
Rapport SGC 122

Vätgasinblandning i CNG

Förstudie



©Svenskt Gastekniskt Center - December 2001

Anna Karlsson
Chalmers Tekniska Högskola

Rapport SGC 122 ISSN 1102-7371 ISRN SGC-R-122-SE

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC´s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydgas AB
Öresundskraft AB
Lunds Energi AB
Nova Naturgas AB
Birka Värme AB
Göteborg Energi AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

I den här rapporten utreds vilka konsekvenser som fås, då vätgas injiceras i komprimerad naturgas, CNG, och används som fordonsbränsle. Vätgasens förbränningstekniska egenskaper samt egenskaperna hos själva bränsleblandningen utreds. Konsekvenserna som vätgasinblandningen medför på fordonet analyseras och teoretiska beräkningar har gjorts på de parametrar som påverkar fordonets drift mest. Även hur vätgastillförseln skall lösas tekniskt har utretts, hur vätgasen skall produceras, tankas och lagras.

En bränsleblandning som innehåller upp till 20 volymprocent vätgas ger goda förbättringar i motorn. Verkningsgraden höjs vilket innebär en minskad bränsleförbrukning och kolväteemissionerna minskar. Vätgasinblandningen ger en förhöjd förbränningstemperatur, varför emissioner av kväveoxider ökar. Detta kan dock motverkas genom att använda mer luft och ha en magrare blandning. En negativ konsekvens av vätgasinblandning är att risken för knackning i motorn kan öka.

Flamutbredningshastigheten ökar och antändningsgränserna för blandningen vidgas om metan innehåller mindre mängder vätgas.

Vätgasen kan tillverkas genom ångreformerings eller genom alkalisk elektrolys. Ångreformerings är det billigaste alternativet, medan alkalisk elektrolys är mer miljövänligt om elektriciteten kommer från förnyelsebara energikällor. Dessa metoder kommer troligtvis att användas även i framtiden. Den främsta produktionsmetoden i framtiden kommer att bli alkalisk elektrolys på grund av metodens miljöfördelar. Skall försök göras på ett gasfordon bör dock vätgasen köpas på flaska. Detta är det billigaste alternativet för den mängd vätgas som då förbrukas. Vätgasen kan lagras i flytande form eller som komprimerad gas. Troligtvis kommer lagring som komprimerad gas i högtrycksbehållare att användas eftersom det är enklare, billigare och kräver mindre energi. Då endast små mängder vätgas skall lagras inuti ett fordon är metallhydrid ett lämpligt alternativ på grund av att lagringsformen tar upp ett litet utrymme. I framtiden kommer vätgasen att fortsätta lagras i denna form. Fler och bättre behållare kommer att finnas tillgängliga och högre tryck kommer att kunna användas vid lagringen.

Den senare delen av rapporten utgör ett förslag på ett försöksprojekt som skulle kunna genomföras på en naturgasdriven stadsbuss i Malmö. Hur mycket förändringar som måste göras på motorsystemet i bussen beror på hur mycket vätgas som tillsätts, små mängder vätgas kräver inga förändringar alls. Beräkningar på ekonomi har gjorts, samt en analys av de miljökonsekvenser som användningen av vätgasen medför. Trots att det krävs relativt stora mängder energi för att framställa vätgas minskar energiförbrukningen totalt sett på grund av den förhöjda verkningsgraden på motorn om en vätgasinblandning på 20 volymprocent används. De lagar och bestämmelser som finns idag samt säkerhetsaspekter på användning av vätgas har också berörts. De bestämmelser och fordonsgodkännanden som finns i dag för gasfordon gäller endast fordon som körs på ren naturgas och några regler gällande fordon som drivs av vätgasinblandad naturgas finns därför inte.

Abstract

In this report the consequences of hydrogen supplementation of compressed natural gas, CNG, as a vehicle fuel are investigated. The burning properties of hydrogen and mixtures of hydrogen and methane are investigated. The consequences that hydrogen supplementation of natural gas brings on the vehicle are analyzed and theoretical calculations have been made on the most important parameters. A technical solution is also included, how hydrogen could be produced, refilled and stored.

A mixture of natural gas and 20-volumepercent hydrogen gives good improvement in the engine. The efficiency increases, which gives lower fuel consumption and the emissions of hydrocarbons decrease. Hydrogen supplementation of natural gas gives a higher flame temperature and this gives higher emissions of nitrogen oxides. By using a leaner mixture of air and fuel, this could be obstructed. A disadvantage of hydrogen supplementation of natural gas is an increased risk for knocking in the engine.

The flame burning velocity raises and the ignition limit becomes wider if natural gas contains certain amounts of hydrogen.

Hydrogen could be produced by steam reforming of natural gas, or by alkaline electrolysis of water. Steam reforming is the cheapest alternative, but alkaline electrolysis is more environmental friendly if the electricity that is used comes from renewable energy sources. These production methods will probably be used in the future. Alkaline electrolysis will probably be the dominating hydrogen production method in the future because the advantages for the environment. If only one vehicle is to be tested, the hydrogen could be bought in bottles. This would be the cheapest alternative for the amounts that would be used for the vehicle in the test. The hydrogen could be stored as a liquid and as a compressed gas. Storage as a compressed gas at high pressure will probably be the most used method because it is cheap and has the lowest energy demand. Metal hydrides could be used if a small amount of hydrogen should be stored in the vehicle. Hydrogen storage in metal hydrides require a very little space on the vehicle. This storage method will also be used in the future. Containers for higher pressures will be available in the future.

The later part of this report constitutes a proposal for a project with one bus in Malmö that runs on hydrogen supplemented natural gas. The changes that has to be done in a natural gas engine depends on the amount of hydrogen added, small amounts of hydrogen don't require any changes at all. Economic calculations have been done, and an analysis of the environmental impact that the use of hydrogen brings has also been done. Despite the big amounts of energy that is needed for hydrogen production, the total energy consumption decreases because of the higher efficiency in the engine if 20-volumepercent hydrogen is used. Today's laws, regulations and safety aspects for natural gas vehicles and filling stations are included in this part. The existing regulations for vehicles are available only for natural gas vehicles. Regulations for hydrogen supplemented natural gas vehicles do not exist.

Innehållsförteckning

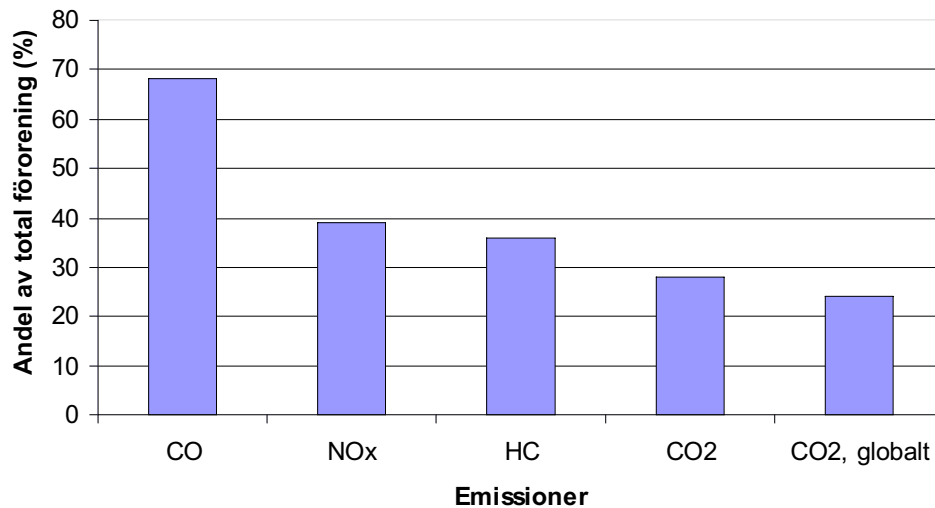
1. Inledning.....	5
1.1. Bakgrund	5
1.2. Syfte	6
1.3. Utförande	6
2. Vätgasens egenskaper.....	7
3. Metan-vätgasblandningars egenskaper vid användning som fordonsbränsle.....	9
3.1. Motorkonsekvenser vid vätgasinblandning i naturgas	9
3.1.1. Bränsleförbrukning	9
3.1.2. Emissioner	10
3.1.3. Prestanda	12
3.1.4. Kallstart	13
3.1.5. Körbarhet	13
3.1.6. Slutsats	13
4. Förbränning med vätgastillsats – allmänna mekanismer.....	15
4.1. Antändningsgränser	16
4.1.1. Chemkin	16
4.1.2. Beräkningsresultat	17
5. Metoder för vätgasproduktion.....	20
5.1. Ångreforming	20
5.2. Elektrolys	22
5.3. Biprodukter	24
5.4. Katalytisk krackning	24
5.5. Inköpt vätgas	24
5.6. Produktion av vätgas ombord på fordonet	25
6. Lagring av vätgas.....	26
6.1. Lagring av flytande vätgas	26
6.2. Komprimerad vätgas	26
6.3. Blandad lagring	27
6.4. Metallhydrider	27
7. Tankning av vätgasinblandad CNG.....	28
7.1. Kompressorer	28
7.2. Lager	28
7.3. Dispenser	29

8. Naturgasfordon.....	30
8.1. Lätta fordon	30
8.2. Tunga fordon	30
8.3. Fordon för vätgasinblandad naturgas	31
9. Lagar och föreskrifter.....	33
9.1. Tankstationen	33
9.2. Fordon	33
10. Säkerhetsaspekter.....	34
10.1. Säkerhetsaspekter för lagring av vätgas	34
10.1.1. Komprimerad vätgas	34
10.1.2. Flytande vätgas	34
10.2. Säkerhetsaspekter för fordon som drivs av vätgas	35
11. Försöksprojekt.....	36
11.1. Ekonomi	37
11.2. Miljökonsekvenser	37
11.2.1. Energianalys	38
11.2.2. Emissioner	38
11.2.2.1. Koldioxid	39
11.2.2.2. Övriga emissioner	39
12. Slutsatser.....	41
12.1. Genomförbarhet för ett projekt	41
12.2. Fortsatt arbete	41
Referenser.....	43

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Under senare år har stora ansträngningar gjorts för att utveckla och införa alternativa drivmedel som skall ersätta de konventionella drivmedlen bensin och diesel. Komprimerad naturgas (CNG) är ett av de tidigast använda alternativa drivmedlen. Den främsta orsaken till införandet av alternativa drivmedel är för att minska luftföroreningarna. Den dominerande källan till luftföroreningar är transportsektorn. De vanligaste föroreningarna är kolmonoxid, kväveoxider och kolväten, se figur 1. En minskning av dessa ämnen i luften skulle förbättra luftkvaliteten markant och minska de skadliga effekter som föroreningarna medför. Även lagar och regler för utsläpp av luftföroreningar skärps för varje år och fordonstillverkande företag måste därför utveckla fordon som släpper ut mindre mängder luftföroreningar. I figur 1 är växthusgasen koldioxid medtagen.



Figur 1. Emissioner från transportsektorn som en andel av totala emissioner till luft i USA. Koldioxidemissioner är också angivna ur global synvinkel.[14].

Vätgas anses som framtidens stora ersättare till de konventionella drivmedlen bensin och diesel. Vätgasens förbränningsprodukter ger inte upphov till några utsläpp av växthusgaser och utsläpp av övriga luftföroreningar, förutom kväveoxider, är mycket små. Utvecklingen av fordon med vätgas som fordonsbränsle pågår, men idag används inga vätgasfordon kommersiellt.

Vätgasinblandad naturgas har tidigare använts i stationära lean burn motorer, bland annat i Danmark. Effekterna av vätgasinblandningen har varit mycket goda i stationära motorer och intresset för vätgasinblandning i naturgas till fordon har ökat. Möjligheten att klara höga emissionskrav ökar stort vid vätgasinblandning av naturgas, medan problemen som uppstår vid ren vätgasdrift undviks effektivt eftersom det mesta av innehållet i bränslet fortfarande är naturgas. Eftersom båda bränslena oftast används i gasform är det lättare att blanda vätgas med naturgas än med något konventionellt bränsle, till exempel dieselbränsle.

1.2. Syfte

Syftet med detta examensarbete är att beskriva möjligheterna med vätgasinblandning och att utgöra ett underlag för att, i större skala, kunna genomföra försök och stimulera utvecklingen av vätgas/naturgas som fordonsbränsle. Examensarbetet skall resultera i en bedömning av tekniska, miljömässiga och ekonomiska konsekvenser och praktisk genomförbarhet av vätgasinjicering i CNG. Dessutom skall ett försök för vätgasinjicering i en gasdriven stadsbuss i Malmö beskrivas.

1.3. Utförande

Rapporten är baserad på litteraturstudier, information från personer på företag och branschorganisationer som arbetar med naturgas- och vätgasfordon. Litteraturstudien utfördes huvudsakligen på biblioteket på Chalmers Tekniska Högskola. En del information har även hämtats från Internet. Slutligen har beräkningar gjorts i Chemkin och Matlab.

2. Vätgasens egenskaper

Vätgasen är lukt- och färglös. Väte har en mycket låg kokpunkt, det enda grundämnet som har lägre kokpunkt är helium. Oförbränd vätgas är till skillnad från andra bränslen varken giftig eller fotokemiskt aktiv[13]. Vid expansion uppvärms vätgas till skillnad från andra gaser som i regel kyls vid expansion. Uppvärmningen beror på att vätgas har en negativ Joule-Thomson koefficient, medan de flesta andra gaser har positiva. Detta leder till problem vid lagring av vätgas; kylbehovet blir stort eftersom gasen kan överhettas vid expansion[15].

Vätgasen brinner med en het, nästan osynlig låga. I direkt solljus är lågan från brinnande vätgas helt osynlig, vilket är ett problem ur säkerhetssynpunkt. Emissiviteten är ofta mindre än 0.1, vilket kan jämföras med 0.8-0.9 för vanliga lysande lågor. Eftersom lågan avger mycket lite värmestrålning är risken för sekundär antändning liten[13].

Vätgasens förbränningsenergi per massenhet är den högsta bland idag tillgängliga bränslen. Dess låga densitet medför dock att förbränningsenergin per volymenhet är lägre än för kolväten. Flytande vätgas har cirka 27% av energiinnehållet i bensin, och komprimerad vätgas vid trycket 300 bar har endast 5 % av energiinnehållet i bensin[14].

Väte är lättantändligt i ett mycket brett koncentrationsområde blandat med luft eller rent syre. De vida antändningsgränserna kräver betydande säkerhet vid användning av vätgas. Det krävs dessutom ett mycket litet energitillskott för att orsaka en explosion. Jämförelsevis behövs endast en tiondel av vad som behövs för att tända bensin-luft[13].

Vätgas har en mycket hög förångningshastighet. Detta är positivt eftersom tidsperioden under vilken antändningsmöjligheter finns blir kort. Dock kan detta även medföra att stora lättantändliga moln bildas snabbt vid läckage. Den höga förångningshastigheten beror till stor del på att väte är det lättaste av alla grundämnena, och därför är mycket lättflyktigt. Vätgas är lättare än luft även om gasen är mycket kall, ned till - 243 °C är vätgasen fortfarande lättare [15].

En av vätgasens mest karaktäristiska egenskaper är den snabba förbränningshastigheten. Den höga förbränningshastigheten medför en större känslighet i övergång från deflagration till detonation, det vill säga flaman övergår från låg hastighet och låg densitet till överljudshastighet med tryckvågor som följd. Vätgas har en klart lägre undre detonationsgräns än exempelvis metan. Sannolikheten för explosiva förlopp vid stora vätgasutsläpp i fria utrymmen bedöms dock som mycket liten. Försök visar att explosion endast inträffar under vissa ideala förhållanden och med speciella detonatorer[21].

Vid förbränning av vätgas med rent syre bildas endast vatten som förbränningsprodukt;



Då vätgasen används i förbränningsmotorer blir sammansättningen av förbränningsprodukter annorlunda. De ämnen som bildas i betydande mängd vid förbränning är huvudsakligen kväveoxider. Dessa emissioner kan emellertid bli mycket låga om stort luftöverskott, $\lambda = 1.7$, används vid förbränningen, ($\lambda =$ luft/bränsletalet). Rester från smörjolja kan ge låga emissioner av kolväten, svavel, kolmonoxid och partiklar[9].

Oktan- och cetanvärden är inte väldefinierade för vätgas. Detta beror på att knockningsegenskaperna inte har högst prioritet vid motorutformning då det finns viktigare parametrar att ta hänsyn till. Ett betydligt viktigare fenomen som lätt uppstår vid användning av vätgas i förbränningsmotorer är s.k. "flashback". Detta uppstår på grund av vätgasens snabba flamutbredningshastighet [6]. Flashback innebär att bränslet tänds för tidigt och flamman utbreder sig bakåt i insprutningssystemet med stor kraft. Det är viktigt att undvika detta eftersom motorn kan förstöras då detta inträffar. För att minimera risken för flashback kan en mager luft-bränsleblandning användas [21].

3. Metan-vätgasblandningars egenskaper vid användning som fordonsbränsle

Naturgas, som mestadels består av metan, bedöms ha god potential vid användning som fordonsbränsle, främst på grund av låga emissioner, men det är även ett billigt bränsle och finns i stora mängder i jordskorpan. Dessutom finns möjlighet att framställa en förnyelsebar variant av naturgas, nämligen biogas. Biogas är metan som framställs av förnyelsebara råvaror och används på samma sätt som naturgas.

En mager luft-bränsleblandning (lean burn) vid energiomvandlingen i motorn tycks vara ett långsiktigt lämpligt alternativ för många typer av fordon. Dagens CNG-bussar körs oftast med lean burn motorer. Fördelarna med lean burn är hög termisk verkningsgrad, liten risk för knockning, lägre emissioner (speciellt NO_x), att höga kompressionsförhållanden kan användas och minskade värmeöverföringsförluster. Det finns dock vissa svårigheter med denna typ av förbränning. Det stora luftöverskottet vid förbränningen ger långsam flamutbredningshastighet, mindre fullständig förbränning, större cykliska variationer och risk för att flaman slocknar. Detta kan i sin tur leda till en lägre motorverkningsgrad och mer kolväteemissioner[3].

Alla bränslen har en mager gräns. Vid ett visst luftöverskott finns en bränsleberoende mager gräns. Om denna gräns överskrids blir förbränningen instabil och emissioner av oförbrända kolväten ökar kraftigt. Den magra gräns som praktiskt används i Volvos motor FL10 för gasbussar för naturgas är $\lambda=1.7$, det vill säga 1.7 ggr den stökiometriska luftmängden används vid drift. Vätgasen är i särklass det bästa bränslet att använda för mager drift. Den magra gränsen tillåter 5 ggr den stökiometriska luftmängden[19].

Den största svårigheten vid drift då magra blandningar av naturgas och luft används i gasmotorer är den låga propageringshastigheten på flaman i cylindern. För att öka propageringshastigheten på flaman kan förbränningsrummets utformning ändras, turbulensen i luft-bränsleblandningen kan ökas samt tändvinkeln kan ändras. Dessa åtgärder medför dock ökade värmeförluster, högre temperaturtoppar, ökad NO_x -bildning och högre strömningsförluster[5].

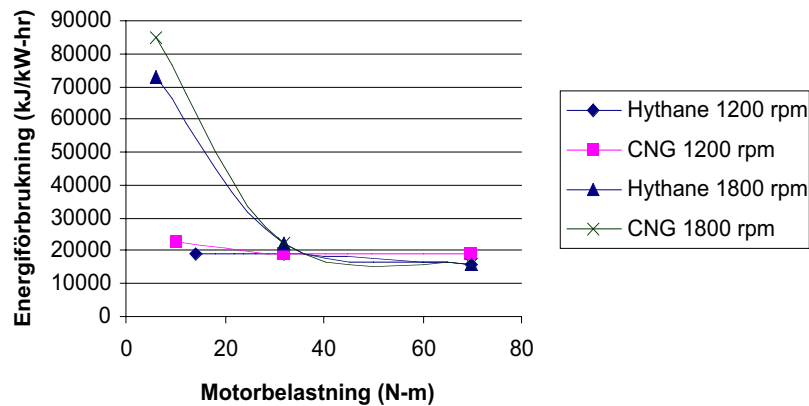
För att kunna öka propageringshastigheten utan att medföra ovan nämnda nackdelar kan vätgas i olika mängder tillsättas. Att tillsätta vätgas är ingen svårighet då naturgas och vätgas utan problem kan blandas med varandra och ge en homogen blandning.

3.1 Motorkonsekvenser vid vätgasinblandning i naturgas

3.1.1. Bränsleförbrukning

Figur 2 visar energiförbrukning för naturgas respektive Hythane® vid olika last på motorn. Information om de motorer som använts vid testerna som figur 2-6 visar resultat ifrån finns i appendix A. Hythane® är en blandning med 15-20 volymprocent vätgas och resten naturgas[23]. Ur ovanstående figur kan ses att effektiviteten är bättre med Hythane® som bränsle vid låga laster, men vid höga laster är det lika effektivt att köra på ren naturgas. Vid låga laster fås en snabbare och fullständigare förbränning med vätgasinblandning än med

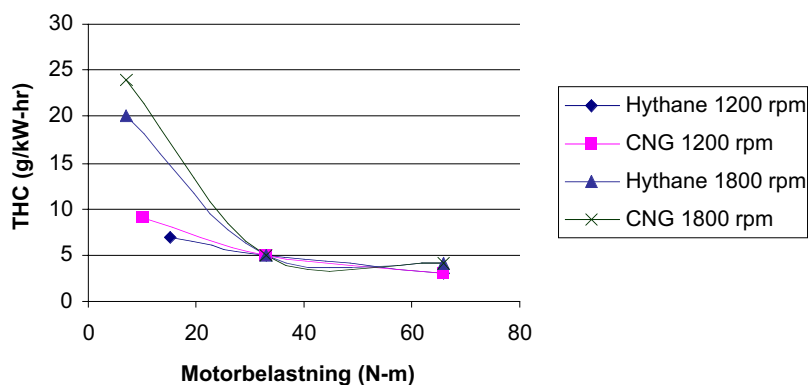
enbart naturgas. Verkningsgraden för motorn ökar från 15.7% till 18.9% vid 20 volymprocent vätgasinblandning och låg last enligt figur 2.



Figur 2. Energiförbrukning för naturgas och Hythane® vid olika last på motorn[23].

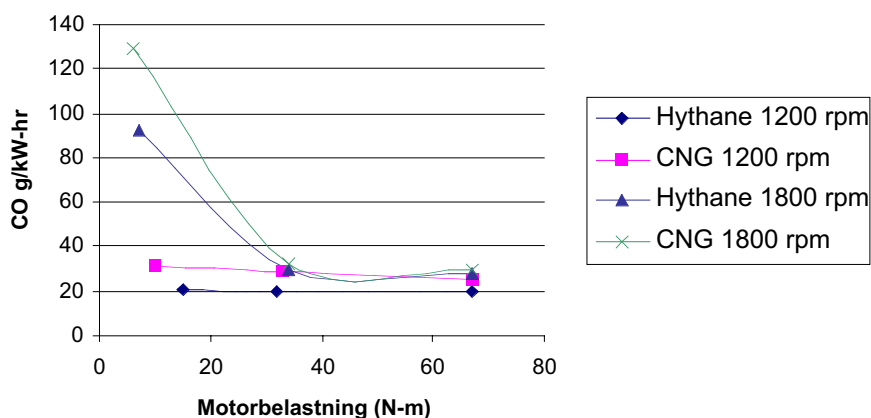
3.1.2. Emissioner

Emissioner av CO, CH₄ och CO₂ vid samma bränsle/luft-tal minskar med ökad vätgasinblandning, men dock inte proportionellt med mängden tillsatt vätgas. Utsläpp av NO_x i avgaserna ökar något på grund av högre maxtemperatur som vätgasen medför. I praktiken kan dock möjligheten att arbeta under ännu magrare förhållanden vid användning av vätgasinblandad naturgas motverka den ökade NO_x-bildningen. Koldioxidutsläppen minskar med ökad mängd vätgasinblandning. Detta beror givetvis på att mängden kol i bränsleblandningen minskar och då minskar givetvis koldioxidutsläppen. Figur 3 visar skillnader i emissioner av totala kolväten mellan Hythane® (naturgas med 15-20 volymprocent vätgas) och naturgas vid olika belastning på motorn. I figuren syns tydligt att effekterna är större vid lägre laster än vid full last. Den stora likheten i kolväteemissioner mellan de olika bränslena vid högre laster är överraskande eftersom kolinnehållet i Hythane® är lägre. Vätgasens snabba propageringshastighet ger en bättre effekt vid låg last. Vid hög last är förbränningen med ren naturgas betydligt effektivare än vid låg last.



Figur 3. Emissioner av kolväten för naturgas och Hythane® vid olika last på motorn[23].

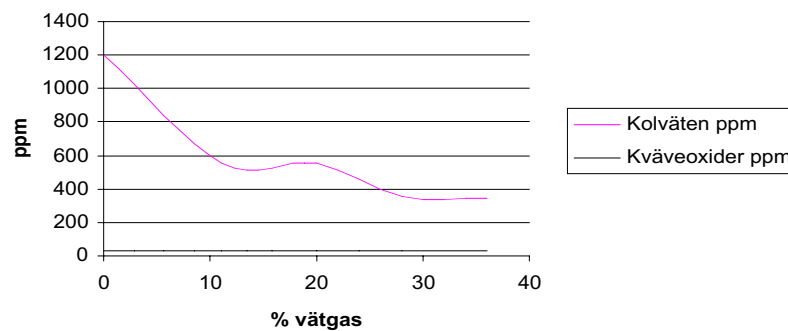
Figur 4 visar emissioner av kolmonoxid vid olika laster på motorn. Av figuren framgår att även halten kolmonoxid minskar vid lägre laster om Hythane® används jämfört med naturgas. Vid höga laster är emissionerna av kolmonoxid lika stora för både Hythane® och naturgas. De lägre kolmonoxidsutsläppen för Hythane® vid låg last beror troligtvis på den temperaturberoende jämvikten $\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$. Vid hög temperatur bildas mycket kolmonoxid. Om temperaturen därefter sjunker snabbt hinner inte koldioxiderna tillbakabildas eftersom ingen jämvikt hinner ställa in sig vid snabb temperatursänkning. Snabba temperatursänkningar orsakas bland annat av att motorn släcks, vilket kan ske då ren naturgas används i magra luft-bränsleblandningar. Då vätgasinblandad naturgas används släcks inte flaman i motorn lika lätt och temperaturen sjunker långsammare när flaman brinner ut helt.



Figur 4. Emissioner av kolmonoxid för naturgas och Hythane® vid olika last på motorn[23].

Figur 5 visar hur emissioner av kväveoxider och oförbrända kolväten ändras vid tillsats av olika mängd vätgas. Från figuren ses att kolväteutsläppen minskar betydligt med ökande vätgashalt och utsläppen av kväveoxider är i princip konstanta. Ur figuren framgår också att bränsleblandningar med upp till 14 volymprocent vätgas är de som ger störst skillnad i emissionsminskning med avseende på kolväteutsläppen. Vid inblandning av högre vätgasmängder minskar inte kolväteutsläppen lika mycket. Värdena är tagna vid relativa

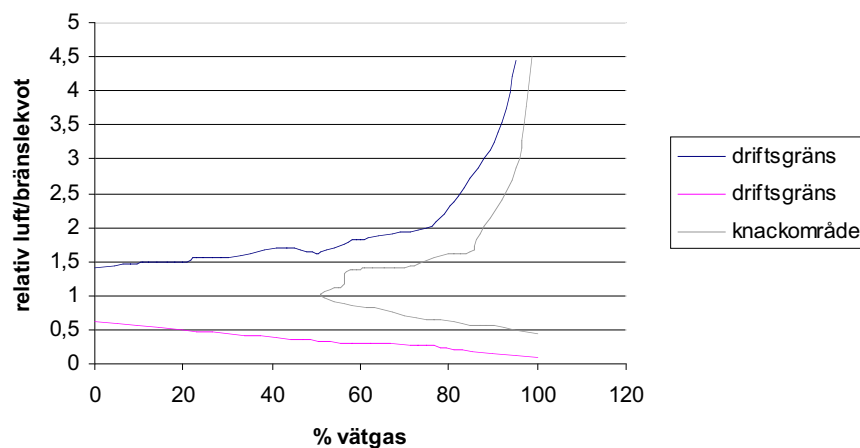
bränsle/luft talet 0.70. Detta ger i sin tur att utsläppen av kväveoxider minskar på grund av den lägre förbränningstemperatur som en magrare blandning åstadkommer.



Figur 5. Emissioner av kväveoxider och oförbrända kolväten vid tillsats av olika mängd vätgas.[2].

3.1.3. Prestanda

Den snabba tändningen och propageringen vid vätgasinblandning ökar risken för knackning i motorn något. Det mycket höga oktantalet som metan har motverkar dock detta och problem med knackning i motorn vid användning av vätgasinblandad naturgas är därför i princip obefintliga. Figur 6 visar variationer i knackningsegenskaper vid olika relativa luft/bränslekvoter och olika halt vätgas i bränsle blandningen. Vid måttliga mängder vätgas uppstår inga problem vid drift på grund av metangasens svårantändlighet. Om koncentrationen av vätgas är hög (högre än 50 % av totala bränslet) finns risk för knackning.



Figur 6. Variationer i knackningsegenskaper[1].

Om en buss som är byggd för ren naturgas skall användas med vätgasinblandad naturgas fås en del förluster i arbetet som motorn producerar. En 20-procentig inblandning av vätgas ger en förlust på cirka 10 % av motorns arbete[19]. Orsaken till arbetsförlusterna är det låga energiinnehållet per volymenhet för vätgasen. Problemet undviks med hjälp av de

turboladdare som de flesta bussar är utrustade med. Genom att öka trycket på de gaser som går in i cylindern med turboladdaren minskas förlusterna.

Skillnaden vid förbränning av vätgasinblandad metan och enbart metan är störst vid förbränning under magra förhållanden och låga laster. Detta är mycket fördelaktigt om bränsleblandningen skall användas av naturgasbussar i stadstrafik, eftersom driftförhållandena är sådana att effekten av vätgasinblandningen blir optimal. Vid stökiometrisk förbränning är effekten av vätgasinblandningen mindre.

3.1.4. Kallstart

Vätgasinblandad naturgas ger betydligt bättre förhållanden vid kallstart än ren naturgas. Kallstart är ett välkänt problem hos naturgasfordon som ökar utsläppen av kolväten markant innan motorn och katalysatorn blivit varm och förbränningen förbättrats. Vätgasinblandning i naturgasen gör att temperaturen stiger fortare och katalysatorn kommer fortare igång att arbeta. Ju mer vätgas som tillsätts desto bättre blir resultatet. Att starta ett fordon på ren vätgas och sedan köra på ren naturgas när katalysatorn blivit varm är ett mycket intressant förfarande. Försök med vätgas under kallstarten på naturgasfordon har gjorts på Colorado State University. Genom att endast kallstarta med vätgas minskar utsläppen av kolväten med 21% och kväveoxidutsläppen med 33%. Vätgasen står då endast för 1.8% av den totala förbrukade energin och fordonet hade totalt sett mycket låga emissioner[7].

3.1.5. Körbarhet

Då vätgasinblandad metan används som fordonsbränsle minskar cykliska variationer och arbetet i motorn ökar. Den termiska verkningsgraden förbättras också[3]. Orsaken till detta är den betydligt snabbare flamutbredningshastigheten. Körbarheten förbättras alltså vid användning av vätgasinblandad naturgas.

3.1.6. Slutsats

Tabell 1 visar en sammanställning av de förändringar som uppstår då vätgasinblandad naturgas används istället för ren naturgas. De flesta experiment som genomförts och som finns i litteraturen är gjorda med en vätgashalt mellan 10-50 volymprocent och därför har de redovisade resultaten en viss osäkerhet för bränsleblandningar som innehåller andra mängder vätgas.

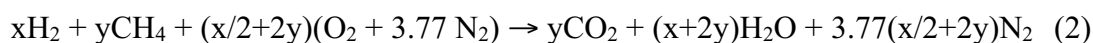
Egenskap	Effekt	
Bränsleförbrukning	~10% minskning (låg last) (15-20% vätgas) Högre termisk verkningsgrad	+
Emissioner	THC:~50 % minskning (10 % vätgas, mager bränsleblandning) NOx ökar något CO minskar	+
Prestanda	Ingen arbetsförlust med modifierad turboladdare	=
Knackning	Ökad risk för knackning	-
Kallstart	Kolväteutsläpp minskar betydligt	+(+)
Körbarhet	Mindre cykliska variationer	+

Tabell 1. Effekter av vätgasinblandning.

Som ses ovan är förfarandet med vätgasinblandning i stort positivt. En ökad risk för knackning är oundvikligt och kan förebyggas genom att utveckla motordesignen så att den anpassas för en viss bestämd vätgashalt.. Fordonets prestanda kan göras lika bra som dagens naturgasbussar. De största fördelarna är dock bränslebesparingen och de minskade emissionerna. Bussar som körs på Hythane® är i särklass betydligt renare än dagens diesel- och naturgasbussar och klarar mycket höga emissionskrav.

4. Förbränning med vätgastillsats – allmänna mekanismer

Vid stökiometrisk och fullständig förbränning av vätgas och metan bildas koldioxid och vatten som slutprodukt enligt;



I de lean-burnmotorer som oftast används i gasfordon brinner luft- och bränsleblandningen med en förblandad flamma. För att få en förblandad flamma skall luften och bränslet blandas till en homogen blandning innan det antänds. Blandningen antänds sedan lokalt av ett tändstift och en förbränningszon utbreder sig då däri. Den typ av tändning som används är påtvingad tändning. Påtvingad tändning innebär att en viss energimängd tillförs en del av blandningen så att temperaturen höjs till den adiabatiska flamtemperaturen och en flamma kan utbreda sig. Den minsta möjliga mängd energi som behövs för att skapa en förblandad flamma i en luft-bränsleblandning kallas minsta antändningsenergi. Värdet för minsta antändningsenergi för vätgas och metan finns i tabell 2. Värderna för metan och vätgas skiljer sig betydligt. Vätgas har en lägre antändningsenergi och mindre energi behöver därför tillföras för att en förblandad flamma skall uppstå. Slutsatsen att vätgasinblandad naturgas har lägre minsta antändningsenergi än ren naturgas kan därför tas.

Parameter	Vätgas	Metan
Densitet, gas vid NTP (kg/m ³)	0.0838	0.6512
Självantändningstemperatur (K)	858	813
Min.antändningsenergi i luft (mJ)	0.02	0.29
Antändningsgränser i luft (vol%)	4.0-75.0	5.3-15.0
Flamtemperatur i luft (K)	2318	2148
Detonationsgränser i luft (vol%)	18.3-59.0	6.3-14.0
Detonationshastighet i luft (km/s)	2.0	1.8
Förbränningsvärme, eff. (MJ/kg)	119.93	50.02
Specifikt värme vid NTP (kJ/kgK)	14.89	2.22
Stoikiometrisk blandn. i luft (vol%)	29.53	9.48
Expl.energi vid NTP (kg TNT/m ³ gas)	2.02	7.03

Tabell 2. En jämförelse av förbränningssegenskaper mellan vätgas och metan[13].

Enligt tabell 2 finns också stor skillnad i densitet mellan de två gaserna. Detta innebär att vätgasen har betydligt mindre energiinnehåll per volymenhet än metangas. Vid vätgasinblandning sjunker därför energiinnehållet i bränsleblandningen jämfört med ren naturgas.

Det effektiva förbränningsvärmets är betydligt högre för vätgas än för metan. Framtida möjligheter att lagra vätgas med mycket hög densitet kan ge ett betydligt energirikare bränsle än vad vätgasen är idag.

4.1. Antändningsgränser

För att en blandning av luft och bränsle skall antändas krävs att mängden bränsle och mängden luft har vissa proportioner. En för mager blandning innehåller för lite energi för att en flamma skall kunna uppstå, och en fet blandning innehåller för lite oxidant. Detta medför att den adiabatiska flamtemperaturen blir låg eftersom bara en liten energimängd kan frigöras på grund av att det finns för lite oxidant eller bränsle. Detta sänker i sin tur värmeproduktionshastigheten i flammen. Är blandningen för mager eller för fet blir värmeproduktionshastigheten lägre än värmebortföringshastigheten och flammen slocknar därför. Varje bränsle har därför en mager och en fet antändningsgräns. Inom dessa gränser kan en flamma uppstå[21].

För att beräkna antändningsgränser och flamutbredningshastigheter för vätgas, metan och blandningar av dessa två gaser har beräkningsprogrammet Chemkin använts. Nedan följer en beskrivning av programmet samt resultat från beräkningarna.

4.1.1. Chemkin

Chemkin är ett program som genom kemisk kinetik beräknar propageringshastighet och produktsammansättning av en endimensionell, laminär flamma. Laminära flammor används ofta för att karaktärisera förbränning av olika bränslen i förbränningsmotorer. Flammen antas utbreda sig i en tubreaktor, och beräkningsmodellen bygger på en reaktormodell för tubreaktorer. Programmet beräknar propageringshastighet, temperatursammansättning och produktsammansättning hos två olika konfigurationer av en laminär flamma. Den ena är en flamma med stabil förbränning och känt massflöde. Denna typ av flamkonfiguration är den som är mest använd vid analys av flamprofiler i experiment. Denna beräknas för två olika fall; i ett fall är temperaturen känd (temperaturprofilen fås oftast i experimentet) och i det andra fallet bestäms temperaturprofilen av en energiekvation. Detta görs för att få en uppfattning om de värmeförluster som fås i en flamma. Eftersom kinetik är mycket temperaturberoende så kan värmeförlusterna ha stor betydelse för flammans propagering. Den andra flamkonfigurationen är en propagerande adiabatisk flamma. I detta fallet räknas inte med värmeförluster och temperaturen fås enbart av en energiekvation[31].

Vid beräkningarna i programmet används fyra grundekvationer;

$$\text{Kontinuitetsekvation} \quad \dot{M} = \rho u A \quad (3)$$

Energiekvation

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{dT}{dx} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \omega_k h_k W_k = 0 \quad (4)$$

$$\text{Ämnen} \quad \dot{M} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \omega_k W_k = 0 \quad (k = 1, \dots, K) \quad (5)$$

$$\text{Tillståndsekvation} \quad \rho = \frac{p\bar{W}}{RT} \quad (6)$$

I dessa ekvationer är \dot{M} massflöde, T är temperaturen, Y är massfraktionen av ämne k , p är trycket, u är flödes hastigheten, ρ är densiteten, W_k är molekylvikten för ämne k , λ är värmekonduktiviteten för blandningen, c_p är specifika värmets för blandningen, V_k är diffusionshastigheten för ämne k och A är tvärsnittsarean för tuben som innehåller flammen.

Dessa ekvationer med tillhörande randvillkor kan sedan lösas analytiskt med Newtons metod;

$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} - \left(\frac{\partial F}{\partial \phi} \right)_{\phi^{(n)}}^{-1} F(\phi^{(n)}) \quad (7)$$

ϕ är en vektor med lösningar på ekvation (3),(4),(5), och (6) i varje iterationssteg som genomförs.

Den analytiska metoden är emellertid för komplicerad och dyr för att kunna användas i praktiken. Istället används en numerisk version där en Jacobianmatris används och steget mellan $\phi^{(n)}$ och $\phi^{(n+1)}$ förenklas med parametern λ ;

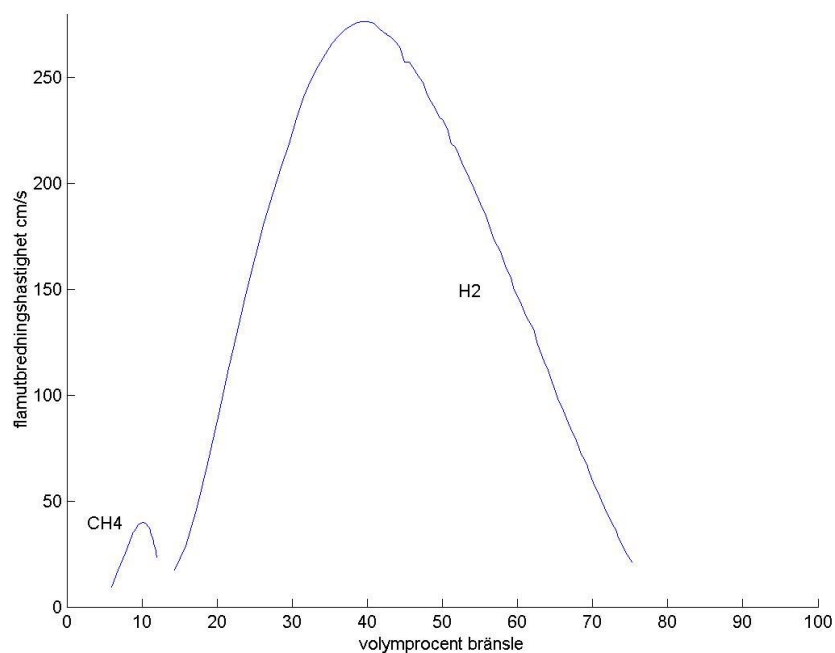
$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} - \lambda^{(n)} \left(J^{(n)} \right)^{-1} F(\phi^{(n)}) \quad (8)$$

Där $0 < \lambda \leq 1$, och

$$J^{(n)} = J^{(n-1)} \quad \text{eller} \quad J^{(n)} = \left(\frac{\partial F}{\partial \phi} \right)_{\phi^{(n)}} \quad (9)$$

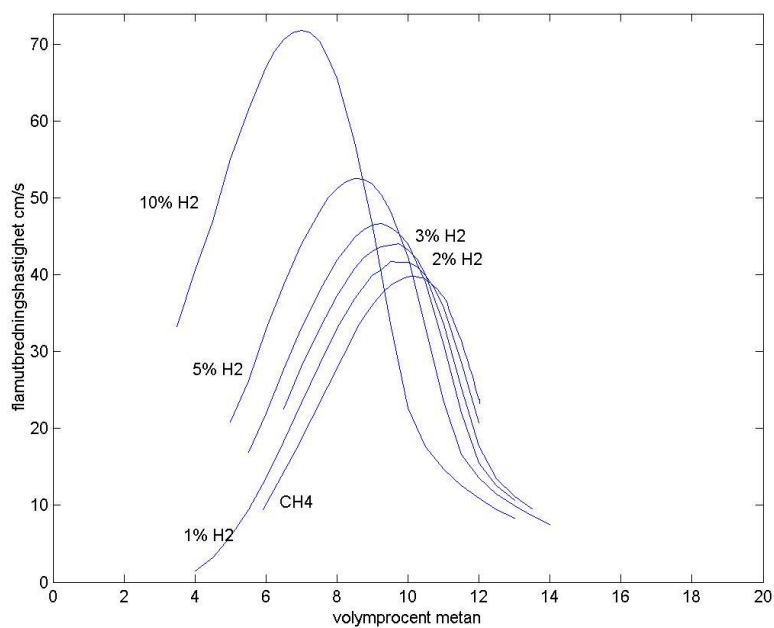
4.1.2 Beräkningsresultat

Figur 7 visar framräknade värden på antändningsgränser och flamhastigheter för metan respektive vätgas. Vätgas har extremt vida antändningsgränser och ger stora möjligheter till att variera mängden luft vid förbränning. Detta är en mycket positiv egenskap hos bränslet eftersom stora möjligheter finns att variera luft-bränsletalet. Vätgas har även en mycket hög flamutbredningshastighet och det är en av de mycket speciella och eftersträvade egenskaperna hos vätgas, eftersom en motors termiska verkningsgrad varierar med förbränningens varaktighet. Antändningsgränserna för metan är mycket smalare än för vätgas. Det är därmed betydligt svårare att variera mängden luft i bränsleblandningen. Flamutbredningshastigheten är också bara en bråkdel av vätgasens. Detta leder ofta till ofullständig förbränning vid låga laster och konsekvenserna blir då höga utsläpp av oförbrända kolväten.



Figur 7

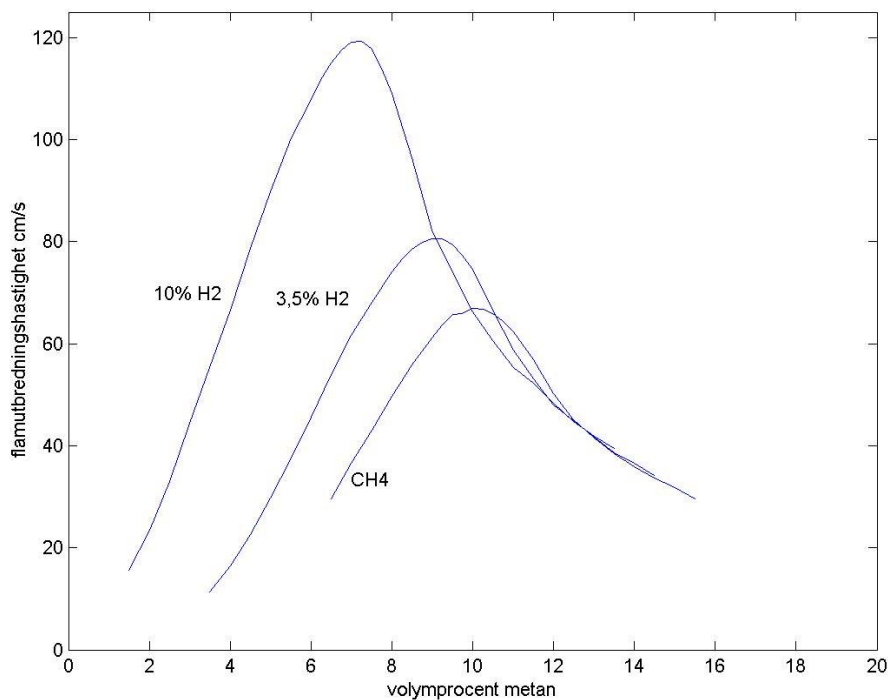
För att höja flamhastigheten och vidga antändningsgränserna för metan kan små mängder vätgas tillsättas, varefter flamutbredningshastighet och antändningsgränser beräknas på nytt. Figur 8 visar flamutbredningshastighet och antändningsgränser för ren metan samt metan med vätgastillsats på 1,2,3,5 och 10 volymprocent. Beräkningarna är gjorda med trycket 1 bar och temperaturen 298 K.



Figur 8

Från figuren kan ses att flamutbredningshastigheten nästan fördubblas vid tillsats av 10 volymprocent vätgas. Även antändningsgränserna utvidgas åt det magra hållet, vilket är mycket positivt eftersom de ger möjlighet att använda en magrare luft-bränsleblandning vid drift.

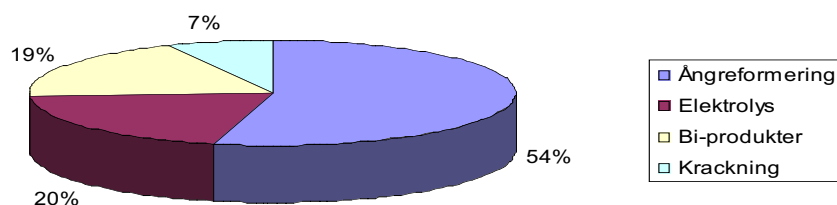
I figur 9 finns kurvor för ren metan och metan med vätgastillsats på 3,5 och 10 volymprocent. Beräkningarna har gjorts vid tjugo bar och hög temperatur för att efterlikna förbränningen i en motor så mycket som möjligt. En tillsats av 3,5 volymprocent vätgas ökar flamutbredningshastigheten med 19% och den magra antändningsgränsen utvidgas med cirka 36%. Även relativt små mängder tillsatt vätgas ger goda resultat vid förbränning. Vid en tioprocentig vätgasinblandning fördubblas flamutbredningshastigheten.



Figur 9

5. Metoder för vätgasproduktion

För vätgasproduktion används huvudsakligen fyra olika metoder i dag i Sverige, nämligen *ångreforming*, *elektrolys*, *biprodukter från processer* och *krackning*. Figur 10 visar hur stor andel av den totala vätgasproduktionen som varje produktionsmetod utgör. I övriga världen används en del andra produktionsmetoder[14].

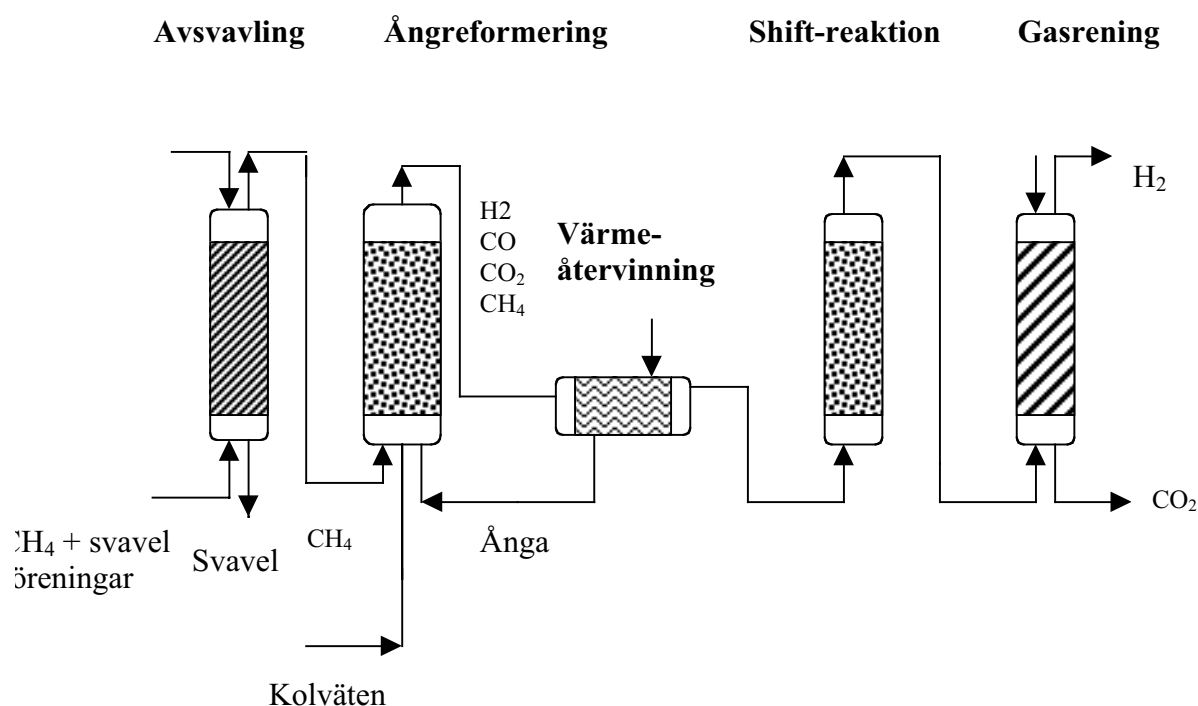


Figur 10. Vätgasproduktionsmetoder i Sverige

5.1. Ångreforming

Ångreforming är en mycket använd och billig process för vätgasproduktion från lätta kolväten. Vätgas produceras från en procesström bestående av vattenånga och lättare kolväten. De kolväten som används är oftast fossila där naturgas är vanligast. Produktionen består av fyra huvudsteg:[24] se figur 11:

1. Rening av kolväteströmmen (avsvavling)
2. Ångreforming av kolväten
3. Vatten-gas shift reaktion
4. Rening (koldioxid utvinning och metanisering)



Figur 11. Ångreforming.

Avsvavlingen sker i två steg. Svavlet i procesströmmen måste avlägsnas för att inte minska aktiviteten på den nickelbaserade katalysatorn som används vid ångreforming. Svavlet omvandlas till svavelväte när den svavelinnehållande kolväteströmmen passerar en koboltmolybden katalysator. Svavelvätet adsorberas sedan till en zinkoxidkatalysator som reducerar svavelinnehållet i procesströmmen till 0.5 ppm.

Nästa steg i processen är själva reformeringen. Reformeringsreaktionen är:



Reformeringsreaktionen är endotermisk och extern värme behöver därför tillföras. Reaktionen är reversibel och för att få en hög vätgasproduktion behövs en hög temperatur, 700-960°C, samt ett tryck på 15-20 atm.

Efter reformeringssteget passerar produktgasen en värmeväxlare, där gasen kyls. Den värme som utvinns används i reformeringssteget.

Syntesgasen som produceras i reformeringssteget går till en skiftreaktor, där vätgasinnehållet ökas genom vatten-gas skift reaktionen:



Omvandlingen av kolmonoxid till koldioxid beror av temperaturen, trycket och ångkoncentrationen. Vatten-gas skift reaktionen sker vid två olika temperaturer, en hög temperatur och en lägre temperatur. Vid den högre temperaturen, över 320°C, används en katalysator bestående av järn- och kromoxid. Om temperaturen är lägre än 320°C fungerar inte denna katalysator. Vid den lägre temperaturen, 200-300°C, användes en katalysator av koppar och zink.

Det sista steget är koldioxidutvinning och metanisering. Där avskiljs koldioxiden från produktgasen. Halten koldioxid i gasen är 0.01% efter detta steg. Följande reaktioner sker vid koldioxidutvinningen:



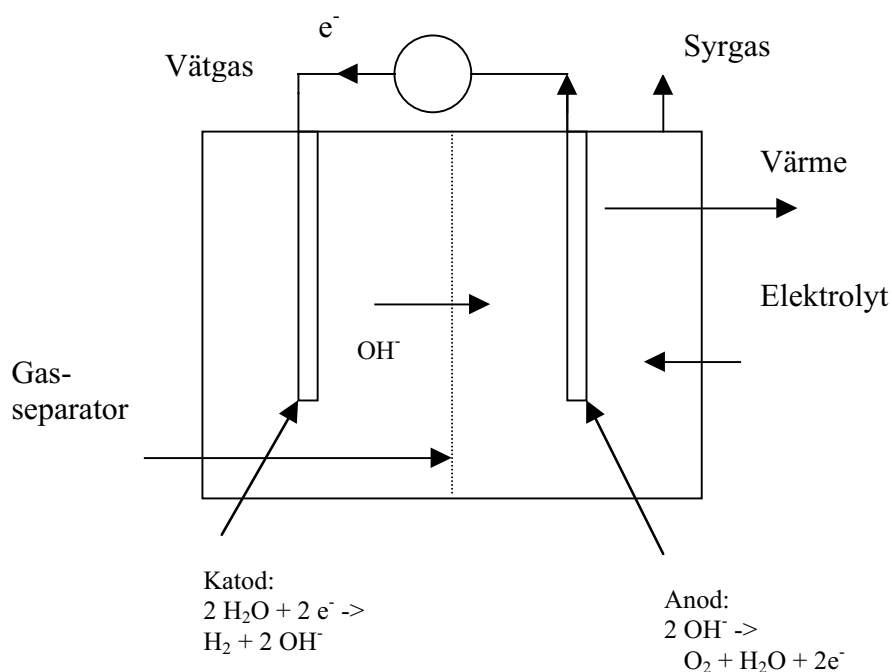
Dessa reaktioner är exoterma och nickeloxid används som katalysator under omvandlingen. Vätgas förbrukas i reaktionerna, vilket är oönskat men det går ej att undvika. Efter dessa reaktioner fås en produktionsgas bestående av 98% vätgas och 1.8% metan.

Kapitalkostnaden för produktion av vätgas med en reformer är 500-750 \$/kW producerad H_2 för småskalig produktion av vätgas. Produktionskostnaden för småskalig produktion av vätgas är 10-27 \$/GJ H_2 . Reformrar säljes av bland annat Caloric Anlagenbau GmbH och Mahler AGS GmbH i Tyskland[25].

5.2. Elektrolys

Elektrolys av vatten är en mycket enkel metod för framställning av vätgas i både liten och stor skala. Elektrolysanläggningen tar liten plats, har få rörliga delar och avger inga oönskade emissioner. Den producerade vätgasen är mycket ren. Produktionen av vätgas sker vid 80°C och 1-30 bar. Den enda råvaran som används är rent vatten, och den totala effektiviteten av elektrolysen är 30 %.

Den elektrokemiska cellen består av elektrolyt, två elektroder och ett membran; se figur 12. En elektrisk ström passerar mellan de två elektroderna. Spänningen över cellen måste vara högre än motståndet i elektroderna, elektrolyten och separatoren.[14]



Totalreaktion:



Figur 12. Elektrolys.

Komponenterna måste kunna motstå korrosion och leda elektricitet bra. Vanligt vatten har inte någon bra ledningsförmåga, och därför används rent vatten sällan som elektrolyt. Som regel används en alkalisk lösning till elektrolyt, och är då oftast en vattenlösning med kaliumhydroxid. Även salter eller syror kan användas, men dessa har i regel sämre egenskaper ur korrosions- och stabilitetssynpunkt.

Membranet i den elektrokemiska cellen skall kunna separera vätgas och syrgas, vara stabilt samt ha en bra jonledningsförmåga. Elektrodernas ytor är oftast täckta av katalysator för att öka produktionshastigheten av vätgas. Katalysatorpartiklarna på elektrodytan rekombinerar väteatomer på elektroden. Detta hindrar väteatomerna från att lagras på elektroden, vilket minskar strömmen och därmed hastigheten på vätgasproduktionen.

Vid elektrolys sönderdelas vatten, så att vätgas och syrgas bildas vid katoden respektive anoden. Totalreaktionen i cellen är följande;



Reaktionen är endotermisk.

Kostnaden för vätgasproduktion med elektrolys är generellt högre än för vätgasproduktion med ångreformerings. Kostnaden för elektrolys är starkt beroende av elpriset. Om tillgång till billig el finns, blir elektrolys ett kostnadsmässigt sett konkurrenskraftigt alternativ. En stor fördel med elektrolys är att anläggningen inte ger några emissioner. Om elektriciteten som

används produceras av förnyelsebara energikällor, t.ex. vattenkraft, blir hela systemet mycket miljövänligt.

Elektrolysanläggningar kan köpas av bland annat Norsk Hydro Electrolysers AS i Norge och av Electrolyser Corporation Ltd. i Kanada. Kostnaden för en småskalig elektrolysanläggning är 2700-4600 \$/kW producerad H₂ i kapitalkostnad och 28-50 \$/GJ i produktionskostnader [14].

5.3. Biprodukter

Rening av industriella gaser är ett vanligt sätt att få vätgas. Många industrier, främst den kemiska och den petrokemiska, har höga halter av vätgas i avfallsströmmarna från anläggningarna. Det är oftast kostnadseffektivt att utvinna gasen och rena den. Det mesta av vätgasen används sedan på plats inom anläggningen.

Exempel på processer som har vätgas som biprodukt är katalytisk reformering och partiell oxidation.

5.4. Katalytisk krackning

Det finns många olika sätt att sönderdela kolväten med ett stort antal kolatomer till mindre kolväten, t.ex. krackning och reformering. Dessa metoder används inom raffinaderier främst för att producera bensin med ett högt oktantal, men vätgas produceras som biprodukt.

En metod då krackning används för framställning av vätgas är termisk krackning av naturgas. Den reaktion som utnyttjas är;



Katalysatorer används för att skynda på reaktionen, som i regel sker i en kontinuerlig fixbädd reaktor. Omkring 60 % av den totala erhållna energin erhålles som vätgas och 40% som kol. Kålet är ett askfritt och svavelfritt bränsle som används till vulkanisering av bildäck, pigment och trycksvärta.

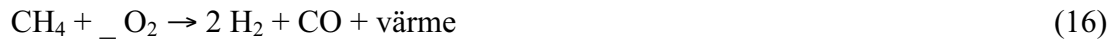
Större delen av vätgasen används inom raffinaderiet, och de mängder vätgas som kan användas till andra syften är mycket små[14].

5.5. Inköpt vätgas

Kemira i Helsingborg, Borealis AB och Hydro Polymers i Stenungsund, Eka Chemicals i Bohus och Scanraff AB i Lysekil är exempel på företag som producerar vätgas i sina olika processer. Eftersom det inte finns någon efterfrågan av vätgas på dagens marknad producerar inte företagen mer vätgas än vad som behövs i deras egna processer. Vid ett eventuellt framtida vätgasbehov kan vissa av företagen, till exempel Kemira, förmodligen producera vätgas för försäljning. Däremot går det att köpa vätgas från gasföretaget AGA i Sverige. Därifrån kan vätgas köpas i storlekar från 3,5 m³ till 1293,6 m³. Behållarna som vätgasen lagras i kan inte köpas men de går att hyra. Kostnaden för hyran beror på hur länge behållarna lånas. Ju längre lånetid desto lägre blir hyran per dygn. Att hyra en flaska i ett år kostar 1080kr.

5.6. Produktion av vätgas ombord på fordonet

University of California i Berkely har gjort försök att producera vätgas ombord på ett fordon. En reformer i fordonet reformerar en del av bränslet och de produkter som bildas i reformeringen används sedan med den resterande delen av naturgasen i motorn. I reformen reagerar metan tillsammans med luft över en katalysator enligt;



Reaktion (16) ovan är den önskade reaktionen, men en del bireaktioner sker och därför bildas även koldioxid och vatten. Koldioxiden och vattnet brukar ta upp ungefär 10% av den totala bränsleblandningen[8]. Den värme som frigörs motsvarar ungefär 5% av det lägre värmevärdet hos metan.

Resultatet vid användning av delvis reformerad naturgas blir mycket likt det resultat som fås då ren vätgas används som tillsats. Koldioxiden och vatteninnehållet i gasen motverkar dock vätgasens snabba propageringshastighet något. Att installera en reformer i fordonet är mycket dyrt och gör fordonet betydligt tyngre än vanliga naturgasfordon och anses inte ekonomiskt försvarbart[8].

6. Lagring av vätgas

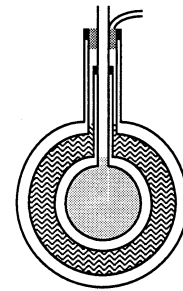
För att klara tidsvariationer i bränsleåtgång lagras bränslet. Tekniken som används för att lagra vätgas är mycket lik den teknik som används för att lagra naturgas. Vätgasen kan lagras ombord på fordonet eller stationärt vid tillverknings- eller distributionsplatsen. Här fokuseras på stationär lagring. Vätgas kan lagras under jord om mängden vätgas som skall lagras är stor, ungefär 10^9 Nm^3 . De mängder som behöver lagras är betydligt mindre i det här fallet, och det är därför inte möjligt att lagra vätgasen under jord.

Det finns två kommersiella metoder för stationär lagring av vätgas ovan jord i dag;

6.1. Lagring av flytande vätgas

Anledningen till att vätgas lagras flytande är för att öka energiinnehållet per volymenhet så att lagringsvolymen kan minskas. Vätgasen blir flytande vid -253°C (20K). Kylningsförfarandet är mycket energikrävande, eftersom temperaturen måste minskas markant, och 30-40 % av vätgasen energiinnehåll motsvarar den energi som krävs för att kyla vätgasen till flytande form.

Behållare för flytande vätgas finns i storlekar från 100 l till 5000m^3 . På grund av den låga temperaturen ställs höga krav på behållarna, de måste isolera värme mycket bra. I dag används så kallade Dewarflaskor; se figur 13. Själva principen för flaskan är två koncentriska glasbehållare med utrymme för isolering emellan. När Dewarflaskorna uppfanns användes vakuum som isolering. Sedan började flytande kvävgas att användas och används även i dag. Flytande kväve minskar värmeflödet in i flaskan med en faktor 230 jämfört med vakuumisolering. Nackdelen med flytande kväve är att ständig påfyllning av kväve behövs för att hålla en bra isolering. Kärlen är också mycket tunga och olämpliga för transport[13].



Figur 13.
Dewarflaska

Lagringsflaskor som utvecklats på senare tid är så kallade pulvriserade flaskor. De är enklare både till konstruktion och drift. Isoleringen består oftast av perlit.

Det höga energiinnehållet som fås per volymenhet vid lagring av flytande vätgas minskar transportkostnaderna, eftersom mer energi kan transporteras per volymenhet. Nackdelar med flytande vätgas är dyra lagringsbehållare och att det är dyrt att kondensera vätgasen[26].

6.2. Komprimerad vätgas

Eftersom väte oftast produceras och används i gasform, är det även lämpligt att lagra det i gasform. Denna lagringsmetod är väl känd och lagringsbehållare erbjuds av bland andra AGA, Norsk Hydro Electrolysers och Messer-Griesheim. Kapaciteten att lagra vätgas ökar med ökande tryck i behållarna. Vid stationär lagring av vätgas är lämpligt tryck i behållarna mellan 400-500 bar[14].

Behållare finns tillgängliga för tryck mellan 10-440 bar. Det är möjligt att lagra vätgasen vid mer än 500 bar, men behållare för lagring av stora mängder vätgas är ej ännu tillgängliga. Behållarna är oftast gjorda av rostfritt stål, aluminium eller komposit.

För att minska lagringsvolymen ökas trycket på gasen genom kompression. Kompressorer för vätgas finns tillgängliga i flera olika storlekar, för så väl stora som små lager[27].

6.3. Blandad lagring

Eftersom tekniken för lagring av vätgas bygger på tekniken för lagring av naturgas är sättet att lagra de båda gaserna mycket lika. Att lagra CNG med vätgasinblandning är således möjligt. Dock är kraven på lagringsbehållare högre vid lagring av vätgas. De lagringsbehållare som används i dag för stationär lagring av CNG är av kolstål och vid lagring med vätgasinblandning bör ett bättre material användas som tar hänsyn till vätgasens speciella egenskaper. Vid användning av kolstål kan väteatomer diffundera ut i materialet och orsaka sprickor, så kallad vätesprödhet[22].

6.4. Metallhydrider

En metallhydrid är en förening mellan en väteatom och en metallatom. Titan, nickel och magnesium är exempel på metaller som har en hög affinitet för väte, det vill säga de ”drar till” sig väteatomer, och passar därför bra vid lagring av väte. Ofta förekommer också legeringar av olika metaller som används som hydrider. De vanligaste legeringen som används idag är en legering av titan och järn. Metallerna förekommer som pulver eller granuler med så stor yta som möjligt. En stor yta ökar kapaciteten att lagra vätgas.

För att lagra vätgas som hydrider förs vätgasen in i en behållare med metallpulver under tryck och en kemisk bindning uppkommer då mellan metallen (legeringen) och vätgasen. Då den kemiska bindningen uppstår avges värme, och lagringstankarna måste därför vara försedda med kylvätska som håller temperaturen konstant. När tankarna sedan skall tömmas måste värme tillföras för att bryta de kemiska bindningarna och lösgöra vätgasen.

Den stora fördelen med metallhydrider är att energiinnehållet per volymenhet blir högt. Varken de höga tryck eller de extremt låga temperaturer som används vid komprimerad och flytande lagring av vätgas används vid lagring som metallhydrider. Detta gör att lagringstankarna är relativt lätta att handskas med. Eftersom vätgasen inte frigörs utan värme är detta även det säkraste lagringsalternativet. Nackdelarna med denna nya lagringsmetod är att metallerna expanderar när de reagerar med vätgasen. Metallen porösa yta förorenas också lätt av exempelvis vatten och syre vid tömning och påfyllning. Priset på lagringstankarna är högt[15].

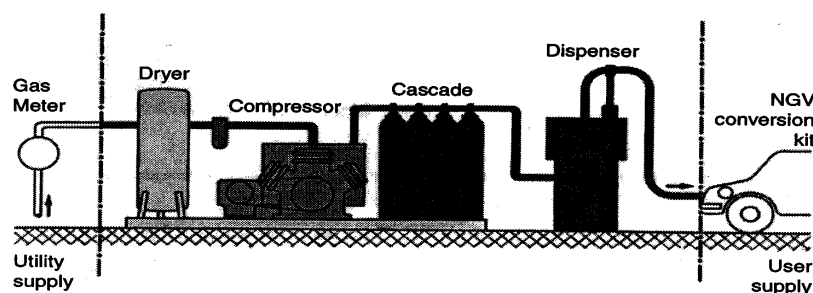
Detta sätt att lagra vätgas används av Toyotas bränslecells-bilar för lagring av vätgas ombord på fordonet.

7. Tankning av vätgasinblandad CNG

Tankning av naturgasfordon sker i huvudsak på två olika sätt;

- snabb tankning - tankningstiden är jämförbar med de tider det tar att tanka konventionella bränslen. Vid denna typ av tankning används oftast ett lager med naturgas vid cirka 250 bars tryck eller så kan en kompressor användas för att fylla fordonen direkt utan mellanlagring.
- långsam tankning – ett eller flera fordon är anslutna till ett lågt gasflöde med ett tryck på 250 bar som kommer via en kompressor. För att fylla tanken på fordonet krävs relativt lång tid, dels för att flera fordon tankas samtidigt och dels på grund av det låga flödet. Något buffertlager med gas finns inte heller vid denna typ av tankning. Långsam tankning används ofta för bussflottor, där bussarna tankas på garageplatsen då de inte är i drift[11].

En tankstation för snabbtankning består av tork, kompressor, lagringsenhet och dispenser för själva tankningen se figur 14. Vätgasen kan tillsättas efter torken. Det är viktigt att de enheter som används i tankstationen är kompatibla med vätgasens egenskaper om vätgasinblandad CNG skall användas. Vid långsam tankning är det också lämpligt att vätgasen tillsätts innan kompressorn för att använda de befintliga delarna av tankstationen[12].



Figur 14. Tankstation för naturgas.

7.1. Kompressorer

De kompressorer som används i naturgastankstationerna i Göteborg, både till snabbtankning och långsamtankning, kommer från företaget Idromeccanica i Italien. Företaget tillverkar kompressorer i ett stort antal storlekar för tankstationer av naturgas. De kompressorer som tillverkas skall vara kompatibla för de flesta gaser. Till exempel drivs en tankstation på flygplatsen i München för ren vätgas av en av företagets kompressorer[27]. Enligt företaget skall de kompressorer som används i naturgastankstationer kunna användas även för vätgasinblandad naturgas. De kompressorer som används i naturgastankstationer heter Idromeccanica.

7.2. Lager

Eftersom inget krav på lagringsbehållarnas vikt finns vid stationär lagring av CNG är de som regel gjorda av ett så billigt material som möjligt. Oftast används kolstål eller något annat billigt stål. Lagringsbehållarna kan lagra gas som innehåller små mängder vätgasen, dock är materialet inte det bästa för att lagra vätgas. Vätets diffunderande egenskaper orsakar bland

annat väteförspredning, vilket leder till sprickor i lagringstankarna. Ett mer anpassat material bör därför användas, till exempel rostfritt stål eller komposit.

Bränsletankarna i fordonet är endast avsedda för naturgas. De görs idag av komposit och kan användas till vätgasinblandad naturgas eftersom materialet är mycket beständigt mot vätgasens egenskaper. Eftersom det inte finns någon standard för naturgas som anger specifika halter av vilka ämnen som gasen får innehålla är det möjligt att använda samma bränsletankar till vätgasinblandad naturgas om de standarder som finns för bränsletankarna uppfylls.

7.3. Dispenser

Tekniken för tankning av ren vätgas är till stor del uppbyggd på tekniken för tankning av naturgas. Dispensrar och annan utrustning för tankning av CNG är oftast gjorda av rostfritt stål och kan därför användas för tankning av vätgasinblandad CNG, och även för ren vätgas[11][22].

8. Naturgasfordon

Naturgas har sedan länge använts i stationära anläggningar för bland annat värmeproduktion och elproduktion. Gasen är betydligt lättare att hantera i stationära anläggningar än i fordon, eftersom inga viktkrav ställs på förvaringskärl och dylikt. Tillämpningen som transportbränsle började på allvar för ett tjugotal år sedan då lätta högtryckskärl utvecklades, vilket underlättade lagringen av bränslet i fordonen. Dessförinnan användes bland annat naturgas som fordonsbränsle under första och andra världskriget i början på 1900-talet, eftersom bristen på olja gjorde det nödvändigt att använda andra bränslen än bensen och diesel.

8.1. Lätta fordon

De flesta lätta naturgasfordon som finns idag är konverterade bensinbilar som kör på både bensen och naturgas, så kallade bi-fuelbilar. Bensen utgör ett nödbränsle som används om gas inte finns tillgängligt. Vid konvertering installeras ett gassystem ovanför insprutningssystemet och tändvinkeln ändras något. Gassystemet består av insprutningssystem, regulatorer, stängningsventiler, kontrollsystem och lagringstankar för bränslet. Konverteringen ger en motor med lägre prestanda, och med lägre verkningsgrad med avseende på motorns arbete. De bi-fuelbilar som produceras i dag är mer optimerade med avseende på gas och skillnaden mellan gas och bensen vid drift är betydligt mindre än för de som är omkonverterade. Prestandan på bilarna har också förbättrats avsevärt[12].

1990 konverterade Hydrogen Components Inc. i Kanada en bensinbil till en tre-bränslebil. Bilen kunde köras på bensen, naturgas och Hythane® och försöket gav ett fordon med låga emissioner då drivmedlet var Hythane®. Det är dock svårt att optimera motorn för tre olika bränslen och verkningsgraden i motorn var därför låg.

Det finns även lättare fordon som enbart körs på naturgas. Då används gasmotorer som är optimerade för naturgas. Dessa motorer kan vara speciellt designade för gasdrift eller så kan de vara ombyggda bensinmotorer. Vid optimeringen ändras kompressionsförhållandet till 15:1, och tändvinkeln blir högre än för bensen. Detta beror på det höga oktantalet för metan[13].

8.2. Tunga fordon

Tyngre fordon körs idag oftast på diesel. Liksom konverterade bensinbilar har också dieselfordon konverterats till dual-fuel fordon. Dessa fordon kan ersätta 50-75 % av den ursprungliga dieseln, men fordonet kan också köras på enbart diesel. Dieselmotorer har inga tändstift, utan bränsleblandningen tänds med hjälp av enbart kompressionen i cylindern. Denna typ av tändning passar inte naturgas på grund av dess höga oktantal. För att kunna använda naturgas som bränsle i motorerna sprutas en liten del dieselolja in i gas/luftblandningen och detta orsakar tändning vid kompression, så kallad fumigation[13].

De tyngre fordon som kör på enbart naturgas är dieselfordon som är anpassade med bland annat tändstift. Kolven i cylindern modifieras för att få en lägre kompressionskvot och därmed minskad risk för knackning. För att få samma motorverkningsgrad som dieselfordonen används magra luft/bränsleblandningar. Dieselmotorns konstruktion gör att det

finns svårigheter att konvertera motorn till gasdrift, främst på grund av att ett tändsystem och en gas/luftblandare måste installeras[12].

8.3. Fordon för vätgasblandad naturgas

Två bussar har hittills byggts som prototyper för fordon med vätgasblandad naturgas som bränsle. De byggdes under ett projekt i Kanada som startade 1993. Prototyperna togs i drift 1995 i Montreals lokaltrafik. Dessa fordon används nu i USA av företaget Sunline. Bränslesammansättningen är 15-20 volymprocent vätgas och 80-85 volymprocent naturgas. Dessa fordon klarade de strängaste krav som finns på emissioner i Kalifornien. Emissionerna är lägre än för rena naturgasfordon och för dieselfordon med katalysator och partikelfälla[22].

Tabell 3 visar specifikationer för de bussar som användes i projektet. Bränsletankarna var gjorda av komposit. Motorn som användes i bussarna är en vanlig naturgasmotor, se tabell 3, som finns i ytterligare ett hundratal naturgasbussar i USA. Den slutade tillverkas 1999. Bränsleblandningen som bussarna drevs av gav möjlighet för en ännu magrare förhållanden än vad som är möjligt vid drift av ren naturgas. Vid $\lambda=1.8$ sjunker emissionerna av NO_x drastiskt och tester som utfördes på de båda bussarna visade minskningar av NO_x mellan 16 och 45%. Magrare drift är möjligt vid vätgasblandning, men för att få en tillräckligt god effekt i motorn bör lambda vara mindre än två[19].

Längd	12.2m
Bredd	2.6m
Höjd	3.4m
Motor	CUMMINS L10G 240 h.k. 2100rpm
Bränsletankar	4 cylindrar 6.1m (d=33cm) 392 l/cylinder 20.98*10 ⁶ Pa Placerade i taket
Räckvidd	400 km
Sittplatser	40 passagerare

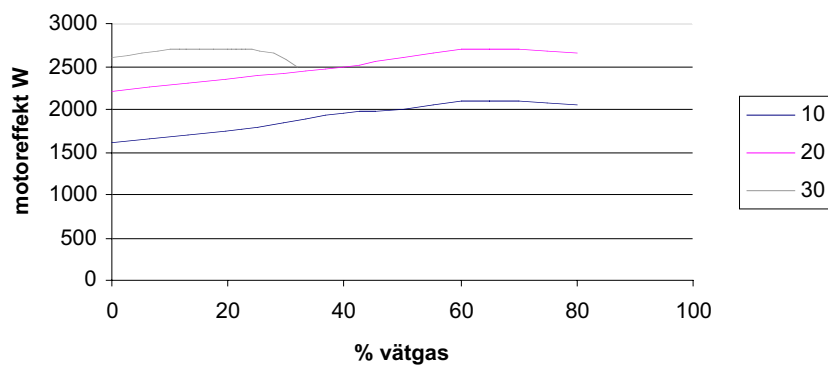
Tabell 3. Specifikationer för de bussar som användes för Hythane® projektet i Montréal 1995-1998[28].

Hittills har inget tungt fordon för naturgasdrift konverterats till drift för Hythane®. Vid inblandning av små mängder vätgas (< 3,5 volymprocent) behövs ingen ombyggnation av fordonet[22].

Sunline i USA har förutom två Hythanebussar endast naturgasfordon i sin bussflotta och planerar att konvertera dessa till Hythane®-drift.

För att konvertera en naturgasbuss så att den blir lämplig för vätgasinblandad naturgas krävs inga stora förändringar om arbetsförluster i motorn accepteras. För att öka motorarbetet kan turboladdare användas, och förlusterna blir inte större än för en motor som kör på ren naturgas. Gasblandaren som finns för att blanda luft och naturgas innan motorn går bra att använda för Hythane® och den behöver inte bytas ut. Drift med Hythane® kräver en annan tändvinkel än den som används då motorn körs på ren naturgas. På grund av den snabba förbränningen kan tändningen senareläggas. In- och utventiltider måste ändras av motortillverkaren. På grund av det snabbare förbränningsförlopp som vätgasinblandningen innebär blir dessa tider annorlunda. Risken för flashback gör att överlappet (tiden då både in- och utventiler är öppna) måste reduceras. Risken för flashback finns även då ren naturgas används i förbränningsmotorer. Orsakerna är oftast dålig blandning av luft och bränsle eller ett tillfälligt fel på tändsystemet som orsakar tändning i insprutningsventilerna. En vätgasinblandning på 20 volymprocent ger ingen ökad risk för flashback, men vid högre vätgashalter uppkommer problem[19].

Figur 15 visar att tändningsvinkeln i motorn har betydelse för hur mycket effekt som fås ur motorn. Tre olika kurvor visas med olika tändvinklar.



Figur 15. Motoreffekt vid tre olika tändvinklar, 10, 20 och 30 grader innan övre dödläget.[1].

Tändvinkeln på en motor som kör på ren naturgas är i regel runt 30 grader. Vid vätgasinblandad naturgas ger en lägre vinkel lika mycket arbete i motorn. Detta beror på att vid snabbare förbränning kan mer arbete tillgodogöras om tändningen kommer något senare. Även tändningsfördröjning och brinntid förkortas vid vätgasinblandning. Kortast tider fås vid stökiometrisk förbränning.

9. Lagar och föreskrifter

9.1. Tankstationen

Dagens naturgastankstationer följer de regler som gäller för förvaring och hantering av brandfarliga gaser. Dessa regler har sprängämnesinspektionen utfärdat och de är generella för alla brandfarliga gaser och omfattar både naturgas och vätgas. Reglerna kan därför även användas för vätgasinblandad naturgas. Vätgasens egenskaper gör att anpassning av material och skydd för elektronisk utrustning är de viktigaste moment som skall ses över vid anpassning av tankstationen. Statisk elektricitet kan annars antända vätgasen på grund av gasens låga antändningsenergi och olämpliga material blir spröda och kan gå sönder[16][19].

9.2. Fordon

Dagens fordon måste vara typgodkända av Vägverket i enlighet med EU:s regler för fordonen. Fordon som inte är typgodkända får inte användas i trafiken. Eftersom det inte finns några fordon för vätgasinblandad naturgas på marknaden i dag i Sverige så finns det inte heller något typgodkännande för denna typ av fordon. En utredning måste alltså göras av Vägverket för att få godkända fordon.

I Canada och USA finns redan fordon för vätgasinblandad naturgas i trafiken. Canadas lagar innehåller inga regler eller fordonsgodkännande för fordon som drivs av vätgasinblandad naturgas. Det är istället de regler som gäller för rena naturgasfordon som är gällande för fordon med vätgasinblandad naturgas [19][17].

10. Säkerhetsaspekter

Vätgas har som tidigare nämnts mycket speciella egenskaper. Gasens förbränningstekniska egenskaper, främst de vida antändningsgränserna och den låga antändningsenergin gör att högre krav ställs på säkerheten vid hantering av vätgas än vid hantering av andra bränslen. Läckage av vätgas från en behållare kan få allvarliga konsekvenser och höga krav ställs på den utrustning som används vid vätgasanvändning.

Ett stort problem vid användning av vätgas är dess förmåga att orsaka väteförspredning hos flera stål, speciellt ferritiska stål. Vätesprödheten ökar risken för läckage av vätgasen och valet av material är av stor betydelse för säkerheten vid hantering av vätgas. Uppkomst av väteförspredning påverkas av tryck, temperatur, vätgasens renhet, plastisk deformation och cykliska variationer. På grund av de förhållanden som råder i en förbränningsmotor är materialvalet utan tvekan av stor betydelse för användning av vätgas som fordonsbränsle.

10.1. Säkerhetsaspekter för lagring av vätgas

10.1.1. Komprimerad vätgas

På grund av utvecklingen för lagring av CNG finns idag även lätta behållare av komposit som lämpar sig bra för lagring av vätgas. Den del på lagringsbehållaren som är mest känslig för vätgasen är behållarens in- och utlopp, och denna del bör skyddas mycket noga från yttre påfrestningar. Liksom på behållare för komprimerad naturgas bör en skyddsanordning finnas om problem skulle uppstå med tryckreglering, så att för högt tryck inte uppkommer i behållaren.

10.1.2. Flytande vätgas

På grund av att flytande vätgas värms upp då en viss del av vätgasen förångas krävs regelbundet utsläpp av en viss vätgasmängd för att överhettning skall undvikas. Vätgasen värms på grund av att trycket ökar då vätgasen blir gasformig och detta höjer temperaturen. Om vätgasen inte används tillräckligt ofta bör alltså utsläpp av en liten mängd vätgas ske ändå eftersom viss förångning sker. Hur mycket värme som frigörs i den lagrade vätgasen beror på hur lagringskärlet är utformat, och hur bra isoleringen är. Även storleken på lagringskärlet är av betydelse. En extremt god ventilation krävs runt lagringstankarna, så att vätgasen späds ut så fort som möjligt då gasen kommer ut i luften. Därför är det olämpligt med lager inomhus eller på dåligt ventilerade parkeringsplatser. Om isoleringen i lagringsbehållarna skulle försvinna är förångningshastigheten på gasen extremt hög, och ventilationen runt gaslagret bör även vara anpassat för att klara sådana olyckssituationer.

Den låga temperatur som används vid lagring av flytande vätgas gör många material spröda och skador kan uppkomma av kondens på utsidan utav behållarna.

Om flytande vätgas används i fordon krävs även här god ventilation runt fordonet om vätgas skulle läcka ut i luften.

10.2. Säkerhetsaspekter för fordon som drivs av vätgas

Placering av bränsletankar i fordonet skall, liksom bränsletankar för CNG, placeras så skyddat som möjligt inne fordonet. Bränsletankarna skall klara vibrationer och kraftigt tryck. De största riskerna för läckage är genom de ventiler som används för bränsletillförseln till motorn, och dessa bör därför placeras där god ventilation finns.

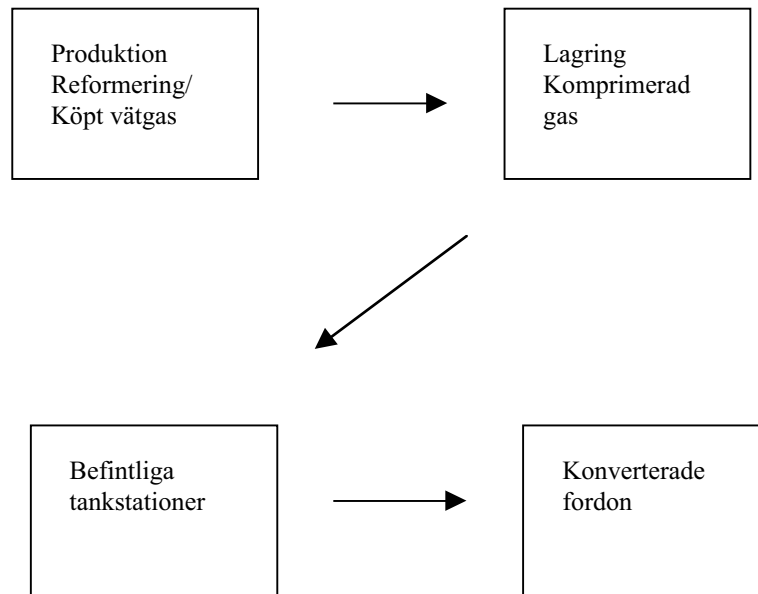
Alla bränsleledningar och alla komponenter i fordonet som kommer i kontakt med vätgasen skall bestå av material som är kompatibla med vätgas. Hänsyn bör även tas till risken för extern korrosion (till exempel vägsalt). Den största risken för läckage i bränsleledningarna är oftast i fogarna. Därför bör antalet fogar minimeras så mycket som möjligt. Material som inte tål höga temperaturer, till exempel plast och metaller med låg smältpunkt skall inte användas eftersom de smälter om en eventuell brand skulle uppstå och läckage av vätgas uppstår.

Användandet av direktinsprutning i motorn istället för en gasblandare minskar risken för flashback betydligt. Vid vätgasinblandad naturgas är dock risken för flashback liten och användandet av direktinsprutning är ingen nödvändig företeelse vid användning av vätgasinblandad naturgas som fordonsbränsle.

Det största säkerhetsproblemet i motorsystemet vid användning av vätgas i ett fordon är läckaget av vätgas från bränslesystemet ut i luften eller in i motorn genom avstängningsventilerna när motorn är avstängd. Risken för antändning är då stor eftersom flera elektriska komponenter som kan antända vätgasen finns nära eller i motorn, till exempel tändstift. Det är därför viktigt med elektriskt säkra komponenter för att minimera antändningskällor samt att minimera risken för läckage av vätgas runt motorn.

11. Försöksprojekt

Figur 16 visar ett förslag till försöksprojekt.



Figur 16. Försöksprojekt för en naturgasdriven stadsbuss i Malmö.

Det finns ingen standard för naturgas som avser innehållet i gasen i Sverige. Det kan därför vara möjligt att blanda in mindre mängder vätgas i naturgasen. I USA är det enligt standarden möjligt att blanda i upp till 4 volymprocent vätgas i naturgasen[30].

En tillsats på högst 3,5 volymprocent vätgas kräver ingen ombyggnation på bussen, men vätgastillsatser upp till 20 volymprocent kräver inga omfattande åtgärder på fordonet. En vätgastillsats på 5-10 volymprocent ger goda effekter och inte alltför stor påverkan på fordon och tankstation.

Det billigaste alternativet att producera vätgas på är att reformera naturgas eller något annat lättare kolväte. Vätgasinblandning i naturgas är ett dyrare bränsle att använda än ren naturgas och för att hålla ner kostnaderna bör det billigaste alternativet användas. Vid ett försöksprojekt med endast en buss kan vätgasen köpas för att undvika installationskostnaden av en reformeringsanläggning.

Lagring av vätgasen i komprimerad gasform är det billigaste alternativet och det mest använda idag. Det är inte lika energikrävande som att lagra vätgasen flytande.

De naturgastankstationer som finns idag går att användas för naturgas med vätgasinblandning. Under försöksprojektet i Montréal användes en likadan tankstation för långtidstankning som de vanliga naturgasbussarna använde. Eftersom samtliga bussar är anslutna till samma kompressor vid långsamtankning kan det dock vara nödvändigt att investera i en ny kompressor om testbussen skall tankas samtidigt som de andra naturgasbussarna. Eller så kan vätgasen tillsättas efter kompressorn om vätgasen har samma tryck som naturgasen då den tillsätts. Dock måste tankstationen utrustas med skyddsanordningar för den elektriska utrustningen, eftersom vätgasen kan användas av eventuella gnistor som kan uppkomma. De elektriska anordningar som används måste dessutom vara explosionskyddade. Dessutom

måste alla komponenter i tankstationen ses över, så att materialen är kompatibla med vätgas[22].

De förändringar som skall göras på en naturgasbuss för att den skall kunna köras på vätgasinblandad naturgas är inte så omfattande och med busstillverkarnas hjälp kan bussen konverteras.

11.1. Ekonomi

Kostnaden för produktion av vätgas är 10-27 \$/GJ H₂ för ångreforming. 10 volymprocent vätgasinblandning i naturgasen för Göteborg stads naturgasbussar skulle ge en produktionskostnad på \$ 14465-39056 per år. Dessutom tillkommer kostnaden för själva anläggningen. Kostnaden för samma mängd vätgas med elektrolys som produktionssätt är \$ 40502-72325 per år. Ångreforming är med marginal det billigaste alternativet för vätgasproduktionen [14][25].

Mahler AGS GmbH i Tyskland har på grund av ökad efterfrågan börjat att producera ”minireformrar” för lokal vätgasproduktion i mindre mängder. Dessa reformeringsanläggningar är tillverkade för att passa till vätgastankstationer och för annan lokal energiproduktion. Möjligheten till att köpa lämplig utrustning för småskalig produktion av vätgas med ångreforming bedöms bli större i framtiden.

Om försöksprojektet endast omfattar en gasbuss är det billigast att köpa vätgasen på flaska. Eftersom betydligt mindre mängder går åt då endast en buss körs på vätgasinblandad naturgas är det onödigt att investera i en produktionsanläggning. Tabell 4 visar priser för inköp av vätgas på flaska.

Flasktyp	Nominellt innehåll m3	Pris exkl moms	Gaskod
O-20	3,5 m3	237:-	1507
O-50	8,8 m3	349:-	1511
Paket 10xO50	88 m3	3426:-	1541
Paket 12xO50	105,6 m3	4111:-	1544
Flak 147xO50	1293,6 m3	47056:-	1588

Tabell 4. Priser på olika mängder vätgas.

Att bygga ett fordon från grunden för vätgasinblandad naturgas kostar lika mycket som ett fordon för ren naturgasdrift. Eftersom ingen konvertering hittills har skett på befintliga naturgasfordon finns det heller inga uppgifter om kostnaden för konverteringen.

11.2. Miljökonsekvenser

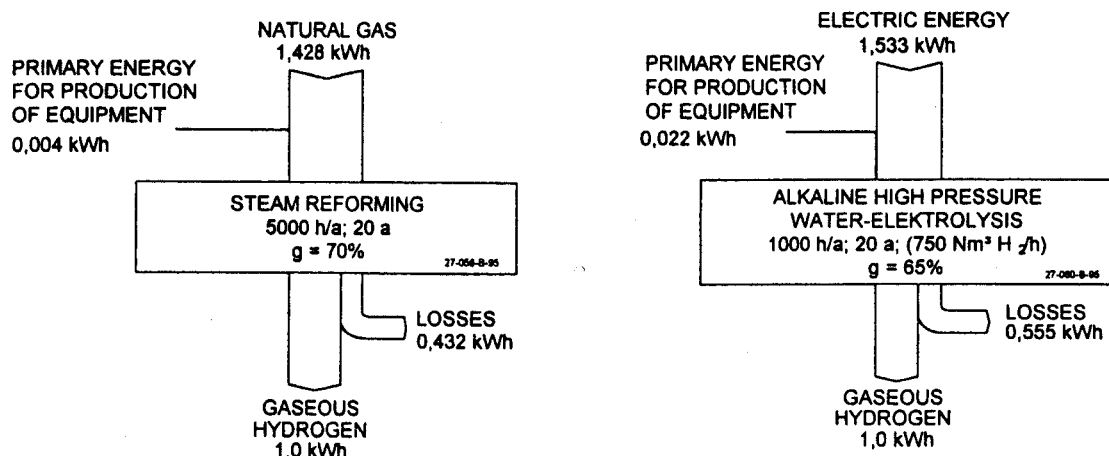
En viktig aspekt på förfarandet att använda vätgasinblandad naturgas är dess miljökonsekvenser. Miljöfördelarna vid användning av vätgasinblandad naturgas är tydliga,

men produktionen av vätgasen bör inte vara alltför energiförbrukande eller miljöbelastande så att vätgasen i ett livscykelperspektiv är ett bra alternativ.

De metoder som är lämpligast att använda vid lokal vätgasproduktion är ångreforming och elektrolys. Dessa metoder är de som förekommer mest i Sverige och tekniken för vätgasproduktion är väl utvecklad. Dessa två metoder jämförs därför med avseende på energiförbrukning och emissioner.

11.2.1. Energianalys

Figur 17 visar energibehovet för produktion av 1 kWh vätgas. Produktionsmetoderna ångreforming och alkalisk elektrolys jämförs. I energibehovet för produktion ingår summan av den energi som krävs för att framställa energiråvaran som används i framställningen, samt processutrustning, transporter och avfall från produktionsmaterial. För elektrolysprocessen antas det att elen framställs enbart från fossila råvaror.



Figur 17. Energiförbrukning för produktion av 1 kWh vätgas med ångreforming och elektrolys som produktionsmetoder[20].

Ur figur 17 ses att större energiförluster fås med elektrolys som produktionsmetod. Per kWh producerad vätgas fås en förlust på 0,428 kWh om ångreforming används som produktionsmetod. En Hythane®buss (20 volymprocent vätgasinblandning) som kör 50% av drifttiden på låg last och resten av tiden på full last ger en bränslebesparing på 2,10 kWh per kWh tillsatt vätgas. Ingen har hänsyn tagits till energiförbrukning för lagring av vätgas vid tankstationen men troligtvis är användning av vätgasinblandad naturgas ett energieffektivt alternativ.

11.2.2. Emissioner

En stor fördel med elektrolys som produktionsmetod är att endast rent vatten används som produktionsmetod och att produktionsanläggningen därigenom inte avger några emissioner. Det sätt som den använda elen produceras på är avgörande för hur miljövänlig

produktionsanläggningen är. En elektrolysanläggning som drivs av el från förnyelsebara råvaror är ett mycket konkurrenskraftigt alternativ ur emissionssynvinkel.

Tabell 4 visar innehållet i de rökgaser som släpps ut från en ångreformeringsanläggning. Mängden gas är per m³ producerad vätgas.

Gas	mängd m3
CO2	0.25
O2	0.021
N2	0.874
H2O	0.282

Tabell 5. Mängd rökgas per m³ producerad vätgas i en ångreformeringsanläggning[29].

11.2.2.1. Koldioxid

I de flesta processer som tillverkar vätgas bildas koldioxid som slutprodukt. 1 m³ tillverkad vätgas genom ångreforming ger ett utsläpp av 0.25 m³ koldioxid. Detta är ofrånkomligt eftersom kolväten i regel är råvara för framställning av vätgas. Ju mer vätgas som tillsätts till naturgas desto högre blir koldioxidutsläppen från reformeringen[14]. Däremot minskar koldioxidutsläppen från fordonet på grund av en lägre kolhalt i bränslet och en lägre bränsleförbrukning. Ett fordon som drivs på Hythane® med 50% av driftstiden på låg last minskar koldioxidutsläppen med cirka 30 gram per gram förbrukad vätgas. Utsläpp av koldioxid vid produktion av 1 gram vätgas genom reformering är 10 gram

Vid ångreforming är det oftast ekonomiskt fördelaktigt att utvinna koldioxiden som en ren produkt. Koldioxiden utvinns i regel med hjälp av PSA-teknik (pressure swing absorption). Koldioxiden kan användas till bland annat köldmedium[26].

Ett sätt att undvika utsläpp till atmosfären av den bildade koldioxiden är att lagra den i berggrum under jord eller i havet. Denna typ av lagring är fortfarande under utveckling men tros ha stor betydelse för utsläppen av växthusgaser i framtiden. I Europa finns mycket goda möjligheter för lagring i berggrum och de största berggrummen finns i Norge. Möjligheten till lagring av koldioxid på detta sätt ökar möjligheten att använda fossila råvaror för vätgasframställning i framtiden. Kostnaden för ångreforming ökar 25% med denna typ av koldioxidlagring, men totala kostnaden är fortfarande lägre än för vätgasframställning med elektrolys. Vid vätgasframställning av kol ökar kostnaden med 50% om denna typ av utvinning skall användas[14].

11.2.2.2. Övriga emissioner

Emissioner av olika typer av kolväten från en reformeringsanläggning är mycket små. Eftersom produktionsmetoden är gammal och väl utvecklad är tekniken för att minska emissioner av miljöfarliga ämnen från anläggningen mycket bra. Lagar och bestämmelser är en annan orsak till de låga emissionerna från anläggningarna.

Elektrolysanläggningar avger inga emissioner eftersom den råvara som används är vatten. Den huvudsakliga källan till utsläpp av miljöfarliga ämnen är tekniken för framställning av den el som används vid produktionen. Om elektrolys används som produktionsmetod bör elen som används komma från förnyelsebara källor producerad med modern teknik, så att miljöbelastningen blir så liten som möjligt.

12. Slutsatser

12.1. Genomförbarhet för ett projekt

Ett projekt med en gasbuss som drivs av vätgasinblandad naturgas har tekniskt sett goda möjligheter till att kunna genomföras. Fordonets konstruktion skiljer sig inte mycket från vanliga naturgasbussars konstruktion, där nuvarande teknik är mycket god. Utveckling av fordon som drivs av vätgasinblandad naturgas främjar utvecklingen av rena vätgasfordon, och intresset för vätgasinblandad naturgas stärks därför inom fordonsindustrin. Effekterna med vätgasinblandning är också positiva och kan hjälpa fordonsindustrin att klara miljökrav i framtiden.

För att driva alla stadsbussar med vätgasinblandad naturgas kan vätgasen produceras med ångreformerings eller alkalisk elektrolys av vatten. Eftersom ångreformerings är det billigaste alternativet är det metoden som troligtvis blir den mest använda. Alkalisk elektrolys medför dock en mindre miljöbelastning och höjda miljökrav kan medföra att alkalisk elektrolys kommer att användas. Om elektriciteten framställs av förnyelsebara råvaror blir alkalisk elektrolys ett mycket konkurrenskraftigt alternativ. Troligtvis kommer avregleringen av elmarknaden som infördes år 2000 att höja elpriset och skillnaden i kostnad mellan ångreformerings och elektrolys ökar troligen därefter.

Vätgasen som produceras skall lagras i komprimerad eller flytande form. De båda lagringsmetoderna kräver hög energitillförsel, och trycket vid lagring av komprimerad vätgas bör vara minst 200 bar. Lagring av komprimerad naturgas är dock ett billigare alternativ och fordonen kör på vätet i gasform, så lagring av vätet som komprimerad gas är därför det bästa alternativet. Utvecklingen av lagringstankar för komprimerad gas kommer att ge möjlighet till att lagra gasen vid högre tryck i framtiden.

Vätgasen skall produceras lokalt, gärna i anslutning till tankstationen, eftersom vätgasen enbart produceras för att användas som fordonsbränsle. Vid lokal produktion undviks onödiga transporter och de lagringsmetoder som krävs vid transport. Detta minskar både miljöbelastning och kostnader för vätgasanvändningen.

Ett problem som måste lösas för att kunna använda vätgasinblandad naturgas är att få fram lagar och regler som gäller specifikt för bränslet. Projektet i Montréal som startade 1995 har inte introducerat några fler fordon som drivs av vätgasinblandad naturgas. Orsaken är att det saknas föreskrifter och godkännanden från de myndigheter som berörs. Dessutom behövs hårdare miljöregler, ett större intresse från fordonsindustrin och ett publikt stöd.

12.2. Fortsatt arbete

I detta avsnitt ges förslag på fortsatt arbete som behövs för att få igång ett försöksprojekt med gasbussar i Malmö som drivs av vätgasinblandad naturgas.

Experimentella tester bör genomföras på olika halter av vätgasinblandning i naturgas. Lämplig vätgashalt kommer troligtvis inte att överstiga 20 volymprocent, och den mest lämpliga vätgashalten avgörs bäst med tester av olika halter i en gasmotor.

Det behövs en detaljerad beskrivning av den ombyggnation som behövs av fordonet som skall användas i försöksprojektet. Olika halter vätgas i bränslet påverkar fordonet olika mycket och fordonet måste anpassas efter den vätgashalt som bränslet skall innehålla. De största ändringarna kommer troligtvis att ske i motorns styr- och reglersystem, eftersom de delar som motorn är uppbyggda av går att använda.

De bestämmelser och regler som gäller för fordon i trafik skall följas. Eftersom det saknas regler för den typ av bränsle som skall användas måste detta lösas med berörda myndigheter.

När fordonet skall tankas finns olika sätt att tillsätta vätgasen. Antingen kan vätgasen tillsättas innan kompressorn som komprimerar naturgasen eller så kan den tillsättas efteråt. Det billigaste alternativet är att använda den befintliga kompressorn, men detta medför problem eftersom flera fordon tankas samtidigt. Kan försöksbussen tankas enskilt undviks behovet av en ny kompressor.

Vätgastillförseln kan som tidigare nämnts utgöras av vätgas som är inköpt på flaska. Om fler fordon skall köras på vätgasinblandad naturgas i efter projektet kan det vara lämpligt med en investering i en ångreformeringsanläggning.

Referenser

1. G.A. Karim, I. Wierzba och Y. Al-alousi. *Methane-Hydrogen mixtures as fuels*. Int. J. Hydrogen Energy 21 (1996) pp 625-631.
2. R.L. Hoekstra, K. Collier, N. Mulligan och L. Chew. *Experimental study of a clean burning vehicle fuel*. Int. J. Hydrogen Energy 20 (1995) pp 737-745.
3. S.O. Bade Shrestha, G.A. Karim. *Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications*. Int. J. Hydrogen Energy 24 (1999) pp 577-586.
4. Michael R. Swain, Mirza J. Yusuf, Zafer Dülger och Matthew N. Swain. *The effects of hydrogen addition on natural gas engine operation*. SAE paper 932775, pp 1592-1600, 1993.
5. Ahsan R. Choudhuri, S.R. Gollahalli. *Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels*. Int. J. Hydrogen Energy 25 (2000) 451-462.
6. B. Nagalingam, F. Duebel och K. Schmillen. *Performance study using natural gas, Hydrogen-supplemented natural gas and hydrogen in avl research engine*. Int. J Hydrogen Energy 8 (1983) pp 715-720.
7. Justin Fulton, Frank Lynch och Roger Marmaro. *Hydrogen for reducing emissions from alternative fuel vehicles*. SAE paper 931813, pp 151-159, 1993.
8. Dale Andreatta och Robert W. Dibble. *An experimental study of air reformed natural gas in spark-ignited engines*. SAE paper 960852, pp 85-93, 1996.
9. H. Kido, S. Huang, K. Tanoue och T. Nitta. *Improvement of lean hydrocarbon mixtures combustion performance by hydrogen addition and it's mechanisms*. Comodia 94 (1994) pp 119-124.
10. A. De Risi, B.F. Gajdeczko, and F.V. Bracco. *A study of H₂, CH₄, C₂H₆ mixing and combustion in a direct-injection stratified-charge engine*. SAE paper 971710, pp 1-17, 1997.
11. Richard L. Bechthold. *Alternative fuels guidebook*. 1997.
12. M.L. Poulton. *Alternative fuels for road vehicles*. 1994.
13. Gralèn, Henrik. *Produktion och storskalig lagring av vätgas, samt lagerhaverier*. Examensarbete Chalmers Tekniska Högskola, 1994.
14. Kaiser, Christina. *Hydrogen supply of fuel cell buses*. Examensarbete Chalmers Tekniska Högskola, 2001.
15. Jung. Patrik. *Technical and Economic Assessment of Hydrogen and Methanol Powered Fuel Cell Electric Vehicles*. Examensarbete Chalmers Tekniska Högskola 1999.

16. Samtal med Lars Synnerholm, Sprängämnesinspektionen 9/8 2001.
17. Samtal med Åke Sundberg, Vägverket 13/8 2001.
18. Samtal med Bo Ramberg, FordonsGas väst AB
19. Samtal med Frank Lynch, Hydrogen Components Inc.
20. U. Wagner, B. Geiger och H. Schaefer. *Energy life cycle analysis of hydrogen systems*. Int. J. Hydrogen Energy 23 (1998) pp 1-6.
21. Andersson, Sven. *Förbränningsteknik*. Kurslitteratur, Chalmers Tekniska Högskola 2000.
22. Samtal med Jean-Pierre Baracat, Nova Buses, Kanada
23. Alexandra Cattelan, Jim Wallace. *Exhaust emission and energy consumption effects from hydrogen supplementation of natural gas*. SAE paper 952497, pp 155-166, 1995.
24. B. Gevert, Sven Järås. *Teknisk kemi*. Kurslitteratur, Chalmers Tekniska Högskola, 1999.
25. Samtal med Hans Bürgel, Mahler AGS GmbH, Tyskland.
26. J.G. Hansel, G.W. Mattern och R.N. Miller. *Safety considerations in the design of hydrogen powered vehicles*. Int. J Hydrogen Energy 18 (1993) pp 783-790.
27. Samtal med Giordano Gossi, Idromeccanica, Italien.
28. B. Drolet, J. Gretz, D. Kluyskens, F. Sandmann och R. Wurster. *The Euro-Québec hydro-hydrogen pilot projekt [eqhhpp]: Demonstration phase*. Int. J Hydrogen Energy 18 (1993) pp 783-790.
29. Industrial gases seminar. *Generation of technical gases on site by means of non-cryogenic processes*. Bali, Indonesien.
30. P. Knutas Lindblad. *Naturgas/biogas som fordonsbränsle. Utveckling och kommersialisering i USA*. Sveriges tekniska attachéer, utlandsrapport. 1994.
31. *Premix, a program for modelling steady, laminar, one-dimensional premixed flames*. Chemkin collection release. 2000.

Appendix A

Motor till figur 2-4;

Motorspecifikationer

Tillverkare	3.1L Chevrolet Lumina
Motortyp	sexcylindrig fyrtaktsmotor, vattenkyld
Cylinderdiameter	89 mm
Slaglängd	84 mm
Kompressionsförhållande	8.8:1

Motor till figur 5;

Motorspecifikationer

Tillverkare	Chevrolet 350
Motortyp	åttacylindrig fyrtaktsmotor
Cylinderdiameter	102.36 mm
Slaglängd	88.39 mm
Kompressionsförhållande	9.00:1



SE-205 09 MALMÖ • TEL 040-24 43 10 • FAX 040-24 43 14
Hemsida www.sgc.se • epost info@sgc.se
