de onderdruk van de motor in de cilinder wordt gezogen wanneer de inlaatklep opengaat. Dit model heeft een zeker risico van zelfontbranding omdat de brandstof binnenkomt zodra de inlaatklep opengaat en er dan een risico bestaat dat de waterstof in contact komt met onderdelen die zo'n hoge temperatuur hebben dat het ontbrandt. Dat kan de bougie zijn die een te laag warmtegetal heeft en toch gloeit, het kan restkoolstof en roetaanslag zijn van de motor die vóór de omschakeling op fossiele brandstof liep. Of olieresten die tussen de cilinderwand en de zuigerveren terecht zijn gekomen als gevolg van onvoldoende carterventilatie, die in de cilinder kunnen gloeien. Detonatie van het brandstof-luchtmengsel kan ook optreden door een te hoge overlap in de nokkenastiming, waardoor de brandstof in contact komt met de uitlaatpoort.

De andere manier waarop waterstof aan de motor kan worden geleverd is door gebruik te maken van een zogenaamd model van directe injectie. Dit betekent dat de injectieklep direct in de verbrandingskamer moet zitten. Het voordeel van deze methode is dat je preciezer kunt bepalen wanneer de injectie moet plaatsvinden.

5.2.1 STAP 4

Vanwege het verbrandingskarakter van de waterstof moet ook het ontstekingsstelsel worden omgebouwd, afhankelijk van wat je als uitgangspunt hebt.¹⁴

¹³(Rorimpandey et al. 2023)

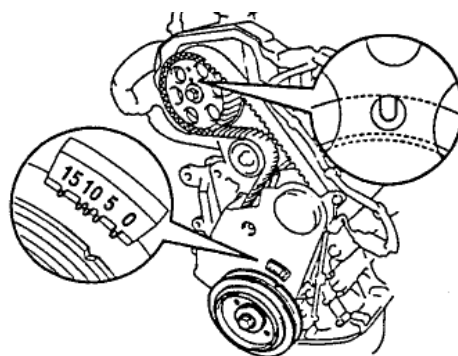
¹⁴(Verhelst en Wallner, 2009)



In sommige typen waterstofmotoren wordt ook een conventionele bougie gebruikt (Plaatje 20).

Je kunt het samenvatten door te zeggen dat het ontstekingsstijdstip bij hoge toerentallen bij een voor waterstof omgebouwde verbrandingsmotor later moet liggen dan bijvoorbeeld bij traditionele benzine, waar het ontstekingsstijdstip ongeveer 25-35 graden voor het bovenste dode punt ligt. Bij de waterstofconverter kan het ontstekingsstijdstip bij hoge toerentallen bijna nul zijn, omdat de snelheid van de vlam zo hoog is.

Anderzijds neemt de snelheid van de vlam af bij een magerder mengsel, wat bijvoorbeeld optreedt bij lage toerentallen, bijvoorbeeld bij stationair toerental, maar ook bij lage belasting, bij de benzinemotor is het ontstekingsstijdstip ongeveer 10 graden vóór het bovenste dode punt, terwijl het bij de motoren die omgebouwd zijn voor waterstof juist een iets vroeger ontstekingsstijdstip zou moeten zijn om het hele mengsel te verbranden.



Y 301597

De timing moet worden vertraagd in vergelijking met een benzinemotor (Plaatje 21).

Deze wijziging kan worden aangebracht door de software in de regeleenheid van het voertuig aan te passen aan de gewenste ontstekingsstijdstippen in de verschillende omstandigheden waaraan de motor zal worden blootgesteld.

Bij een oudere motor met een traditionele verdeler die draait op het toerental van de nokkenas, zou je in plaats daarvan een verdeler kunnen gebruiken die in de tegenovergestelde richting staat van wat er zou moeten zijn, wat dan zou betekenen dat het ontstekingsstijdstip wordt verlaagd bij hogere toerentallen en verhoogd bij lagere toerentallen, zoals stationair.

Bovendien mogen geen bougies met een platina coating worden gebruikt, omdat het platina als katalysator werkt tussen waterstof en zuurstof en er dan gevaar voor zelfontbranding bestaat.

Bij het ombouwen van een gewone verbrandingsmotor die vroeger op fossiele brandstof met koolstof liep, is het uiterst belangrijk om alle onderdelen in en op de motor die roetdeeltjes kunnen bevatten, te demonteren. De cilinderkop moet worden gedemonteerd om bij het roet te kunnen dat gewoonlijk in de verbrandingskamer zit. De kleppen moeten ook worden gedemonteerd zodat ook deze van roet kunnen worden ontdaan, ook in de poorten, vooral aan de uitlaatzijde, moeten alle roetdeeltjes worden verwijderd. Op de zuigertoppen zit meestal roetaanslag die verwijderd moet worden.

Al dit werk is belangrijk om zelfontbranding tegen te gaan die zal optreden als er roetdeeltjes overblijven die gloeien. Van de waterstof zal later geen roetaanslag komen omdat er geen koolstof in zit en ook geen zuurstof.

6 DE ONDERZOEKSFASE

Tegenwoordig zijn onderzoekers over de hele wereld volop bezig met de ontwikkeling en verfijning van de technologie voor motoren die beter op waterstof kunnen lopen. Zij werken aan de toevoer van de waterstof naar de motor op verschillende manieren, die in het volgende hoofdstuk nader wordt toegelicht.

SLEUTELWOORDEN:

Ontsteking, injectie, verschillende injectiesystemen.

STUDIEVRAGEN:

1. *Welk systeem wordt beschouwd als de meest eenvoudige manier om de motor van waterstof te voorzien?*
2. *Welke van de uitlaatgassen is een uitdaging gebleken om tot redelijke cijfers terug te brengen?*
3. *Leg uit waarom in een waterstofmotor de proefinjectie wordt gebruikt.*

6.1.1 WATERSTOF PORT FUEL INJECTION, PFI

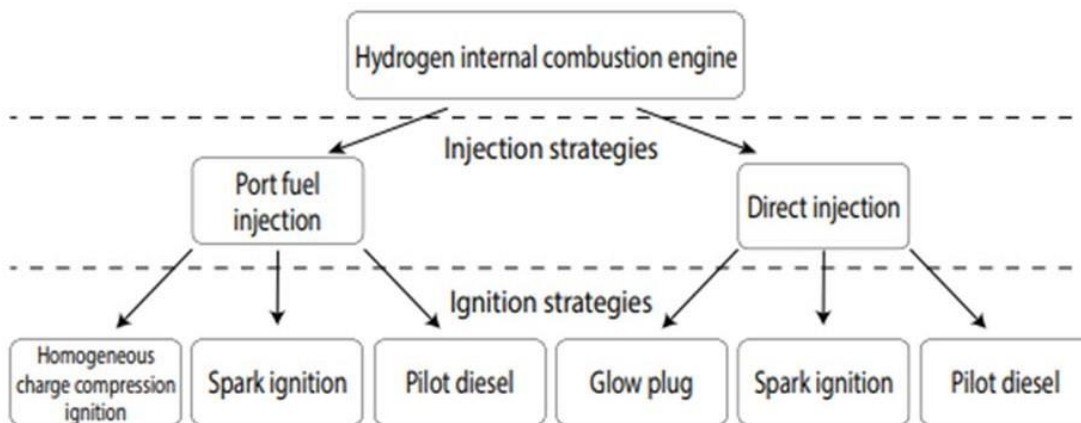
Injectie in de inlaatpoort in het inlaatspruitstuk. Dat betekent dat de brandstof buiten de inlaatklep wordt ingespoten, dus niet rechtstreeks in de verbrandingskamer. Pas wanneer de inlaatklep opengaat en de zuiger naar beneden beweegt, wordt de brandstof in de cilinder gezogen door de onderdruk die dan ontstaat, de inlaatslag. Dit type injectie is het meest gebruikelijk bij Otto- motoren. Het ombouwen van dit systeem naar waterstofwerking is relatief "eenvoudig", zoals we eerder hebben behandeld. De injectoren moeten worden vervangen om waterstof in plaats van benzine te kunnen verwerken, en het ontstekingsstelsel moet worden aangepast, ook al eerder genoemd. Maar er zijn risico's aan dit systeem verbonden die we ook al eerder hebben genoemd, namelijk voortijdige zelfontbranding omdat de brandstof zo vroeg binnenkomt. Een ander probleem met dit type injectiesysteem is dat wanneer de brandstof in de inlaatpoort wordt ingespoten, deze de lucht naar buiten duwt, waardoor het vermogen van de motor wordt beperkt. Hieronder volgt een eenvoudige beschrijving van de verschillende manieren waarop de verbranding kan plaatsvinden, alsmede de enigszins verschillende soorten ontsteking van de brandstof.¹⁵

6.1.2 HOMOGENE LADINGCOMPRESSIEONTSTEKING, HCCI

Homogeen geladen gecomprimeerde ontsteking zou men kunnen vertalen. Zonder hier al te diep op in te gaan, is het gebaseerd op de injectie van waterstof die plaatsvindt zoals bij het PFI-systeem, d.w.z. in de inlaatpoort direct naast de inlaatklep maar aan de buitenkant van de verbrandingskamer. Zij gebruiken een homogeen mengsel van lucht en waterstof, dat ook zeer arm is. Dit mengsel wordt rechtstreeks in de verbrandingskamer geïnjecteerd en vanwege zijn brandbaarheid wordt het door de hoge compressie ontstoken en vervolgens ontbrandt het de toegevoerde waterstof. Een groot voordeel van dit systeem is dat de NO_x als restproduct in de uitlaatgassen tot zeer lage cijfers is teruggebracht. Dit bovendien met behoud van vermogen van de motor. NO_x is bijna nul. Maar zelfs dit systeem heeft verdere ontwikkeling om te functioneren, onder andere is een zeer hoge compressie nodig om maar iets te noemen.¹⁶

¹⁵(Yip et al., 2019, s. 7)

¹⁶ Ibid. s.7



De verschillende manieren van injectie voor verbrandingsmotoren (Plaatje 22)

6.1.3 BRANDSTOFINJECTIE MET VONKONTSTEKING:

Dit systeem, dat in het Engels wordt omschreven als PFI SI, SI staat voor Spark Ignition, d.w.z. een ontsteking van de brandstof met de vonk van een bougie. PFI met SI is het meest onderzochte systeem voor verbrandingsmotoren die waterstof verbranden. Met dit systeem, met een extreem arm brandstof/luchtmengsel, kunnen zeer lage NO_x-waarden in de uitlaatgassen worden bereikt, onder de 100 ppm, zonder externe behandeling.

Ook is het wenselijk de hoeveelheid ongewenste restproducten bij de verbranding te verminderen. Dit kan worden bereikt door middel van stoichiometrische verhoudingen.

Stoichiometrische verhoudingen kunnen vereenvoudigd worden omschreven als dat de precies juiste hoeveelheid materie samen met een andere materie van precies de juiste hoeveelheid wordt opgenomen in een verbranding waarbij alles ontbrandt. Hierdoor worden ook ongewenste residuen geëlimineerd. Het gebruik van een EGR-systeem vermindert de NO_x nog verder. EGR staat voor Exhaust Gas Recirculation. Dat wil zeggen dat een kleine hoeveelheid uitlaatgassen wordt teruggevoerd in het verbrandingsproces om de verbrandingstemperatuur en vermindert daardoor de NO_x-cijfers die bij hoge temperaturen worden gevormd.¹⁷

Ook wordt een driewegkatalysator gebruikt, die de waarde van de NO_x verder verlaagt tot waarden die bijna nul bedragen. In plaats van EGR wordt soms waterinjectie in het inlaatspruitstuk gebruikt, omdat dit hetzelfde effect heeft als EGR, aangezien bij de waterstofverbranding alleen waterdamp als restproduct overblijft. Dit systeem heeft, zoals we eerder hebben ervaren, enkele problemen zoals ongewenste voortijdige ontsteking van het mengsel, maar ook backfires die leiden tot vermogensverlies van de motor.

¹⁷ Ibid. s. 8

6.1.4 WAAKVLAMONTSTEKING MET WATERSTOFINJECTIE AAN DE POORT

Dit systeem is gebaseerd op directe injectie (DI) en PFI. De directe injectie is voor het geven van een zogenaamde "proefinjectie", dit betekent dat je een kleine hoeveelheid diesel rechtstreeks in de verbrandingskamer injecteert. De diesel wordt ontstoken door de warmte van de compressie en wanneer er later waterstof in wordt gespoten wordt deze ontstoken. Maar ook aan dit systeem kleven bepaalde nadelen, zoals ongewenste zelfontbranding. Ook het NO_x-gehalte is te hoog om deze methode als emissievrij te kunnen bestempelen, maar in de laboratoria worden verdere studies uitgevoerd. Maar ondanks het feit dat PFI-systemen relatief gemakkelijk zijn om te zetten naar waterstofwerking, moeten zij misschien meer worden gezien als een overgang van onze gebruikelijke fossielverbrandende motoren naar meer geavanceerde motoren die hopelijk niet al te ver weg zijn in de toekomst.¹⁸

6.1.5 WATERSTOFVERBRANDING MET DIRECTE INJECTIE

Het rechtstreeks toevoegen van waterstof in de cilinder tijdens de compressieslag zelf lijkt het meest veelbelovende concept voor zover we vandaag de dag zijn gekomen met de ontwikkeling van de motortypes die we hebben. Door het op deze manier te doen, kunt u ongewenste zelfontbrandingen of terugontbrandingen die in het PFI-motorsysteem optreden min of meer voorkomen. Omdat de injectietijd van de brandstof naar wens kan worden geregeld. Je zou kunnen wachten met injecteren tot beide kleppen gesloten zijn, waardoor de blootstelling van hete onderdelen tot een minimum wordt beperkt. Het probleem dat je hebt met waterstof is dat het veel ruimte inneemt als het via het inlaatspruitstuk wordt ingespoten en dan ook de plaats inneemt van de luchttoevoer. Dit draagt weer bij aan vermogensverlies waar je ook vanaf komt. Dat komt omdat alleen de lucht al in de cilinder is gezogen via de inlaat klep, en de brandstof wordt dan in de cilinder toegevoerd wanneer de inlaatklep wordt gesloten. Wanneer echter de brandstof in de compressieslag wordt ingespoten, moet de injector een hogere inspuitedruk hebben, omdat er in een cilinder een hogere druk heerst dan wat er bij een PFI-systeem van een injector wordt verlangd. In een PFI-systeem is er helemaal geen overdruk, maar is er meestal sprake van een negatieve druk. Er is aangetoond dat dit systeem, dat met zulke hoge drukken werkt, bijna te vergelijken is met het hoge rendement van diesel. Het systeem wordt vaak afgekort met HPDI, wat staat voor High Pressure Direct Ignition. Er zijn veel voordelen aan dit systeem, het kan flexibeler worden gemaakt in veel verschillende

situaties, het kan op een heel andere manier worden afgesteld dan een PFI-systeem. Je kunt de inspuitdruk aanpassen, je kunt het inspuitmoment aanpassen, je kunt ook het inspuitontwerp aanpassen, dit alles om het motorvermogen optimaal te kunnen optimaliseren. Er zijn een paar verschillende manieren om de brandstof te ontsteken, en daarover kun je verderop lezen.¹⁹

6.1.6 GLOEIBOUGIE ONTSTEKING

Gloeibougies worden gewoonlijk gebruikt voor dieselmotoren bij een koude start. Ze gloeien dan kort voor het startmoment om de verbrandingskamer op te warmen en gaan dan uit als de motor loopt. Maar wanneer je ze in een verbrandingsmotor met directe injectie voor waterstofbrandstof gebruikt, is het anders. Hier moet de gloeibougie voortdurend branden en is een temperatuur van ongeveer 900-1100 graden Celsius vereist. Maar ook deze methode heeft voor- en nadelen, als je hem bijvoorbeeld vergelijkt met de dieselmotor: de waterstofmotor verbruikt meer brandstof, maar een voordeel van de studies was dat hij aanzienlijk minder NOx uitstoot dan de dieselmotor. Een ander probleem met dit type is dat er momenteel geen gloeibougies zijn die de hele tijd kunnen blijven branden, maar misschien kan dit probleem in de toekomst worden opgelost.²⁰

6.1.7 VONKONTSTEKING MET BOUGIE

Waarschijnlijk het meest onderzochte model en ook het best gedocumenteerde, directe injectie met bougieontsteking.

Het lijkt in veel opzichten sterk op het in de vorige paragraaf beschreven model, ontsteking met gloeibougies. Wat grotendeels is gedaan, is dat de gloeibougie/een bougie is vervangen door een er kunnen meer bougies zijn dan één. Studies die zijn uitgevoerd op een motor met één cilinder die is omgebouwd voor directe inspuiting en waarbij de waterstof door een vonk van een bougie wordt ontstoken, tonen een thermisch rendement van 40% bij lage tot gemiddelde motorbelasting, wat slechts iets minder is in vergelijking met een gelijkwaardige dieselmotor.

¹⁸ Ibid. s. 8

¹⁹ Ibid. s. 9

²⁰ Ibid. s. 9

Wat bij dit model ook is opgemerkt, is dat het inspuittijdstip van invloed is op de homogeniteit van het mengsel, wat een aanzienlijk grotere invloed heeft op het motorvermogen en de emissies dan het ontstekingsstijdstip. Door het injectietijdstip te vertragen van 120 graden voor TDC tot 65 graden voor TDC neemt het motorvermogen verder toe. Helaas resulteert dit in een verhoogde uitstoot van NO_x, men heeft dan geprobeerd meer lucht in te spuiten om het gehalte te verlagen, het heeft gewerkt maar het effect is daardoor verminderd. Wat ook een grote invloed blijkt te hebben op de motorprestaties is de hoek waaronder de injector de brandstof in de verbrandingskamer inspuit.²¹

6.1.8 DUAL-FUEL HOGE DRUK DIRECTE INJECTIE MOTOR MET COMPRESSIEONTSTEKING

Zoals wij al eerder zeiden, is het ontsteken van waterstof met alleen compressiewarmte niet eenvoudig. Hier zullen wij op een relatief vereenvoudigde manier beschrijven hoe men met deze technologie heeft gedacht.

In de eerder gepresenteerde modellen is ook gebruik gemaakt van een zogenaamde voorinjectie. Het kan ook proefinjectie worden genoemd. Het kan bijvoorbeeld zo gebeuren: In de verbrandingskamer bevindt zich een injector die een kleine hoeveelheid van een stof injecteert die met behulp van compressiewarmte ontbrandt, bijvoorbeeld diesel, deze ontbrandt en kort daarna wordt de waterstof geïnjecteerd en ontstoken door de nu brandende diesel in de verbrandingskamer. In deze theorie is er echter geen informatie die verklaart hoe het in werkelijkheid met waterstof werkt. Anderzijds zijn er studies gedaan met CNG, gecomprimeerd aardgas, dat een soortgelijke ontvlambaarheid heeft als waterstof.

Er zijn twee injectoren gebruikt, een voor de diesel en een voor het gas. Verschillende hoeken van de injectoren hebben verschillende effecten gehad. Zelfs verschillende drukken hadden verschillende gevolgen. Zelfs in dit model heeft men geprobeerd het gas op verschillende tijdstippen tijdens de compressieslag in te spuiten, wat verschillende resultaten opleverde. Er is ook geprobeerd met gecombineerde injectoren, waarbij de injector zo is ontworpen dat beide brandstoffen in één en dezelfde injector zitten.²²

²¹ Ibid. s. 10 f.

²²(Dimitriou en Tsujimura, 2017)



Hier wordt een voorbeeld beschreven, deze dubbele injector is ontwikkeld door het bedrijf Westport. (Afbeelding 23)

Een tegenslag is dat de proefinjectie van diesel om de verbranding van het gas op gang te brengen uiteindelijk een laag roet opbouwt, ook al is de hoeveelheid diesel zeer gering, maar dit probleem zal waarschijnlijk verminderen wanneer het CNG wordt vervangen door waterstof, aangezien CNG koolstof bevat.

6.2 VOOR- EN NADELEN VAN DE VERSCHILLENDE METHODEN

Met de verschillende methoden van brandstofinjectie of hoe de verbranding plaatsvindt, kun je zeggen dat er voors en tegens zijn. Van de injectoren bijvoorbeeld is geconstateerd dat zij, doordat waterstof geen smerende werking heeft zoals diesel of benzine, slijtage vertonen, wat op den duur waarschijnlijk een probleem zal zijn. Mogelijk kan dit worden opgelost met behulp van een vorm van smering, of misschien door de onderdelen die het voorwerp raken te behandelen met een oppervlak dat de onderlinge wrijving waarborgt.²³

²³(Gültekin en Ciniviz, 2022)

6.2.1 INJECTOR ROL

Gebleken is dat de injector een grote rol speelt in de motorprestaties. De kenmerken van de injector wat betreft de druk die hij aankan en de grootte van het mondstuk houden rechtstreeks verband met hoe goed de injectie is en hoe deze mengt, maar ook hoe de injectiehoeveelheid wordt geregeld. Het ontwerp van de injectoren beïnvloedt dus hoe groot het warmteverlies aan de cilinderwanden is en het rendement daarmee, dus ook het brandstofverbruik.²⁴

Wat ook aan het licht is gekomen, is dat het waterstofgas een broseffect heeft op bepaalde metaallegeringen, wat een probleem kan worden bij langdurig gebruik.

Verdere hindernissen die moeten worden overwonnen zijn bijvoorbeeld hoe om te gaan met het hoge diffusievermogen van waterstof, waardoor het door verschillende soorten materiaal kangaan.

De injectoren kunnen bijvoorbeeld worden blootgesteld aan de waterstof, wat ertoe kan leiden dat de functie wordt verstoord of misschien geheel ontbreekt.

Een voorwaarde voor de ontwikkeling van waterstof als brandstof in interne verbrandingsmotoren is dat men zich richt op de problemen die men bijvoorbeeld heeft met verschillende materialen die de verschillende eigenschappen van waterstof aankunnen. De hoge druk die in sommige van de eerder gepresenteerde systemen wordt gebruikt. Het ontwerp van de gasleidingen en dat men alle verbindingen tussen verschillende onderdelen op een veilige manier kan afdichten. Hoe de brandstoftanks zijn ontworpen en een constructie daarop die absolute dichtheid garandeert. Dat de injectoren specifiek zijn ontworpen voor waterstofgas, tegenwoordig gebruiken we veel injectoren die eigenlijk bedoeld zijn voor andere soorten gassen, CNG, LPG of BIO-gas. Maar de ontwikkeling gaat voortdurend vooruit en wat vandaag wordt geschreven, kan morgen geschiedenis zijn.

6.3 DRIE VERSCHILLENDE SOORTEN INJECTIE

6.3.1 ELEKTROHYDRAULISCH GEACTIVEERD (NTSEL)

Dit type injector vereist hydraulische vloeistof (gewoonlijk diesel) onder hoge druk. De injectiedruk is beperkt tot 200 bar. Tijdens de eigenlijke injectie wordt de solenoïde geactiveerd waardoor de druk in de diesel die zich in het bovenste gedeelte van de injector bevindt, wordt opgeheven; de waterstof die onder hoge druk staat, kan dan de injectienaald van zijn zitting lichten en de injectie vindt plaats. In

²⁴(Verhelst en Wallner, 2009

Bij dit type injector moet er een dermate hoge druk op de diesel staan dat de naald in gesloten toestand tegen zijn zitting drukt. De diesel zorgt er ook voor dat bepaalde bewegende delen in de injector gesmeerd worden.²⁵

6.3.2 SOLENOÏDE-GEACTIVEERD (WESTPORT)

De firma Westport heeft deze injector ontwikkeld, het is hun eerste generatie en hij is volledig solenoïde aangedreven voor DI en waterstofbrandstof. Hij is beperkt tot 150 bar. Er zijn enkele storingen gemeld, waaronder bewegingsbeperkingen van de naald.

Hoerbiger Valve TEC GmbH heeft een soortgelijke solenoïde aangedreven ook ontwikkeld voor DI en Waterstof brandstof met een maximale injectiedruk van 100 bar.²⁶

6.3.3 PIËZO-AANGEDREVEN (WESTPORT)

Deze is van de tweede generatie en is bestand tegen een druk tot 250 bar. Hier wordt de naald geactiveerd door een piëzo-element, vanuit een analoge spanning die de beweging van de naald regelt en een zeer snelle reactie mogelijk maakt. Hij heeft een korte openingstijd van 0,5 ms. Bovendien wordt de levensduur verbeterd door de flexibele regeling van de naaldsnelheid, waardoor de sluitsnelheid kan worden verlaagd, waardoor de sluitdruk wordt verlaagd.²⁷

7 CONCLUSIES

Dit hoofdstuk belicht de voordelen van de ombouw van bestaande motoren en het vervoer en de productie van voertuigen van de toekomst. Het neemt ook een meer sentimenteel standpunt in over de toekomst van oldtimers. In een wereld waar wetenschappers voortdurend nieuwe oplossingen vinden en een wereld waar de mensheid nieuwe uitdagingen krijgt met het milieu, zijn dit perspectieven die we voor ogen moeten houden.

²⁵(Yipetal.,2019,s.18)

²⁶ibid.s.17

²⁷ Ibid. s. 17

KEYWORDS:

schakelende motorproductie, ombouwvoordelen, redden van oldtimers, de toekomst van voer- en vaartuigtransport.

STUDIEVRAGEN

1. *Welke uitdagingen van de toekomst kan waterstof helpen oplossen?*
2. *Wat zijn de voordelen van het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor versus in een brandstofcel?*
3. *Welke mogelijke voor- en nadelen van de overgang naar een op waterstof gebaseerde toekomst ziet u zowel voor het individu als voor de samenleving?*

7.1 DE VOORDELEN VAN HET OMBOUWEN VAN BESTAANDE MOTOREN

Een voordeel van verbrandingsmotoren met waterstof in plaats van brandstofcellen is dat de waterstof niet zo zuiver hoeft te zijn om in een verbrandingsmotor te werken als in een motor met brandstofcellen. Een ander voordeel bij het gebruik van verbrandingsmotoren is de mogelijkheid om over te schakelen tussen verschillende soorten brandstof. Bovendien houdt het gebruik van reeds beproefde technologie de kosten in de fabrieken laag.

Of er in de toekomst conversiekits beschikbaar zullen zijn is een vraag die niemand op dit moment kan beantwoorden, maar het zou milieuvriendelijker zijn om zo snel mogelijk over te schakelen van fossiele brandstoffen naar fossielvrije brandstof.

7.2 WAAROM WATERSTOF IN EEN VERBRANDINGSMOTOR

Tot besluit: Misschien is dit een legitieme vraag: waarom proberen we de Otto-motor of de dieselmotor te ontwikkelen om op waterstof te werken, terwijl het erop lijkt dat ze al op weg zijn om uit de maatschappij te verdwijnen?

Daar is geen snel en gemakkelijk antwoord op. Het is absoluut zo dat een voertuig dat brandstofceltechnologie gebruikt een hoger rendement heeft dan een Otto-motor of een dieselmotor die is aangepast om op waterstof te rijden.

Een manier om dit te bekijken is dat we al een groot aantal Otto-motoren en dieselmotoren in de wereld hebben. Toch domineren deze motoren grotendeels de markt in vergelijking met elektrische voertuigen.

Het zal onmogelijk zijn deze in korte tijd te vervangen en tegelijkertijd is het van het grootste belang zeer snel actie te ondernemen, omdat het mondiale milieu wordt bedreigd.

Voor fabrieken om over te schakelen van verbrandingsmotoren naar elektrische motoren Het zal een grote uitdaging zijn om alle fabrieken die nu verbrandingsmotoren voor onze voertuigen produceren, te veranderen in elektrische motoren, omdat dit snel moet gebeuren. Hetzelfde geldt voor de productie van batterijen en de stoffen die daarvoor nodig zijn. Wat we vandaag weten is dat die slechts in beperkte hoeveelheden op enkele plaatsen in de wereld te vinden zijn.

In sommige delen van de wereld is het financieel niet haalbaar, en zal dat op lange termijn ook niet het geval zijn, om een voertuig te vervangen door een elektrisch of door brandstofcellen aangedreven voertuig. Hier zou de oplossing van het ombouwen van bestaande voertuigen een goed alternatief kunnen zijn.

Hetzelfde geldt voor scheepvaart, zwaar verkeer en vliegtuigen, waar de optie om bestaande motoren om te bouwen voor waterstofgebruik bedrijven zou kunnen behoeden voor grote financiële verliezen als gevolg van het afdanken van een goed functionerende vloot.

Een ander gebied dat tegenwoordig volledig afhankelijk is van fossiele brandstoffen is dat van de enthousiaste voertuigen; op de grond, in het water of in de lucht. Op dit gebied zou het ook welkom zijn met een optie om deze voertuigen te kunnen blijven gebruiken. Hetzelfde geldt ook voor alle vormen van autosport.

Een ander aspect is eerder van emotionele of nostalgische aard. Sommige mensen vinden het moeilijk om hun oude verbrandingsmotoren te slopen en vinden een zekere charme in het geluid ervan.

Het zou kunnen zijn dat men de ontwikkeling van waterstofbrandstof voor de Otto- en dieselmotoren moet beschouwen als een overgang totdat deze voertuigen het punt hebben bereikt waarop zij moeten worden vervangen.

Deze vervanging van nieuwe voertuigen moet ten minste worden overwogen wanneer we het hebben over auto's voor commercieel en particulier gebruik.

Anderzijds, wanneer er geen financiële mogelijkheden zijn, zou waterstofbrandstof een goed alternatief kunnen zijn om voertuigen te kunnen blijven gebruiken die vandaag fossiele brandstoffen, benzine of diesel, verbranden.

8 REFERENTIES

Autovista SE. (n.d.). Möjlighet till att tanka vätgas finns nu i 33 länder. [online] Beschikbaar op: <https://autovista.se/news/eu/mojlighet-till-att-tank-a-vatgas-finns-nu-i-33-lander/> [Accessed 19 Jan. 2023].

Billings, (2013). Waterstof - Brandstof voor de toekomst | Dr. Roger Billings. [online] Beschikbaar op: <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/>.

Dimitriou, P. en Tsujimura, T. (2017). Een overzicht van waterstof als brandstof voor motoren met compressieontsteking. *Internationaal Journal van Waterstof Energy*, 42(38), pp.24470-24486. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.07.232.

Gültekin, N. en Ciniviz, M. (2022). Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.

Kroyan, Wojciezyk, Kaario, Larmi. (2022). Modelling the end-use performance of alternative fuel properties in flex-fuel vehicles, *Energy Conversion and Management*, 269, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080>.

KSC, S.S. (n.d.). NASA - Veeleisend ontwerp geeft Shuttle motor een boost. [online] www.nasa.gov. Beschikbaar op: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html.

Kumar, A. R. (2016). Focus on Expansion of Hydrogen and Electric Fleets for Passenger and Freight Transport in United Kingdom (Doctoraal proefschrift, College of Physical Sciences, School of Engineering University of Aberdeen, King's College).

National Museum of American History. (n.d.). Allis-Chalmers Brandstofcel Tractor. [online] Beschikbaar op: https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_687671.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2019). Waterstofproductie. [online] Energy.gov. Beschikbaar op: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>.

Rorimpandey, P., Lung Yip, H. Srna, A., Zhai, G., Wehrfritz, A., Kook, S., Hawkes, E.R., Chan, Q.N. (2023). Waterstof-diesel dual-fuel direct-injection (H2DDI) combustion under compression-ignition engine conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2(48), pp 766-783, 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.241>.

SO-rummet. (2022). Luftskeppet Hindenburg. [online] Beschikbaar op: <https://www.sorummet.se/kategorier/luftskeppet-hindenburg#> [Accessed 19 Jan. 2023].

Deze dag in de luchtvaart, (2023). Ferdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin | This Day in Aviation. [online] Beschikbaar op: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/ferdinand-adolf-heinrich-august-graf-von-zeppelin/> [Accessed 19 Jan. 2023].

Verhelst, S. en Wallner, T. (2009). Interne verbrandingsmotoren op waterstof. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), pp.490-527. doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001.

Wikipedia. (2019). De Rivaz motor. [online] Beschikbaar op: https://en.wikipedia.org/wiki/De_Rivaz_engine.

Yip, H.L., Srna, A., Yuen, A.C.Y., Kook, S., Taylor, R.A., Yeoh, G.H., Medwell, P.R. en Chan, Q.N. (2019). A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion. *Applied Sciences*, 9(22), p.4842. doi:10.3390/app9224842.

9 BEELDREFERENTIES

Afbeelding 1: De motor van De Rivaz in detail,

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_Rivaz_IC_Engine_detail.jpg (Opgehaald:19-01-23)

Afbeelding 2: De motor van De Rivaz, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rivaz_Engine.jpg

(Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 3: De waterstoftruck van Norsk Hydro uit 1933,

<https://www.flickr.com/photos/hydrogencarsnow/8136698514/> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 4: Harry Karls Ihring brandstofceltrekker, <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/>

(Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 5: Roger Billings waterstofauto, <https://www.science.edu/acellus/2018/07/first-hydrogen-car/>

(Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 6: GM's brandstofcelbusje, [http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/gm/GM-](http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/gm/GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966/cars_reviews-GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966.html)

[hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966/cars_reviews-GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966.html](http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/gm/GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966/cars_reviews-GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966.html) (Retrieved: 19-01-23)

Afbeelding 7: Showcase van waterstof geproduceerd door zonne-energie,

https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-production-from-solar-energy-36_fig17_324719917

(Retrieved: 19-01-23)

Afbeelding 8: Keyou's waterstofbus, [https://www.busandcoachbuyer.com/hydrogen-bus-prototype-](https://www.busandcoachbuyer.com/hydrogen-bus-prototype-unveiling-at-iaa/)

[unveiling-at-iaa/](https://www.busandcoachbuyer.com/hydrogen-bus-prototype-unveiling-at-iaa/) (Retrieved: 19-01-23)

Afbeelding 9: Vliegtuigen, <https://newatlas.com/energy/infinium-electrofuels-zero-carbon-fuel/>

(Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 10: Space shuttle, https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html (Opgehaald:

19-01-23)

Afbeelding 11: kaart met [waterstoftankstations](https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/), [https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-](https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/)

[record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/](https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/) (Opgehaald: 19-

01-23)

Afbeelding 12: Waterstofgasvulmondstuk, [https://www.swagelok.com/en/blog/guofu-](https://www.swagelok.com/en/blog/guofu-hydrogen-tanken-case-study)

[hydrogen-tanken-case-study](https://www.swagelok.com/en/blog/guofu-hydrogen-tanken-case-study) (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 13: Honda's waterstoftankstation, [https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/home-](https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/home-hydrogen-fueling-stations/)

[hydrogen-fueling-stations/](https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/home-hydrogen-fueling-stations/) (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 14: Verkeer begin 1900,

<https://blog.greenprojectmanagement.org/index.php/2019/05/13/pollution-why-we-replaced-paarden-met->

[auto's/](#) (Retrieved: 19-01-23)

Afbeelding 15: Het ongeluk met het Hindenburg-luchtschip, <https://www.history.com/news/the-hindenburg-ramp-9-verrassende-feiten> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 16: Een Otto-motor in een losgesneden tekening, <https://haynes.com/en-us/tips-tutorials/beginners-guide-wat-viertakt-motor> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 17: Een dieselmotor getoond in een losgesneden tekening, <https://www.hardwarezone.com.sg/feature-why-you-should-consider-diesel-your-next-car/diesel-vs-petrol-motoren> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 18: De waterstoftank van Doosan, <https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-tank/> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 19: Koppelingen voor waterstofbrandstofleidingen, <https://www.nvfcl.com/hydrogen-powered-fuel-cell-voertuigen/> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 20: Ontstoken bougie, <https://www.mycar.com.au/car-advice/spark-plugs-in-a-car> (Opgehaald: 19-01-23)

Afbeelding 21: Tekening met timing-instellingen, <http://www.carnewscafe.com/2015/03/what-are-timing-marks/> (Retrieved: 19-01-23)

Afbeelding 22: Afbeelding van verschillende injectiemethoden, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4842>, s. 7 (Opgehaald: 19-01-23).

Afbeelding 23: Privé-afbeelding van dubbele brandstofinjector van Westpoort.

10 AFKORTINGEN

BDC	Onderste dode punt
BIO	Biologisch
CNG	Gecomprimeerd aardgas
DI	Directe injectie
EGR	Uitlaatgasrecirculatie
HCCI	Homogene ladingscompressieontsteking
HPDI	Hoge druk directe ontsteking
H ₂	Waterstof
ICE	Interne verbrandingsmotor
LNG	Vloeibaar aardgas