

Brintbil med forbrændingsmotor



af

Lars Yde

Juni 2002

Projektet er udført med tilskud
fra Brintprogrammet som
administreres af Energistyrelsen
J.nr. 1763/99-0003

Brintbil
med
forbrændingsmotor

af
Lars Yde

Juni 2002

Projektet er udført med tilskud
fra Brintprogrammet som
administreres af Energistyrelsen
J.nr. 1763/99-0003

FC-print

Juni 2002

INDHOLDSFORTEGNELSE

<u>INDLEDNING</u>	<u>4</u>
<u>BAGGRUND.....</u>	<u>4</u>
<u>PROJEKTFORLØBET.....</u>	<u>5</u>
<u>FREMGANGSMÅDE.....</u>	<u>6</u>
<u>SIKKERHED (HAZOP).....</u>	<u>7</u>
<u>MOTORSTYRINGEN.....</u>	<u>8</u>
<u>DYSER</u>	<u>9</u>
<u>BRINTTILFØRSEL VIA EN ELLER TO INDSUGNINGSPORTE.</u>	<u>12</u>
<u>VANDINJEKTION</u>	<u>14</u>
<u>BEREGNING AF MOTORYDELSE.....</u>	<u>15</u>
<u>THEORETICAL ENGINE OUTPUT.....</u>	<u>16</u>
<u>RESUME AF “THEORETICAL ENGINE OUTPUT”.</u>	<u>17</u>
<u>MOTORYDELSEN I PRAKSIS.....</u>	<u>17</u>
<u>KONKLUSION</u>	<u>19</u>

Indledning

En hurtig introduktion af brintbiler i Danmark kan ske på to fronter. Dels i form af nye ombyggede biler og dels i form af eksisterende køretøjer, som omstilles til brintdrift. Dette projekt baner vejen for den sidste kategori. Omstilling af biler til gasdrift er set før i den danske automobilhistorie. Første gang under 2. Verdenskrig og anden gang i slutningen af 1970'erne og i begyndelsen af 1980'erne.

Der eksisterer således allerede en tradition i befolkningen, som kan "udnyttes", hvilket er vigtigt, når en ny teknologi skal introduceres. Hvis der ved omtale trækkes paralleller til noget allerede kendt, afmystificeres teknikken. Omstillingen til LPG (Liquid Petrol Gas) blev foretaget af almindelige autoværksteder, som via efteruddannelse havde specialiseret sig i denne faglige disciplin.

Folkecenteret har allerede organiseret efteruddannelse af 4 værksteder i ombygning af dieslbiler til planteoliedrift. Samme model vil, når teknikken er klar, blive anvendt ved omstilling af benzinbiler til brintdrift.

Før det kan foregå i større omfang, skal der udvikles og installeres produktions-, distributions- og påfyldningsanlæg. Det er her oplagt at udnytte vindkraft til produktion af brint. Dette kunne især blive interessant for møllelav, som således ud over at levere strøm til medlemmerne også vil kunne levere brændstof til deres biler.

Baggrund

FC har sammen med et dansk motortrimningsfirma NaaK Trimning i et tidligere projekt, støttet af Energistyrelsen, afprøvet et nyt koncept til konvertering af benzinmotorer til brintdrift.

Konceptet er baseret på, at den originale indsprøjtningssystem for benzin er bibeholdt, og motoren er udstyret med en til formålet programmeret motorstyring, som ud fra målinger på motorens indsugning og udstødning regulerer tænding og benzinindsprøjtning. Det betyder, at i det øjeblik, motoren tilføres brint via indsugningsventilen, vil motorstyringen automatisk nedregulere benzintilførslen.

Det er således muligt at starte motoren på benzin for umiddelbart derefter at skifte over til brint. Der opnås herved en blid start samtidig med mulighed for at benytte benzin som backup i nødstilfælde.

Motoren har en bemærkelsesværdig rolig gang på ren brint uden antydning af tilbagelag eller fortænding, hvilket i litteraturen betegnes som hovedproblemet ved motorkonvertering til brintdrift.

IRD a/s, Forskningscenter Risø og Institut for Kemi, DTU har fra Brintprogrammet modtaget støtte til udvikling af en letvægtslagertank samt en metalhydridtank. De to lagre vil efterfølgende blive anvendt i brintbilen.

I første omgang anvendes et højtrykslager udviklet af IRD a/s, baseret på 10 stk. 9 liter standard dykkerflasker.

Projektforløbet

Udviklingen af brintbilen tog udgangspunkt i erfaringerne fra konverteringen af en 1,6 liter TOYOTA motor for stationær drift i et kraftvarmeanlæg. Konverteringen forløb helt planmæssigt uden tekniske problemer. Det gav os mod til at gå i gang med konverteringen af en bil med forbrændingsmotor til brintdrift efter samme koncept.

De efterfølgende erfaringer med brintbilen har lært os, at først når en brintmotor skal yde effekt og derfor bliver varm, bliver det vanskeligt at styre forbrændingen. Kraftvarmemotoren skulle kun trække en 10 kW generator og var derfor ikke belastet væsentligt.

Vanskelighederne med at anvende brint som brændstof i en forbrændingsmotor består i, at brint, i forhold til benzin, kun behøver en tiendedel energi for at antænde og det tilmed ved en lidt lavere temperatur, end benzin behøver. Det medfører, at brinten antændes i utide af varmeområder (hot spots) i cylinderen. Det kan være ikke udstødt udstødningsgas, en varm kant på udstødningsventilen eller tændrøret osv.

Der er en lang række tiltag, som kan bringes i anvendelse for at undgå omtalte fejltænding. Generelt kan man sige, at jo mere effekt, man vil have ud af en motor, jo flere foranstaltninger må der sættes i værk.

For at kunne foretage en kvalificeret vurdering af hvilke foranstaltninger, der er mest hensigtsmæssige for vores motor, har vi inddraget flere eksperter fra Tyskland. Det er folk, som har erfaringer fra allerede gennemførte brintbilprojekter. Vi har afholdt to workshops, hver af to dages varighed med tre forskellige eksperter. De fandt sted hos Naak Trimning, som udfører det praktiske arbejde med konverteringen.

Resultatet af disse workshops blev en prioriteret liste af tiltag, som vi derefter gik i gang med at implementere.

Ud fra de tyske erfaringer er det muligt at opnå 40% af benzineffekten blot ved at udskifte benzindyserne med brintdysere. 50% kan opnås med vandinjektion eller kompressor og 70% ved derudover at ændre på ventilernes åbnings- og lukketider, anvende specielle tændrør, ventiler, stempler og stempelringe samt ændre på kompressionsforholdet.

Den omstændighed, at vi ønsker at udvikle en dual fuel motor kan måske vise sig at komplicere sagen yderligere, fordi eventuel tilsodning fra benzindriften af forbrændingskammeret kan udvikle sig til hot spots under brintdriften.

Det var projektets mål at nå frem til et enkelt konverteringskit, hvormed biler kan konverteres til brintdrift. Så langt er vi ikke nået; men det er lykkedes i praksis at nå den beregnede motorydelse på brintmotoren, hvilket svarer til 50% af ydelsen på benzin. I tal er det 44 kW, hvilket er det dobbelte af maksimale ydelse i en Citroën el og 4 gange så meget som den nominelle ydelse i en Citroën el. Ydelsen er tilmed opnået uden vandindsprøjtning i indsugningen.

Resultaterne er opnået ved testkørsler i prøvebænk. I et efterfølgende projekt vil motorstyringen blive færdigprogrammeret, idet kun punkterne for maksimal ydelse er indlagt. Derefter skal motoren flyttes tilbage til bilen og testes på en lukket bane.

Set i bakspejlet har vi været overmodige, fordi det gik så nemt med den første motor. Vi opdagede ikke, at det først er, når motorens effekt øges, at problemerne opstår. Det erfarer vi først ret sent i projektføreløbet, men fandt så eksperter med den nødvendige viden til at finde løsninger.

Vi tror fortsat på, at det kan lade sig gøre at udvikle et kit til enkel konvertering af biler med forbrændingsmotorer til brintdrift; men det tager tid. Ikke kun fordi der er en række forsøg, som skal gennemføres; men også fordi der er meget lange leveringstider på de komponenter, der skal bruges. Midt i februar 2002 bestilte vi f.eks. en ny indsugningsmanifold. Den blev først leveret den 28. maj. Det betød, at vi i tre og en halv måned ikke har kunnet arbejde med motoren.

Den værste tidsforsinkelse gennem hele projektet har dog været, at vi ligesom landmændene og turisterhvervet er underlagt årstiderne. Det skyldes, at det værksted, som vi entrerer med, er 95% optaget af motorløb i sommerhalvåret, hvilket betyder at værkstedet kun i meget begrænset omfang kan arbejde med brintbilen mellem den 1. april og den 1. oktober.

Fremgangsmåde

Arbejdet med udvikling af teknikken til konvertering af 16 ventils motorer til brintdrift blev udført i firmaet NaaK Trimnings værkstedsfaciliteter for trimning af højtydende benzinmotorer til motorsportsbiler. Det betød, at værkstedet skulle ryddes, og brintmotoren rigges til, hver gang der skulle arbejdes med den.

Det blev derfor besluttet at indrette et specielt motorlaboratorium hos NaaK til brug for det fortsatte udviklingsarbejde med brintbilen.

Laboratoriet blev indrettet med en prøvebænk, hvor motoren blev placeret og belastet med en hvirvelstrømsbremse. Brintforbruget kan måles med en gasmåler, således at motorens effektivitet kan beregnes.



Brintmotor i prøvebænk

En af NaaK Trimning udviklet og til formålet programmeret motorstyring regulerer tænding og brændstofførelse ud fra målinger på motorens indsugning og udstødning.

Til måling af motorens emissionsværdier er der indkøbt en 5-gasmåler. Måleren kan detektere CO, CO₂, HC, O₂ og NO_x samt beregne lambdaværdier.

For at sikre maksimal sikkerhed er laboratoriet kraftigt ventileret, og der er opsat en gasdetektor, som giver alarm ved en brintkoncentration på ca. 10% af den nedre eksplosionsgrænse.

Sikkerhed (HAZOP).

I projektansøgningen er der under punkt 9 "Redegørelse for sikkerhedsforhold anført":

Dansk Gastekniks Center (DGC) bliver, med henblik på testkørsel på lukket bane, inddraget i projektet til udarbejdelse af de nødvendige sikkerhedsforskrifter samt indhentning af myndighedsgodkendelser. Det er i budgettet forudsat, at denne ydelse stilles gratis til rådighed, idet DGC selv ansøger Brintprogrammet om midler.

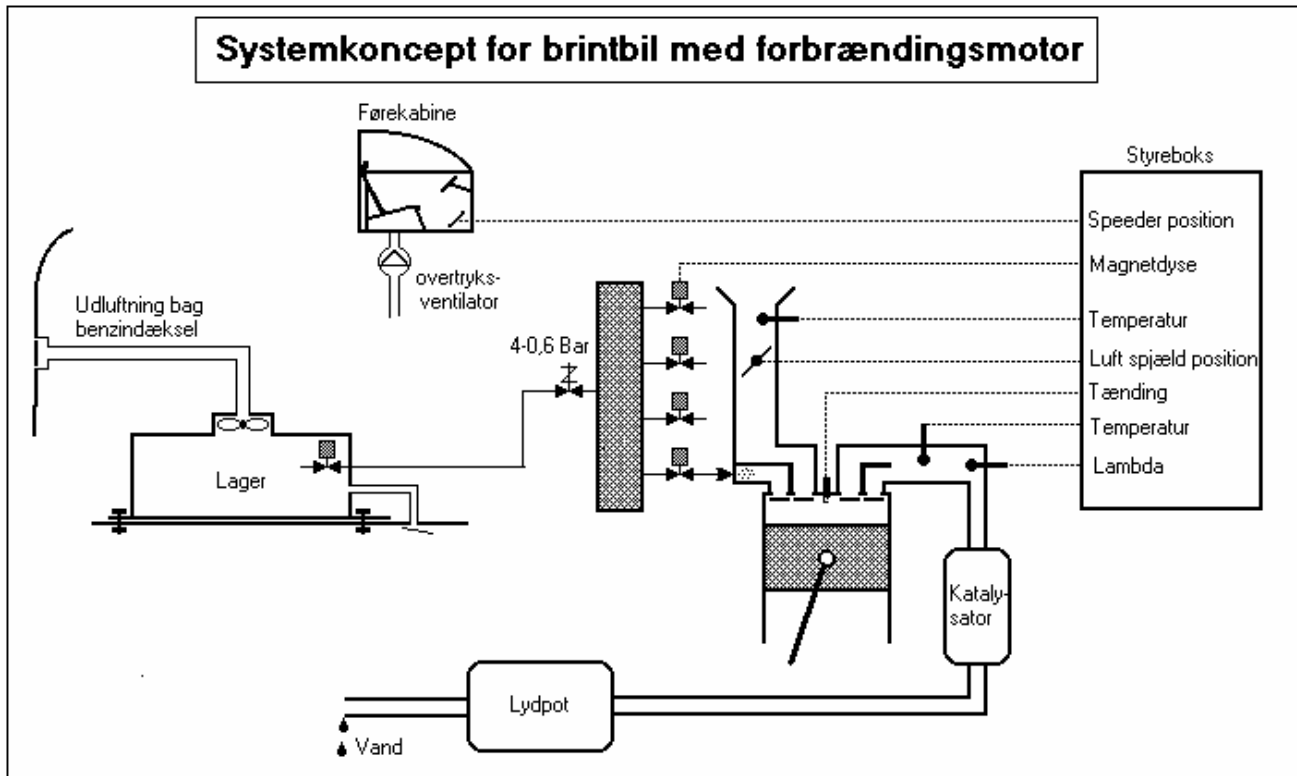
Under de indledende øvelser til udarbejdelse af det nødvendige materiale for en myndighedsgodkendelse af køretøjet har det vist sig, at dette arbejde ikke som forudsat i ansøgningen kan udføres af DGC alene, men kræver Folkecenterets og NaaK Trimning's medvirken i ganske betydelig grad.

Da det ikke var muligt at gennemføre sikkerhedsarbejdet indenfor det bevilgede budget, blev der sendt en tillægsansøgning til Brintprogrammet.

Brintudvalget indstillede ansøgningen til bevilling; men Energistyrelsen fulgte ikke indstillingen.

Fra DGC ønskede man at udføre en såkaldt Hazard and Operability (HAZOP) analyse. En meget omfattende øvelse som kræver detaljeret specifikation af alle komponenter samt analyse af konsekvenserne af et evt. svigt. Herudover forslag til at imødegå konsekvenserne. Nedenfor er vist tegningen, som blev brugt til HAZOP analysen.

Analysen blev gennemført i samarbejde med DGC og afrapporteret under projektet "Sikkerhedsforhold samt varetagelse af sikkerhedsmæssige aspekter i forbindelse med de øvrige projekter i Brintprogrammet".



Motorstyringen

Motorstyringen programmeres grafisk ved at indtaste sammenhørende værdier for speederstilling, motoromdrejningstal og benzin eller brinttilførsel i et grafisk billede samt sammenhørende værdier for speederstilling, motoromdrejningstal og tændings-tidspunkt i et andet billede. Der er således $16 \times 16 = 256$ punkter i hvert billede (tabel), som skal indlægges. I alt 512 punkter. Motoren skal køre ca. 15 minutter i hver punkt for at teste punktet. Et meget tidskrævende arbejde som kræver et livs erfaring for at kunne gøre det optimalt.

Det er netop denne disciplin, som er Naak's speciale og som hvert år indbringer mange første-, anden- og tredjepladser i danske motorløb.



Grafisk visning af tabellen for brinttilførsel



Grafisk visning af tabellen for tænding

Dyser

Valg af dyser er et kompromis mellem: Reaktionstid, flow, præcision og levetid. Ved 6.000 rpm varer indsugningstakten 5ms svarende til 180 graders drejning af krumtappen. Det vil sige, at indenfor disse 5ms skal dysen nå at åbne, tilføre den nødvendige brintmængde til cylinderen og lukke igen. Jo større hul der er igennem ventilen, jo større og tungere et ankeret. Det medfører større reaktionstid. Hvis brintrykket hæves, stiger flowet; men da ankeret skal åbne mod et højere tryk, nedsætter det reaktionstiden. Billederne viser de forskellige ventiler og dyser, der har været anvendt, og som alle måtte opgives igen. Til sidst fandt vi en ventil fra det japanske firma KEIHEN, en ventil som skulle have en levetid på 240.000 km, og som anvendes i naturgasbiler. KEIHEN dyserne har samme udseende som BOSCH dyserne; men anvender et teflonsæde og opnår derved lang levetid også med gasser, som ikke er smørende, F.eks. brint.



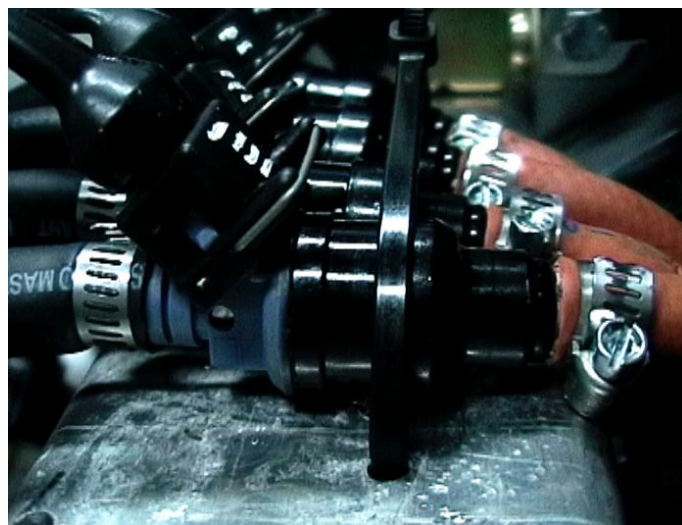
*Ventil som anvendes til tilførsel af lattergas (ilt) til motorsportsvogne.
Måtte kasseres p.g.a. for ringe levetid*



*Gasdyse som anvendes til naturgasbusser.
Måtte kasseres p.g.a. for ringe flow.*

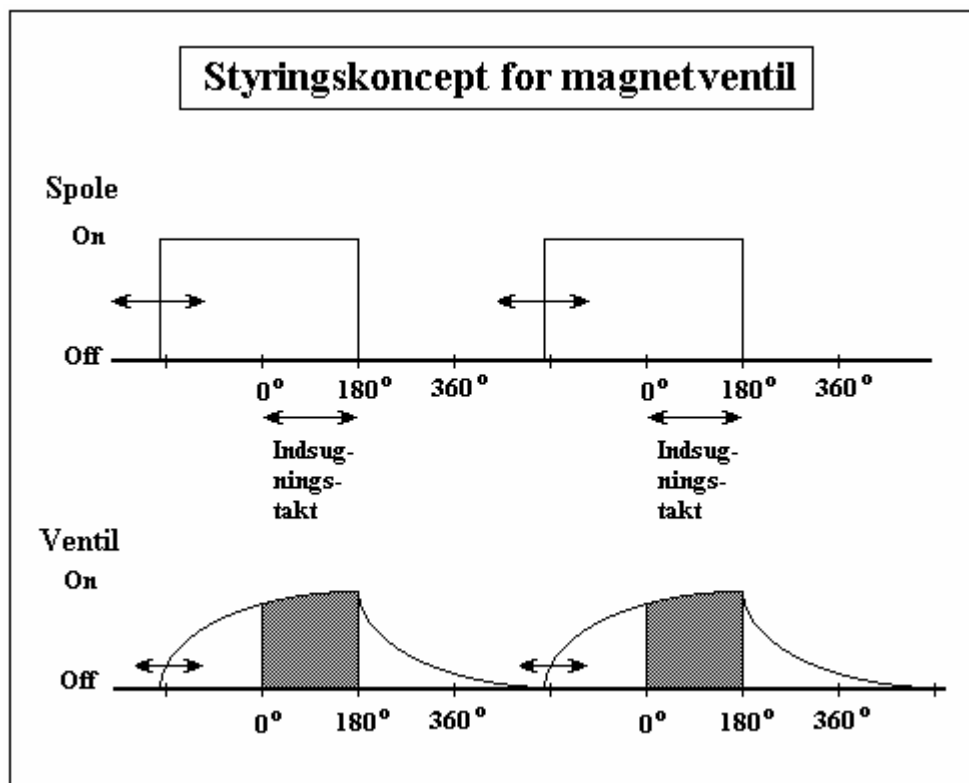


*Vippeventil som anvendes i industrianlæg, hvor der kræves
stort flow og lille reaktionstid.
Måtte kasseres p.g.a. at de fire ventiler ikke regulerede ens, og fordi flowet gennem
ventilen skiftede fra laminar til turbulent, når brinttilførelsen blev forøget, hvilket
medførte at flowet faldt i stedet for at stige.*

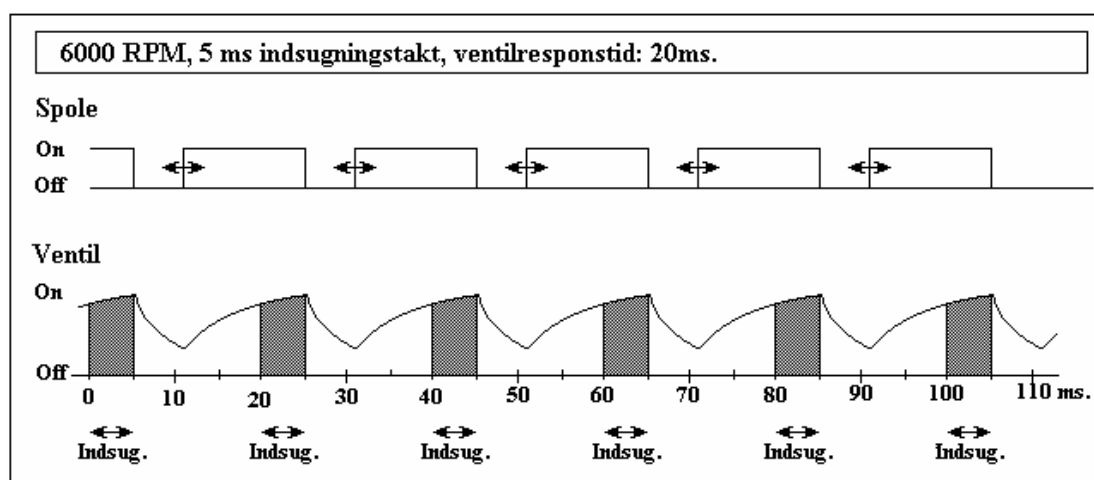


*BOSH ventil som anvendes i naturgasbusser.
Måtte kasseres p.g.a. for ringe levetid.*

Indsugningsventilen er åben fra ca. 1 til 180 graders drejning af krumtappen. Ved at variere hvor mange grader før topdysen begynder at åbne, kan den tilførte brintmængde reguleres. Når stemplet er i bundstilling, afbrydes strømmen til dysens elektromagnet, og den begynder at lukke.

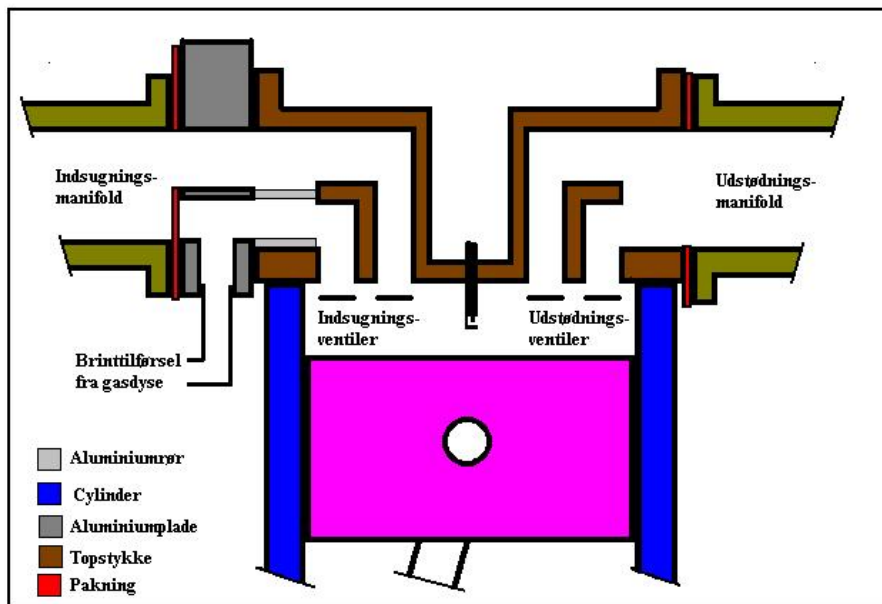


Ved høje omdrejningstal kan en langsom dyse ikke nå at lukke, før den skal åbne igen. Den vil dog stadig regulere, og slid på ventilsædet undgås.

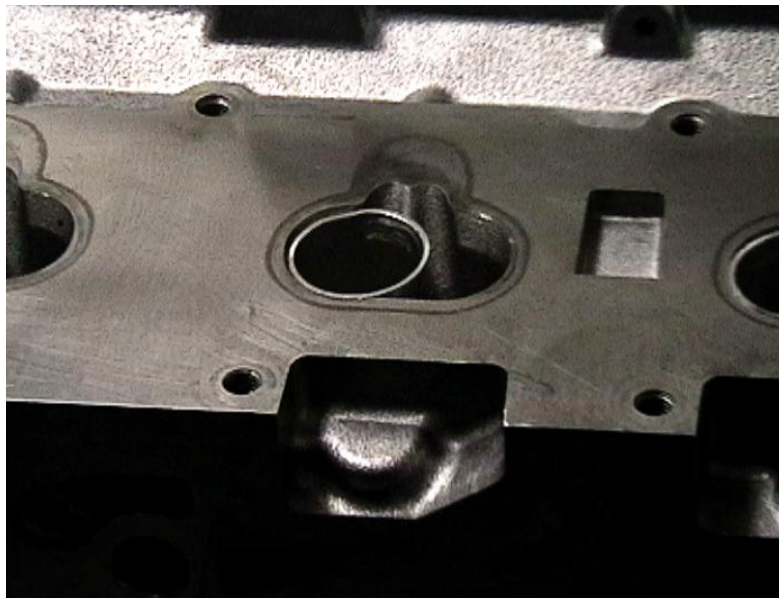


Brinttilførsel via en eller to indsugningsporte.

For at eliminere tilbageslag (backfire) er der arbejdet med separat tilførsel af brint og luft til forbrændingskammeret. Dvs. en indsugningsport og ventil til brint. Og en port og ventil til luft. Det virker fint, men begrænser motorens aspiration og dermed effekt. Konceptet blev derfor opgivet i forhold til bilmotorer; men anvendes fortsat på stationære kraftvarmeanlæg, hvor kravet til levetid dikterer reduceret motorydelse.



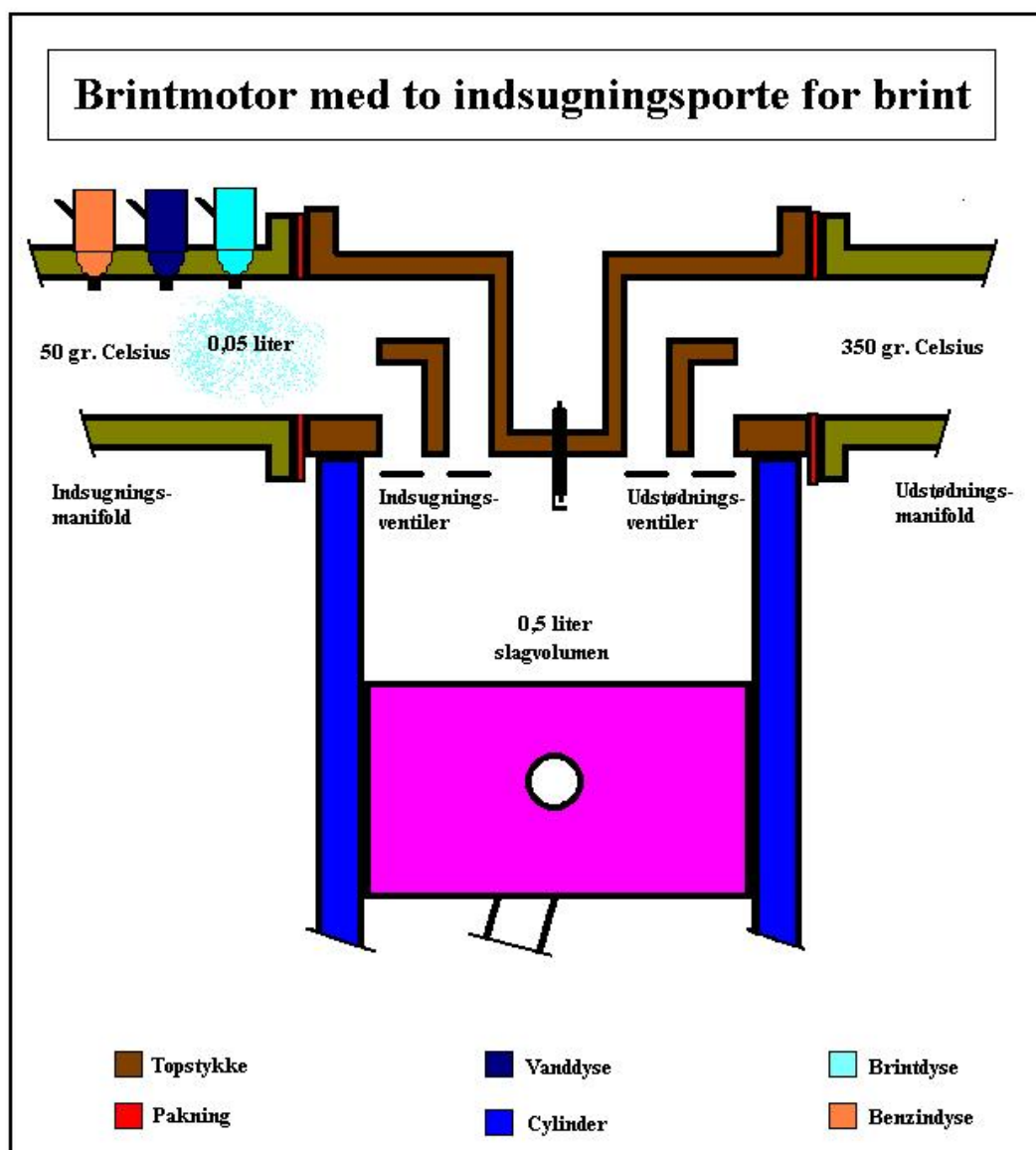
Brinttilførsel via separat indsugningsport



Alu-rør indsat i topstykket for at adskille de to indsugningsporte.

To betingelser skal opfyldes, for at en brint luft blanding kan antændes. Temperaturen skal være over 520 grader Celsius, og der skal være en tændenergi på mindst

0,02 mJ. Disse to betingelser må derfor ikke opfyldes, før tændrøret tænder, ellers vil det medføre fejltænding. 0,02mJ svarer til en afkøling på 100 grader Celsius af et stykke jern på $60 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$. Det illustrerer, hvor lidt der skal til for at forårsage fejltænding; men indikerer også, hvor lidt køling ved vandindsprøjtning der skal til for at undgå hot spots. Motoren får kun tilført brint, når både magnetdysen og motorens indsugningsventil er åben. Det er derfor muligt at åbne dysen, før indsugningsventilen åbner og lukke dysen igen, efter ventilen er lukket. Det nedsætter kravet til dysens reaktionstid ganske betydeligt. Det er således ikke af reguleringstekniske grunde nødvendigt med meget hurtige dyser, men af forbrændingsmæssige årsager er det ønskeligt at tilføre brinten så sent som muligt i indsugningsfasen. Herved opnås, at den indkomne atmosfæriske luft kan nå at køle forbrændingskammeret, inden brinten injiceres, hvilket er meget væsentligt for at undgå fejltænding p.g.a. hot spots.



Brinttilførsel via to indsugningsporte

Denne nye insugningsmanifold der er installeret for at give maksimal mulig aspiration.



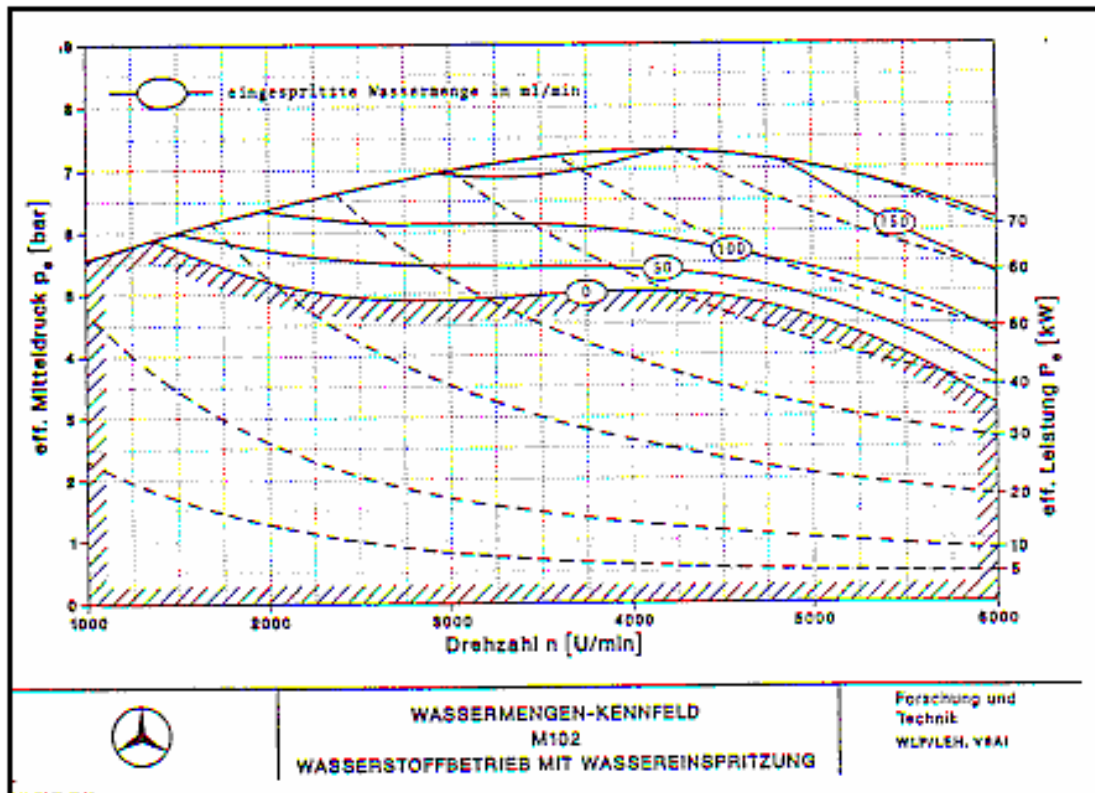
Indsugningsmanifold for maksimal aspiration

Vandinjektion

Testresultaterne, som vises i figuren nedenfor, er fra Daimler-Benz Stuttgart af en 2,3 liter M102 motor, viser vandindsprøjtning med 0 til 150 ml/minut ved varierende motorydelse. Ved 2.500 rpm indsprøjtes der vand ved motorydelser på over 22 kW for at undgå fejltænding.

Test på Focus-motoren, som er på 2,0 liter viste, at der indtraf fejltænding ved 11 kW med anvendelse af konceptet med separat brinttilførsel via den ene indsugningsport og luft via den anden.

Efter at dette koncept blev opgivet og den nye indsugningsmanifold var installeret, som gav maksimal mulig aspiration, blev det muligt at opnå fuld brintmotorydelse (44 kW) uden vandinjektion.



Beregning af motorydelse

Udgangspunktet for konverteringen af motoren var at det skal være enkelt.

Det er principiel muligt at opnå motorydelser svarende til benzindrift eller mere. Det kan gøres ved at reducere iltoverskuddet, ændre knastakslen så ind- og udstødningsventilerne ikke er åbne samtidig og derefter pumpe luft og brint ind i motoren under tryk. Det vil sige bygge motoren om til en kompressormotor; men det er ikke enkelt.

Dermed bliver motoreffekten et kompromis mellem ønsket om mest mulig effekt og ønsket om en enkel konvertering, som billigt kan implementeres på så mange biltyper som muligt.

Det skal tages med i overvejelserne om, hvad der er en rimelig motorydelse, at konceptet åbner mulighed for hybriddrift. Det vil sige brintdrift i byen og benzindrift på lange distancer på motorvejen. Indtil det bliver almindeligt at kunne tanke brint på tankstationerne er det en oplagt driftsstrategi.

De efterfølgende teoretiske overvejelser er skrevet på engelsk, fordi de er brugt som oplæg til vore udenlandske samarbejdspartnere. Efterfølgende er der et kort resume på dansk.

Theoretical engine output.

The ratio between hydrogen and oxygen has to be as 2 to 1 in order to give a complete combustion without any excess of oxygen. The reason is that when hydrogen and oxygen reacts with each other it forms water. Water has the chemical formula H_2O . From this it can be seen that water contains two hydrogen atoms for each oxygen atoms. According to the law of Avogadro's the hydrogen then will occupy a volume of two times that of the oxygen.

The oxygen is supplied to the motor by the air. Air consists roughly of 1 part of oxygen and 4 part of nitrogen. From this it can be calculated that the gas mixture supplied to the engine consists of:

1/7 of oxygen	(14.3 %)
2/7 of hydrogen	(28.6 %)
4/7 of nitrogen	(57.1 %)

Calculations and measurement on a TOYOTA engine gave the following results:

Because the engine is a 4-stroke, 1.6 litre and is operated at 2,474 rpm the gas flow through it can be calculated as followed: $1.6 \times 2474 / 2 = 1,980$ litre per minute or 119 m^3 per hour.

In reality, the cylinder will not be filled 100% in every stroke. Something like 75% is more likely, which makes it $119 \times 0.75 = 89 \text{ m}^3$.

$2/7$ of the 89 m^3 is hydrogen. That is 26 m^3 per hour.

Every m^3 of hydrogen has an energy content of 3,5 kWh. Therefore the engine is supplied by $26 \times 3.5 = 91$ kWh per hour. That is the same as 91 kW.

This is only true if the gas mixture is as specified above, which is not the case. In order to get maximum efficiency and minimum emission of NO_x the engine is operated at oxygen excess at around 10%. Oxygen is supplied to the engine by the air. The volume that is occupied by the oxygen that will not be combusted will displace some hydrogen and nitrogen. How much can be seen from the figure below.

The left side of the figure shows pure atmospheric air (no combustion). That is 20% oxygen and 80% nitrogen. The right side of the figure shows the gas mixture at 100% combustion of the hydrogen with 0% excess of oxygen. When the engine operates it will be somewhere between these two points, 1 and 2. From the figure it can be calculated that oxygen excess of 10% the hydrogen content of the gas mixture will be 14,3% which is 50% of the 28,6% corresponding to 0% of excess of oxygen.

Therefore the power supply to the engine will be reduced to $0.50 \times 91 \text{ kW} = 45.5 \text{ kW}$.

The efficiency of the engine was measured to around 40%. Therefore the shaft power can be calculated to $45.5 \times 0.40 = 18.2 \text{ kW}$ at 2,474 rpm.

If the speed is increased to 6,000 rpm which is about maximum for this engine, then the power will raise accordingly to around: $18.2 \times 6000 / 2474 = 44 \text{ kW}$

The 44 kW has to be taken as the maximum power output from the energy point of view. There are some mechanical circumstances that may make it impossible to reach this power.

When the piston in the exhaust stroke is on its way up the inlet valve opens a little before the piston reaches the top position and the exhaust valve will not close until shortly after the piston's top position. The result is that the inlet and the exhaust valves are opened at the same time. Therefore if the hydrogen enters the cylinder with too high speed it will shoot through the cylinder and out of the exhaust valve. It will cause low efficiency and risk of explosions in the exhaust system.

One solution could be to start the injection after the exhaust valve has closed. It gives less time for the injection of hydrogen and therefore it should be injected under higher pressure in order to get the required amount.

Resume af "Theoretical engine output".

Nedenstående grafik er udarbejdet til bestemmelse af den maksimale mulige ydelse fra en brintmotor. Til venstre i grafikken vises gasblandingen, som pumpes igennem motoren, idet den trækkes rundt af selvstarteren. Til højre vises gasblandingen ved fuldstændig forbrænding af den tilførte brint. Dvs. at alt ilt i den atmosfæriske luft, som pumpes igennem motoren, forbruges. Den uforbrugte iltmængde kan således variere mellem 0 og 20% af gasblandingen. Drifterfaringerne med Focus-motoren viser, at motoren arbejder med de bedste emissionstal ($\text{NO}_x = 10$ ppm) ved et iltoverskud på 10%. Af grafikken kan det ses, at brintindholdet da er 14,3% af gasblandingen (midt imellem 1 og 2). Ved 6.000 omdrejninger pumpes der: $2,0 \text{ liter} \times 6000 / 2 = 6.000 \text{ liter}$ igennem motoren. Det er $360 \text{ m}^3/\text{h}$. Med en fyldningsgrad på 75% giver det 270 m^3 . Med en brændværdi på $3,5 \text{ kWh}/\text{m}^3$ og en motorvirkningsgrad på 32%, kan motorydelsen beregnes til: $270 \times 0,143 \times 3,5 \times 0,32 = 44 \text{ kW}$. Hvis motoren istedet kører 0% iltoverskud, bliver effekten 88 kW, fordi der så vil være plads til dobbelt så meget brint i blandingen.

44 kW svarer til ca. 50% af benzinydelsen og er ca. det dobbelte af, hvad motoren i en elbil kan yde maksimalt og ca. fire gange så meget som gennemsnitsydelsen.

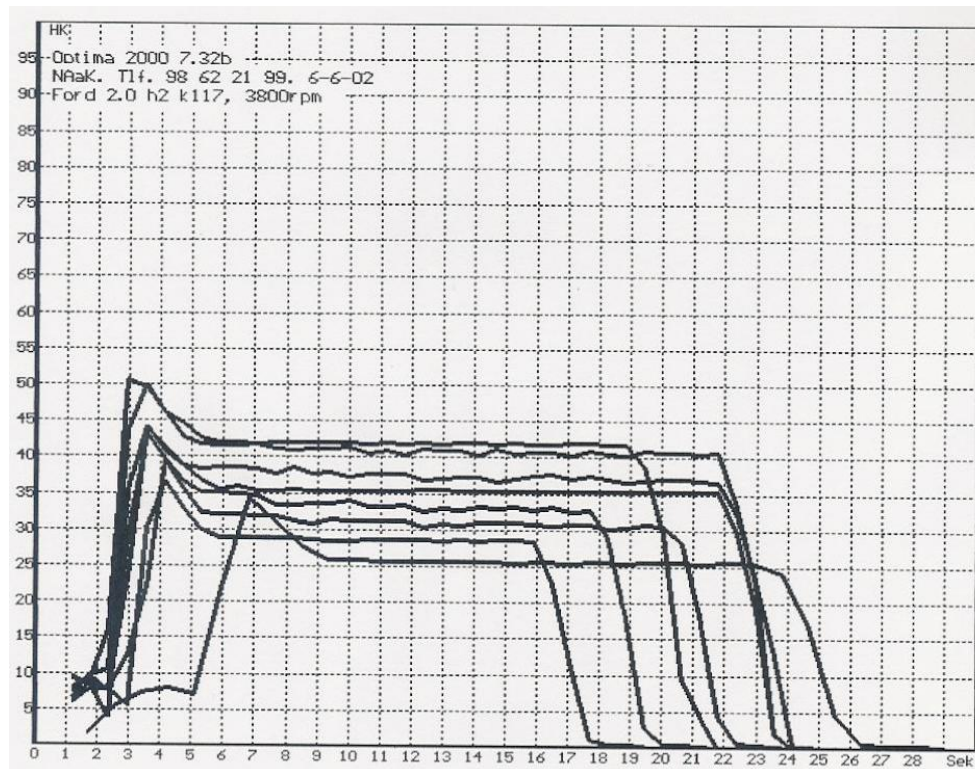
Motorydelsen i praksis.

De 44 kW er opnået ved at anvende dyser, som kan levere det nødvendige flow. Dyserne skal også være hurtige, således at brinten kan tilføres sidst i indsugningstakten, de skal arbejde præcist, dvs. ens, og de skal være holdbare. Motoren har fået monteret en ny indsugningsmanifold, som sikrer maksimal mulig aspiration gennem begge indsugningsporte og dermed også maksimal køling af forbrændingskammeret. Dermed er fejltænding forhindret.

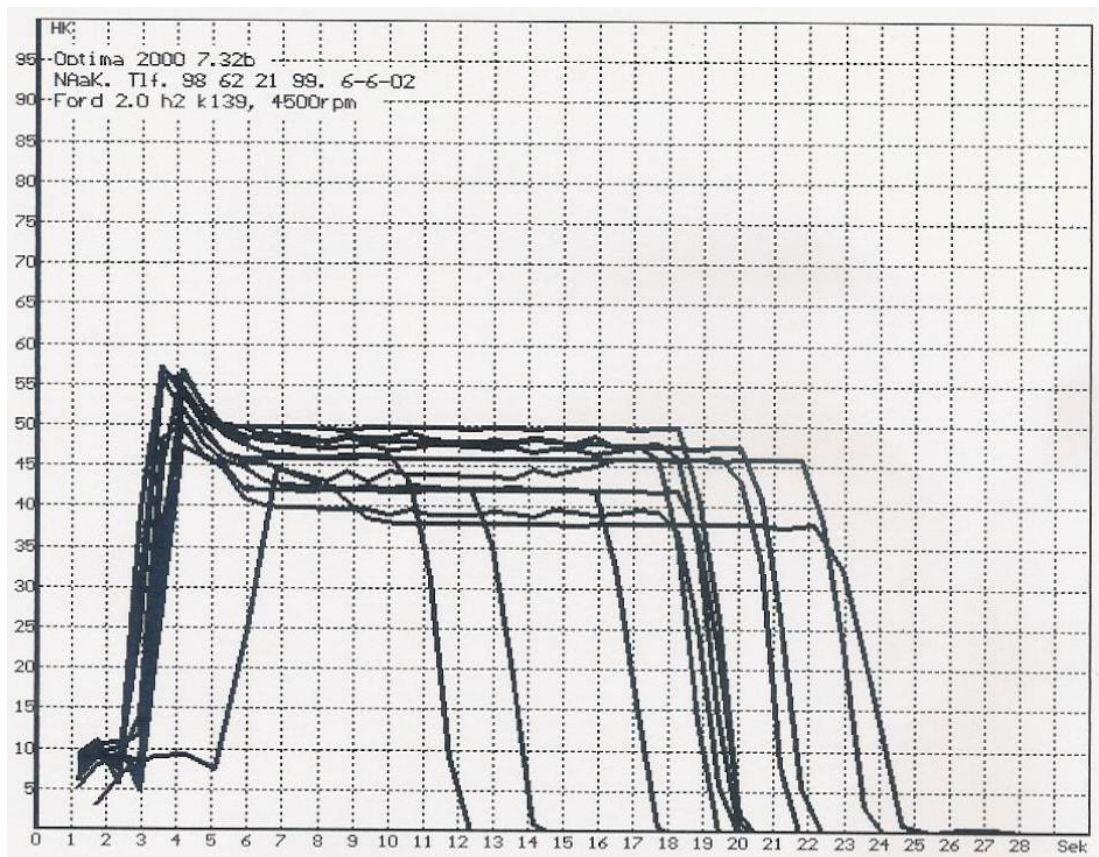
Ved at reducere motorydelsen, forøges kølesystemet relativt, hvilket giver endnu mere køling, hvorved fejltænding forhindres.

Nedenfor er vist de målte effektkurver ved henholdsvis 3.800 og 4.500 rpm. De viser maksimumeffekter på henholdsvis 42 og 50 hk. svarende til 31 og 37 kW.

Ydelsen ved maksimal omdrejningstal på 6.000 rpm. er ikke målt, men kan beregnes til $37\text{kW} \times (6000/4500) = 49\text{ kW}$, idet det forudsættes, at momentet er ens ved de to omdrejningstal. Denne forudsætning kan efterprøves ved at beregne effekten ved 4.500 rpm. ud fra effekten ved 3.800 rpm, idet momentkurven erfaringsmæssigt er flad mellem 4.000 og 6.000 rpm. Det giver $31\text{ kW} \times (4500/3800) = 37\text{ kW}$, hvilket svarer til det målte.



Effektkurve målt ved 3.800 omdrejninger pr. minut. Maksimum effekt 42 hk.



Effektkurve målt ved 4.500 omdrejninger pr. minut. Maksimum effekt 50 hk.

Konklusion

Selv om der endnu mangler en del tidskrævende indlægning af sammenhørende tabelværdier i motorstyringen samt at flytte motoren tilbage til bilen og tilslutte den til højtrykslageret, så kan det konkluderes, at der er opnået ganske vigtige og betydningsfulde resultater i projektet. Det er at:

- 1) Der er udviklet og opbygget en fyldestation til optankning af to brintbiler, der hver kører 100 km pr. dag. Det er Folkecenterets egen Ford Focus og IRD's Fiat med brændselsceller. Denne del er afrapporteret i en selvstændig rapport.
- 2) Der er indbygget et højtrykslager i Ford Focusen på 90 liter 200 bar, dimensioneret til 100 km kørsel.
- 3) Der er udviklet en metode til omstilling af forbrændingsmotorer til brintdrift baseret på dansk knowhow.
- 4) Der er omstillet en 2,0 liter Ford Focus motor til brintdrift med en maksimal ydelse på 44KW.