

SYSTEMEFFEKTIVITET FÖR ALTERNATIVA DRIVMEDEL

*Olika drivmedel och drivsystem/motorer
i ett livscykelperspektiv 2012*



Ecotraffic

Titel: Systemeffektivitet för alternativa drivmedel

Sökord: alternativa drivmedel, vätgas, metanol, etanol, el, DME, alkoholer, hybrider, bränsleceller, Fisher-Tropsch, syntesgas, biomassa, naturgas

Författare: Peter Ahlvik och Åke Brandberg, Ecotraffic R&D³ AB

Kontaktperson: Olle Hådell och Pär Gustafsson, Vägverket, Fordonsavdelningen

Vägverkets publikationsnummer: 2001: 39

ISSN: 1401-9612

Utgivningsdatum: 2001-04

Tryckeri: Vägverket, Borlänge

Upplaga: 200 exemplar

Distribution: Vägverket, avdelningen för intern service, telefon 0243-755 00, fax 0243-755 50, e-post: vagverket.butiken@vv.se

FÖRORD

Vägtransporternas utsläpp av klimatgasen koldioxid och vilka åtgärder som bör vidtas för att minska dessa utsläpp debatteras ofta livligt både i Sverige och internationellt.

En mängd alternativa lösningar diskuteras. Det kan gälla bränslen baserade på biomassa, alternativa fossila bränslen och nya drivsystem som också kräver nya bränslen etc.

En samlad bild av energieffektiviteten från källa till hjul eller "well to wheel", systemverkningsgraden, hos de alternativ som diskuteras saknas dock. Det finns naturligtvis fler parametrar än energieffektivitet att ta hänsyn till, t.ex. kostnader, men i denna studie har fokus legat på systemverkningsgrad.

Rapporten redovisar resultatet av en genomgång och analys av ett antal rapporter. Totalt har 98 olika kombinationer av drivmedel, energiomvandlare ("motorer") och drivsystem jämförts, främst med avseende på energieffektiviteten i hela systemet.

Rapporten har tagits fram av Peter Ahlvik och Åke Brandberg, Ecotrafic R&D³ AB. Författarna ansvarar för de resultat och de bedömningar som presenteras i rapporten.

Borlänge i april 2001

Vägverket, Fordonsavdelningen

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sida

SAMMANFATTNING

1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND.....	3
3	METODIK	5
3.1	Tidshorisont	5
3.2	Litteratursökning	6
3.3	Utvärdering av litteratur	6
3.4	Livscykelperspektivet.....	6
3.4.1	Produktion av råvara	6
3.4.2	Produktionsprocesser	7
3.4.3	Distribution och tankning	7
3.4.4	Slutanvändning	8
3.5	System att studera	9
3.5.1	Systemdefinition.....	9
3.5.2	Indelning av produktionsprocesser	10
3.5.3	Indelning av drivsystem	11
3.5.4	Valda system.....	11
4	RESULTAT	16
4.1	Produktion av råvara	16
4.1.1	Naturgas.....	16
4.1.2	Biomassa – lignocellulosa	17
4.1.3	Biomassa för rötning	17
4.2	Transport av råvara	17
4.2.1	Transport av naturgas.....	17
4.2.2	Transport av biomassa - lignocellulosa.....	17
4.2.3	Transport av biomassa - lucern	18
4.3	Framställning av drivmedel.....	18
4.3.1	Metan	19
4.3.2	Metanol	19
4.3.3	DME	19
4.3.4	Etanol.....	20
4.3.5	Syntetiska kolväten.....	20
4.3.6	Vätgas.....	21
4.4	Distribution och omvandling	22
4.4.1	Metan	22
4.4.2	Metanol	22
4.4.3	Etanol.....	23
4.4.4	Kolväten.....	23
4.4.5	Vätgas.....	23
4.4.6	Elektricitet.....	23
4.5	Tankning	23
4.5.1	Metan	24
4.5.2	Vätgas.....	24
4.6	Slutanvändning.....	24

4.6.1	Teknikskifte för bensen- och dieselmotorer	24
4.6.2	Val av fordonstyp	28
4.6.3	Ottomotor	32
4.6.4	Dieselmotor	38
4.6.5	Bränslecell – direktdrift	39
4.6.6	Bränslecell – hybrid	40
4.6.7	Bränslecell – internreforming (DMFC)	40
4.7	Total systemeffektivitet	41
4.7.1	Gasformiga drivmedel	41
4.7.2	Flytande drivmedel	46
4.7.3	Högst systemverkningsgrad	50
4.7.4	Användning av fossil respektive icke fossil energi	54
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	57
6	REFERENSER	59

TABELLFÖRTECKNING

Sida

Tabell 1.	Sammansättning av Dansk naturgas	16
Tabell 2:	Frivilliga gränser för CO ₂ i Europa	28
Tabell 3:	Några viktiga fordonsparametrar	29
Tabell 4:	Luftmotstånd för några bilmodeller	30
Tabell 5.	Vikt för bilen med olika drivsystem och drivmedel	31
Tabell 6.	Systemverkningsgrader för gasformiga drivmedel från fossil naturgas	42
Tabell 7.	Systemverkningsgrader för gasformiga drivmedel från biomassa	45
Tabell 8.	Systemverkningsgrader för flytande drivmedel från fossil naturgas	46
Tabell 9.	Systemverkningsgrader för flytande drivmedel från biomassa	48
Tabell 10.	Systemverkningsgrad för system baserade på råolja och fossilgas	49
Tabell 11.	Systemverkningsgrad för biomassabaserade system	49

FIGURFÖRTECKNING

Sida

Figur 1.	Alternativ "gas"	12
Figur 2.	Alternativ "flytande"	14
Figur 3:	Teknikskifte	25
Figur 4:	Bränsleförbrukningspotential för olika drivsystem och drivmedel (PNGV)	27
Figur 5:	Reduktion av bränsleförbrukning för ottomotorer i relation till kostnader	33
Figur 6.	Verkningsgrad för bränsleceller	40
Figur 7.	Systemverkningsgrad för de 10 bästa kombinationerna från naturgas	51
Figur 8.	Systemverkningsgrad för den bästa kombination för respektive drivmedel. Drivmedel med naturgas som råvara	51
Figur 9.	Systemverkningsgrad för de 10 bästa kombinationerna från biomassa	52
Figur 10.	Systemverkningsgrad för den bästa kombination för respektive drivmedel. Drivmedel med biomassa som råvara	53
Figur 11.	Fossil respektive icke fossil energi	55

BILAGOR

Bilaga 1: Internationella källor till SAE:s databas GMD

Bilaga 2: Resultat i tabellform

SAMMANFATTNING

Ökade utsläpp av klimatgaser från trafiken har lett till att intresset för alternativa drivmedel och för biodrivmedel i synnerhet ökat. På lång sikt kommer också de fossila drivmedlen att ta slut men innan det händer kommer kostnaderna för att exploatera tillgångarna att öka markant. Alternativa drivmedel är också av intresse ur försörjningssynpunkt för att kunna hålla en viss beredskap för en krissituation.

Två olika typer av råvaror för produktion av alternativa drivmedel är av speciellt intresse att undersöka, nämligen fossil naturgas och biomassa. Tillgången på naturgas är stor och kan i framtiden bli ett komplement till råolja som råvarubas. På längre sikt är dock biodrivmedel av intresse för att minska utsläppen av klimatgaser. En indelning av drivmedlen i gasformiga och flytande drivmedel har gjorts för att ta hänsyn till den väsentliga skillnad i infrastruktur för distribution och tankning som föreligger mellan dessa två kategorier av drivmedel. En annan typ av indelning som är av intresse är att dela in bränslena efter deras potential till penetration på marknaden (i ett fullt utbyggt scenario). Följande definitioner har använts:

- >1% men <10% av marknaden (nischbränsle)
- >10% av marknaden (huvudbränsle, dvs. ett bränsle för allmän användning)

Alternativ som inte har potential att klara mer än 1% har uteslutits eftersom en så låg penetration är av mindre intresse ut klimatgassynpunkt.

Eftersom produktionen av alternativa drivmedel i flera fall ännu inte är fullt utvecklad har ett framtida scenario använts för att visa en mer realistisk potential för denna teknik i jämförelse med de konventionella drivmedlen. För att drivsystem som bränsleceller och hybriddrift skall vara realistiska alternativ krävs också att en användning av dessa system fokuseras på framtida fordon. En tidshorisont till 2012 har valts som en lämplig kompromiss mellan olika tänkbara tidshorisonter. För det första har det varit viktigt att inte välja en allför avlägsen framtid för att det skall vara möjligt att förutspå vad som kan tänkas hända. För det andra är det viktigt att tillfredsställa kriteriet att den nya tekniken skall ha haft tillräckligt lång utvecklingstid för att mogna. Hänsyn har naturligtvis tagits till att även de konventionella drivsystemen och motorer kommer att utvecklas vidare under tidsperioden. Totalt har 98 olika kombinationer av drivmedel, energiomvandlare ("motorer") och drivsystem studerats.

En litteratursökning har utförts för att komplettera befintligt underlag när det gäller produktion av drivmedel och teknik för drivsystem i lätta fordon. Vad gäller produktionen av drivmedel har en uppdatering av underlag och beräkningar i en tidigare studie från Ecotrafic, "Life of Fuels", gjorts. För drivsystemen har dataunderlag samlats in för att sedan kunna utföra simuleringar av verkningsgrad och bränsleförbrukning för drivsystemet i fordonet. Dessa simuleringar har utförts i programmet Advisor® från laboratoriet NREL i USA.

Resultaten från studien visar att bränsleceller och dieselmotorer är de energiomvandlare som ger den högsta verkningsgraden och att ottomotorn har en lägre verkningsgrad än dessa två. En väsentlig förbättring av systemverkningsgraden erhålls om kolvmotorerna används i ett hybridssystem medan förbättringen av hybridsystemet är mindre för bränsleceller. Skillnaderna i eldrivsystemet mellan dessa två alternativ (bränsleceller resp. kolvmotorer) är dock stora eftersom bränslecellen använder ett seriehybridssystem (enda möjlighe-

ten) och kolvmotorerna förutsätts använda ett parallellhybridsystem. Valet av hybridsystem i det senare fallet har gjorts för att verkningsgraden för detta är högre än för ett seriehybridsystem.

Resultaten för de olika drivmedlen visar att de på fossil bas (råolja, naturgas) självfallet uppvisar högre systemverkningsgrader än de på biomassabas beroende på att de senare utgår från en ursprunglig, förnybar råvara medan de fossila startar från ett "halvfabrikat", som ej återbildas och därför påverkar växthuseffekten, vilket de biomassabaserade gör bara i mycket liten grad. För de sistnämnda erhålls i bästa fall drygt 11% av råvarans energiinnehåll som utfört transportarbete, vilket är något lägre än för bilar med bensindrivna ottomotorer (modellår 2012). Generellt gäller att ju mindre konvertering som behövs för råvaran för att få användbart drivmedel desto högre är verkningsgraden. Detta är dock bara aktuellt för fossilgas och råolja eftersom en relativt sett mer omfattande konvertering alltid är fallet för biomassa.

Den inbördes ordningen mellan drivmedlen för de bästa kombinationerna av alla drivmedel varierar beroende på om råvaran är fossil naturgas eller biomassa. Tre drivmedel, DME, GH_2 och metanol (varav två är gasformiga och ett är flytande), har identifierats som drivmedel som har hög systemverkningsgrad då *både* fossil naturgas och biomassa används som råvara förutsatt att bästa drivsystem används. Det kan också nämnas att råvara och produktionssystem för DME och metanol i princip är desamma.

Som sammanfattning av resultaten från denna studie kan man säga att det inte är trivialt att hitta någon definitiv "vinnare" bland de 3-5 främsta kandidaterna. Däremot är det lättare att utesluta något alternativ där systemverkningsgraden är förhållandevis låg. Vätgas från el är ett sådant fall.

Det förtjänar också att nämnas att det finns ett flertal olika kriterier för val av drivmedel som inte berörts i denna rapport. Ett mycket viktigt kriterium är t.ex. kostnaden för produktion, distribution och användning. Sådana analyser har emellertid legat utanför ramarna för denna studie.

PA

1 INLEDNING

Intresset för alternativa drivmedel och då i synnerhet biodrivmedel synes ökande som följd av de ökande problemen med utsläppen av klimatgaser från vägtrafiken. Förr eller senare kommer också de fossila drivmedlen att sina och frågan är inte längre *om* utan *när* det kommer att hända. Rent principiellt kommer naturligtvis inte de fossila bränslena att ta helt slut utan det som kommer att hända är att kostnaderna för att exploatera tillgångarna kommer att bli prohibitivt höga. Ett scenario av detta slag ligger naturligtvis mycket långt fram i tiden (~50 år) och kommer därför knappast att drabba denna generation i någon nämnvärd omfattning.

Alternativa drivmedel är också av intresse ur försörjningssynpunkt för att kunna hålla en viss beredskap för en krissituation. Med detta kan man åsyfta mindre kriser som t.ex. initieras av olika politiska orsaker, exempelvis krig i mellanöstern. Längre och djupare kriser kan också vara tänkbara med utgångspunkt från att efterfrågan överstiger produktionskapaciteten. Vid ett sådant scenario – som egentligen kan betraktas som en priskris – kommer naturligtvis priserna på drivmedel att öka väsentligt tills efterfrågan och tillgång möts. Det senaste halvåret har vi haft en mindre kris av detta slag och de två så kallade oljekriserna under 70-talets första respektive sista hälft var egentligen också av denna karaktär. Inom den närmaste framtiden kan man förvänta sig större kriser av detta slag eftersom produktionskapaciteten och inte oljereserverna är problemet. Beräkningar visar nämligen att den nuvarande produktionstakten av oljeutvinningen bara kan ökas till en viss maximal nivå. Man kan helt enkelt inte öka produktionen (pumpningen) från en oljekälla mer än till en viss nivå utan att detta leder till produktionsstörningar. Detta beror på de fysikaliska begränsningarna i de oljeförande lagren i bergrunden som i detta fall maximerar produktionstakten. Ett scenario av nämnda slag (dvs. att produktionstaket är nått) skulle enligt trovärdiga beräkningar kunna ske redan någon gång mellan 2010 och 2015. Resultatet torde bli väsentligt ökade kostnader och/eller tillfällig brist på olja och oljeprodukter med risk för allvarliga konsekvenser för världsekonomin.

Med hänsyn till ovannämnda scenarier kan det vara strategiskt klokt (av beredskapsskäl) och ekonomiskt lönsamt (ur konkurrenssynpunkt i ett internationellt perspektiv) att redan i dag investera i kunskapsuppbyggnad och sedermera kanske också i en uppbyggnad av produktionskapaciteten för alternativa drivmedel.

När det gäller satsningar på alternativa drivmedel kommer frågan ofta upp om vilket drivmedel som är det bästa. De alternativa drivmedlen kan indelas i två olika kategorier. Den första kategorin är drivmedel där råvarorna är fossila och den andra kategorin är drivmedel av biorsprung. Även om Sverige och flera andra länder i Europa, speciellt gäller detta de nordiska länderna, har en god tillgång på biomassa finns inte samma förutsättningar för alla länder i Europa. Lokalt finns också konkurrens om biomassan och på samma sätt är det inte ekonomiskt försvarbart att ta tillvara all tänkbar biomassa. Konkurrensen om biomassan är dock inte alla gånger så hög som man skulle tro eftersom pappers- och massaindustrin och energisektorn inte har samma krav (fiber kontra energi). Sammantaget innebär begränsningarna att den kommersiellt tillgängliga biomassan är väsentligt mindre än den teoretiskt maximala. Eftersom fordons- och drivmedelsbranscherna i alla högsta grad är internationella är det knappast troligt att Sverige skulle kunna använda drivmedel som resten av världen inte använder. En möjlighet att bredda basen för nya drivmedel är om även fossila råvaror kan användas som komplement till biomassan. En mycket viktig faktor vid valet av

drivmedel är effektiviteten i hela systemet. Med detta avses ett livscykelperspektiv. Distinktionen görs dock i denna studie att produktion och skrotning av fordon inte tas med. Orsaken är dels att energianvändningen i dessa två delsteg är små i förhållande till energin för drivmedlet och dels att det helt enkelt att det inte föreligger några större skillnader mellan olika drivsystemalternativ i detta avseende. Det viktiga är ju att beakta skillnaderna mellan olika system och det är inte nödvändigtvis absolutnivån som är det primära. Systemeffektiviteten för de alternativa drivmedlen är således en mycket viktig faktor att beakta. En annan viktig faktor är kostnaderna. För att i någon mån minska omfattningen av detta arbete beaktas inte den senare faktorn i denna studie. En komplettering med denna parameter kan göras senare.

Syftet med det arbete som redovisas här har varit att på ett enkelt sätt belysa systemeffektiviteten för olika alternativa drivmedel med beaktande av att denna jämförelse skall ske i ett förenklat livscykelperspektiv. För att i någon mån kunna inteckna framtida förbättringar i de processer för drivmedelsframställning och distribution av drivmedel som förväntas ske för de minst utvecklade alternativen är man tvungen att sätta en tämligen lång tidshorisont för studien. Vi har valt ett scenario som skulle kunna inträffa mellan 2010 och 2015. Det verkliga utfallet beror naturligtvis på en mängd olika faktorer, inte minst politiska beslut, men det viktiga i denna utredning har varit att visa de tekniska möjligheter som finns. Genom att använda de resultat som tagits fram i detta arbete finns möjligheter att göra grova gallringar mellan de olika alternativen och detta har också varit huvudmålsättningen med arbetet.

För att göra framställningen lite mer överskådlig har korta sammanfattningar gjorts i speciella sammanfattningsrutor (se exempel nedan) för vissa av huvudkapitlen.

Ecotraffics sammanfattning

I summeringsrutor görs en sammanfattning av de slutsatser som kan dras från de resultat som antingen hämtats från litteraturen eller som genererats inom detta projekt.

nya rapp

PA

2 BAKGRUND

Ecotrafic har tidigare utfört ett antal olika studier med koppling till det föreliggande arbetet. Den första och kanske viktigaste studien att nämna i sammanhanget har varit den livscykelanalys, Life of Fuels (i fortsättningen förkortad LoF), som var en av de första mer heltäckande studierna som utfördes inom området [1]¹. Flera av de drivmedels- och drivsystemkombinationer som behandlas i föreliggande studie fanns även med i LoF. Inom ramen för ett tidigare projekt för KFB [2] och med en del egna insatser har alla beräkningar i LoF matats in i en modell i Excel och därför kan nu ändringar tämligen enkelt införas i beräkningarna. Rent generellt kan konstateras att de data och resultat som finns för produktion och distribution av konventionella fossila drivmedel i LoF fortfarande är tämligen aktuella medan en del ändringar måste göras för andra drivmedel. Likaså är de data som användes för energianvändning och avgasemissioner föråldrade. I en rapport för KFB har hälso- och miljöeffekter av olika drivmedel undersökts av Ecotrafic [2]. Prognoser för emissioner i framtiden med olika drivmedel gjordes också i denna rapport vilket ger en viss vägledning för de uppskattningar som görs i föreliggande arbete. En bredare litteraturstudie av alternativa drivmedel som utförts för Naturvårdsverket [3], samt rapporter om emissionstester på fordon som Ecotrafic har utfört för MTC har också varit användbara underlag [4, 5].

Energimyndigheten (STEM) och dess föregångare inom energiområdet (olika enheter på NUTEK), har ansvar för satsningar på statligt stödd forskning, utveckling och demonstration (FUD) inom området. Bland Energimyndighetens satsningar kan bl.a. ett mångårigt stöd till produktion av etanol från cellulosaråvara nämnas. Även satsningar på metanol har sedermera också diskuterats hos STEM. Satsningar på biogasproduktion har också gjorts och kommer sannolikt också att göras framgent. Förutom den nämnda stöden till produktion av drivmedel har Energimyndigheten också beviljat stöd till FUD för bl.a. energieffektivisering, nya drivsystem m.m.

KFB drev under 6 år ett program för demonstration av biodrivmedel, det så kallade Biodrivmedelsprogrammet. En liknande satsning har också gjorts på el- och elhybridfordon. Fortsatt FoU görs också av KFB inom dessa områden och kommer sannolikt också att göras framgent av den nya myndigheten Vinnova som bildats genom sammanslagningen av KFB med andra myndigheter.

Det har också funnits en hel del andra intressanta satsningar på FUD inom alternativa drivmedel och alternativa drivsystem. En del av dessa satsningar har även inkluderat alternativa drivmedel som t.ex. naturgas. Någon översikt av de nämnda satsningarna görs inte här utan man kan bara konstatera att det finns en hel del material som kan vid behov kan bearbetas vidare.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det i Sverige gjorts en hel del satsningar inom området. Man kan exempelvis nämna att Stockholm har världens största flotta av etanoldrivna bussar. En upphandling av bränsleflexibla bilar för etanol-bensindrift har nyligen gjorts vilket också kommer att ge en av världens största flottor av denna kategori av fordon. Det som ännu fattas i Sverige är en introduktionsstrategi för alternativa drivmedel. Ett beslut och förankring av en sådan strategi skulle kunna ge helt andra förutsättningar för alternativa drivmedel i framtiden. Orsakerna till att en sådan strategi ännu inte finns kan

¹ Siffror inom hakparentes avser referens som listats i referenslistan i slutet av rapporten.

man bara spekulera över men författarnas åsikt är i alla fall att ett tillräckligt gediget underlag ännu sammanställts som bas för att utarbeta en sådan strategi i detalj. De regler och föreskrifter som finns inom EU, t.ex. mineraloljedirektivet, är också potentiella hinder av icke teknisk karaktär som kan vara problematiska i sammanhanget. Sannolikt är denna typ av hinder minst lika svåra att undanröja som att finna lösningar till de tekniska problem som alltjämt kvarstår att komma tillrätta med.

PA 3-3.3
AB 3.4-3.5.2
PA 3.5.3

3 METODIK

Syftet med studien har varit att generera ett underlag som kan användas för att göra en grov rangordning av alla alternativa drivmedel baserat på systemeffektiviteten för hela systemet. Med detta begrepp avses verkningsgraden i hela bränslecykel från produktion av råvaran för drivmedlet till slutanvändningen i fordonet (produktion, skrotning etc. av fordonet har utelämnats).

Strategin har varit att så långt det är möjligt använda resultat från tidigare studier och tidigare insamlat underlag. Exempel på sådant material är livscykelanalyser, introduktionsstrategier, studier av fordonsteknik m.m. Ecotrafic har också själva utfört en del studier inom området. En del nytt material har det också varit nödvändigt att införskaffa. Genom litteratursökningar har denna litteratur kunnat hittas och beställningar hos respektive publicerande organisationer har sedan gjorts.

När det gäller verkningsgraden hos olika drivsystem är problematiken att data i litteraturen ofta har olika förutsättningar och därigenom är det svårt att göra korrekta jämförelser. De stora variationsmöjligheterna för tekniken innebär också svårigheter att jämföra data från olika studier. Istället för att försöka sammanställa alla dessa uppgifter har som ett bättre alternativ simuleringar i ett fordonssimuleringsprogram kallat Advisor® från det amerikanska nationella laboratoriet NREL utförts. Underlag för simuleringarna har dels hämtats från det programmet och dels från litteraturen.

3.1 Tidshorisont

Valet av tidsperiod är en mycket viktig fråga för en studie av denna typ. Först och främst måste tekniken för produktion, distribution, användning m.m. vara fullt utvecklad för de alternativa drivmedlen. Utan denna inriktning blir jämförelsen inte relevant. Otvetydigt leder detta till att jämförelsen måste göras för framtida system. Visserligen kan ett antal delsystem jämföras även för dagens system, t.ex. emissioner från fordonen, men för att hela jämförelsen skall bli riktigt relevant måste det framtida perspektivet beaktas. Tidshorisonten 2010 – 2015 har valts av två huvudskäl. Dels är inte tidshorisonten för långt borta för att man skall kunna extrapolera känd teknik och förutsätta kommersialisering av teknik som nu ligger på forskningsstadiet och dels måste man ha en tillräckligt lång tidshorisont för att systemen skall vara jämförbara. Detta gäller t.ex. för produktionstekniken för flera biodrivmedel som i dag ännu inte är fullt utvecklad. Ett exempel på detta är den tidigare citerade LoF rapporten [1] där ju faktiskt produktionsprocesserna för en del drivmedel faktiskt borde klassificeras som teknik som då inte var fullt utvecklad. I föreliggande studie har vi naturligtvis tagit hänsyn till att produktionsprocesserna utvecklats vidare och det som nu förutsätts är processer som kommer att kunna vara kommersiella om några år.

För personbilar finns emissionskrav som i Europa i dag sträcker sig till 2005/2006 (Euro IV). Kraven i USA och Kalifornien är mer långtgående än så. Det är troligt att emissionskraven kommer att ytterligare skärpas väsentligt i framtiden i Europa för alla typer av drivmedel. Därigenom kommer eventuella skillnader i emissioner att få en mindre betydelse än de har i dag. Detta gäller naturligtvis under förutsättningen att emissionskraven går att klara rent tekniskt för alla alternativen och att detta kan göras till en rimlig kostnad. Vi har inte kunnat finna att detta skulle vara direkt omöjligt för någon kombination av drivmedel och drivsystem.

3.2 Litteratursökning

Ecotrafic har sedan tidigare införskaffat SAE:s databas Global Mobility Database (GMD) som är användbar i detta sammanhang. Databaser innehåller sammanfattningar och biografier för mer än 105 000 artiklar som publicerats av SAE, dess systerorganisationer världen över samt SAE:s övriga samarbetspartners. En sammanställning av de olika källorna till databasen finns i bilaga 1. GMD databasen finns i två varianter; en på CD-ROM och en med tillgång via Internet. Ecotrafic använder den senare varianten eftersom den har en avgörande fördel i och med att den uppdateras en gång i månaden till skillnad från en gång om året för den förra varianten. Eftersom SAE är en organisation för tekniker som sysslar med fordon eller farkoster av olika slag domineras av förklarliga skäl databasen av litteratur inom dessa områden. Dock finns även en hel del litteratur om produktion av drivmedel och livscykelanalyser. Dessa områden synes har erhållit ett ökat intresse under de senaste åren.

Andra källor måste också användas eftersom ämnesområdet är något bredare än databasens omfattning och denna sökning har bl.a. skett hos organisationer som man sedan tidigare vet är aktiva inom området eller hos organisationer som publicerar denna typ av material. De flesta av dessa sökningar har gjorts via Internet. Dessutom har förstås också Ecotrafics eget bibliotek av litteratur använts. Speciellt värdefull har litteratur varit som insamlats för tidigare projekt med anknytning till de områden som föreliggande studie behandlar.

3.3 Utvärdering av litteratur

Någon regelrätt sammanställning av den litteratur som hittats och analyserats har inte gjorts eftersom detta inte kunnat rymmas inom ramarna för projektet. Istället har de viktigaste studierna som använts som underlag för beräkningarna citerats. Egna bedömningar och överväganden har använts där underlaget varit bristfälligt eller saknats.

3.4 Livscykelperspektivet

Produktionsprocesserna för vissa alternativa drivmedel och i synnerhet biodrivmedel är fortfarande underutvecklade. I vissa extremfall visar det sig t.o.m. att ett biodrivmedel kan leda till *ökade* utsläpp av klimatgaser. Sådana satsningar, som ofta skett av agropolitiska skäl, har lett till att biodrivmedel har fått ett oförtjänt dåligt rykte. Sannolikt hade satsningar av detta slag inte hade gjorts ifall tillräcklig kunskap funnits innan besluten togs. Det är därför av stor vikt att förbättra processerna i detta avseende.

3.4.1 Produktion av råvara

Råolja och naturgas har bildats från döda växter och djur. Användningen av energi för att utnyttja denna resurs inskränker sig således till prospektering och utvinning. Därtill är framförallt råolja tämligen enkelt att transportera då den är flytande (i alla fall vid uppvärmning) och därför kan transporteras som en bulkvara. Detta är också en förutsättning för den omfattande världshandel som sker med dessa råvaror.

Förhållandena är naturligtvis helt annorlunda när det gäller produktion av bioråvara. Den högsta effektiviteten i produktionen nås för extensivodling medan intensivodling per definition är sämre i detta avseende. Som extensivodling kan bl.a. skogsråvara och energiskog

nämnas. Tyvärr är dock dessa råvaror svårare att omvandla till ett drivmedel för fordon än t.ex. råvara från oljeväxter (RME) eller socker och stärkelsehaltiga växter (etanol). Transporten av bioråvara till en anläggning för produktion av drivmedel är av naturliga skäl också besvärligare och dyrare än exemplet med råolja. Det som dock kan vara en viss fördel är om produktionsanläggningarna kan placeras så att dessa transporter minskas i förhållande till råoljealternativet.

3.4.2 Produktionsprocesser

Råolja har under årmiljonerna omvandlats i berggrunden till en sammansättning som kan omvandlas (raffineras) till drivmedel (och andra produkter) på ett mycket energieffektivt sätt. Exempelvis kan bensen produceras (inklusive utvinning av råolja) med en effektivitet på över 80% och för dieselolja ligger motsvarande siffra nära 90%.

En orsak till den förhållandevis dåliga effektiviteten för alternativa drivmedel är att systemverkningsgraden i produktionsprocessen som regel är lägre för dessa drivmedel än för de konventionella fossila drivmedlen. Orsaken till detta förhållande är att förädlingen av bioråvaran är mer energikrävande än raffinering av råolja, samtidigt som energianvändningen i produktionen av råvaran tillkommer. Råoljan kan i detta sammanhang ses som ett halvfabrikat där de processer som skett under årmiljonerna förändrat sammansättningen på ett för raffineringen fördelaktigt sätt. I många av produktionsprocesserna för biodrivmedel används dessutom en stor andel fossila bränslen. Dessa kan i många fall ersättas med biobränslen men det grundläggande problemet i alla fall är ofta att effektiviteten är låg vid produktion av råvara och i produktionsprocessen för de alternativa drivmedlen. Enkelt uttryckt leder en låg verkningsgrad i produktionen till att mindre mängd drivmedel produceras och det leder i sin tur till att en mindre mängd fossilt drivmedel kan ersättas. Det är med andra ord lika viktigt att erhålla hög systemverkningsgrad för alternativa drivmedel som för konventionella drivmedel. Undantag finns dock och ett sådant är rapsmetylester, RME (och liknande fettsyreprodukter), där produktionen av bränslet i princip inskränker sig till en omförestring av rapsoljan. Nackdelen med RME är dock att effektiviteten vid produktionen av råvaran är låg genom intensivodlingen och därtill är avkastningen per hektar låg.

Nya produktionsprocesser för biodrivmedel håller emellertid på att utvecklas och särskilt lovande bränslen är etanol och metanol som kan produceras från cellulosaråvara. Tillgången på denna råvara är också stor. Problemet är att produktionsprocesserna ännu inte är fullt utvecklade, dvs. utbytet är för lågt och kostnaderna är för höga.

Det är viktigt att nämna att de produktionsanläggningar som studerats inte varit integrerade med några andra anläggningar utan istället varit fristående (eng.: "greenfield"). Detta innebär t.ex. att ingen spillvärme från anläggningarna tas tillvara i form av fjärrvärme. Om hänsyn togs till ev. användning av denna energi skulle systemverkningsgraden för en del drivmedel (speciellt biodrivmedel) öka något. En studie av detta slag är emellertid omfattande eftersom man då också måste ta hänsyn till lokala förutsättningar och avsättningen för spillvärme eller annan energi.

3.4.3 Distribution och tankning

Bränsledistributionen är ett speciellt kapitel av stor betydelse, främst på grund av de stora kostnader som är förknippade med uppbyggnaden av sådana system. En stor fördel finns således för de alternativa drivmedel som kan distribueras via det befintliga distributionsnätet utan eller med små förändringar av det.

Flytande drivmedel är av naturliga skäl enklast och billigast att distribuera. Syntetiska drivmedel (bensin och dieselolja) kan i princip distribueras i det vanliga distributionsnätet, antingen som inblandningskomponenter eller som en helt separat bränslekvalitet. För etanol och metanol måste vissa åtgärder göras i distributionsledet (t.ex. för att förhindra korrosion) för att dessa drivmedel skall kunna distribueras men ändringarna är ändå förhållandevis små och erfarenheter finns sedan tidigare som kan utnyttjas.

Gasformiga drivmedel och kryogena flytande drivmedel torde medföra de största problemen och medföra de högsta kostnaderna vid distribution. Detta gäller i synnerhet i Norden med dess låga befolkningstäthet. Av intresse i detta fall är förutsättningarna för ett stort genomslag, dvs. hur stor del av energianvändningen i personbilar (och ev. också tunga fordon) som kan ersättas med det alternativa drivmedlet. Speciell hänsyn måste naturligtvis tas till vår låga befolkningstäthet i förhållande till länder på kontinenten och exempelvis USA. Ett scenario där man skulle bygga ett naturgasnät som täcker mer än 90% av befolkningen i Sverige (vilket förekommer i andra länder som t.ex. USA) ter sig orealistiskt med tanke på den låga befolkningstätheten i vårt land. I fallet med metan måste frågan om distribution av i form av LNG (båt, tåg, lastbil) istället beaktas.

Följande olika ”tröskelvärden” för olika penetration av drivmedel i ett fullt utbyggt scenario kan vara av intresse att förutsätta vid beräkningarna av systemeffektiviteten:

- >1% men <10% av marknaden (nischbränsle)
- >10% av marknaden (huvudbränsle, dvs. ett bränsle för allmän användning)

Man skulle även kunna tänka sig att undersöka drivmedel/drivsystem med en potential mindre än 1% men vi har valt att inte inkludera sådana alternativ då en sådan låg penetration är av mindre intresse ut klimatgassynpunkt (per definition <1% inverkan).

3.4.4 Slutanvändning

För att nå en hög systemverkningsgrad är det viktigt att samspelet mellan drivmedlet och drivsystemet (energiomvandlare² + energiöverföring³ + ev. energilager⁴) i fordonet beaktas. Det finns utan tvekan exempel på att man kan åstadkomma en energiomvandlare med högre medelverkningsgrad än dagens bensindriven ottomotor (referensfallet), t.ex. en bränslecell, men man måste också beakta att effektiviteten i andra led kan vara lägre för ett sådant system. För att kunna driva en bränslecell med bensin måste bensinen *reformuleras*. Vidare måste bensinen *reformer*as i fordonet för att generera den vätgas som bränslecellen kräver. Detta innebär också ökade förluster i jämförelse med en kolvmotor. Det elektriska drivsystemet har likaså en lägre verkningsgrad än en mekanisk kraftöverföring för en konventionell förbränningsmotor. Å andra sidan ger ett elektriskt drivsystem möjligheter till regenerativ bromsning under förutsättning att tillräcklig batterikapacitet finns (effektthet). Detta kan emellertid också åstadkommas med ett hybridssystem för en konventionell förbränningsmotor. Således bör en bränslecell helst jämföras med en förbränningsmotor-hybrid. Vid en sådan jämförelse blir inte verkningsgradsvinsten för en bil med bränsleceller så hög som man skulle kunna tro vid första anblicken.

² Med energiomvandlare avses här en anordning för omvandling av den kemiska (eller elektriska) energin till mekanisk energi. En kolvmotor och en bränslecell är två exempel på energiomvandlare.

³ Med energiöverföring avses här t.ex. en mekanisk växellåda och slutväxel eller t.ex. ett elektriskt drivsystem.

⁴ Med energilager avses t.ex. ett kemiskt batteri. Andra varianter som tryckackumulator och svänghjul kan också vara tänkbara.

Det är överhuvudtaget viktigt att jämföra de alternativa drivsystemen med utvecklade konventionella system för att jämförelsen skall bli så relevant som möjligt. Därför är det enda förnuftiga tidsperspektivet minst 10 år framåt. Under denna period kommer de konventionella drivsystemen också att vidareutvecklas och detta måste man ta hänsyn till. Ett viktigt delmoment i denna process är att anpassa och optimera drivsystemen för alternativa drivmedel. Genom denna utveckling kan så småningom den fulla potentialen för de alternativa drivmedlen utnyttjas.

3.5 System att studera

3.5.1 Systemdefinition

System för energiförsörjning, här med tonvikt på drivmedel, skall omfatta hela kedjan från råvara till och med slutanvändning ur energisynvinkel och växthuseffekt genom fossil CO₂. För att rätt kunna bedöma och rättvisande jämföra olika alternativ är det nödvändigt att se till energibärarnas ursprung. Systemen skall egentligen också kunna producera lika mängd nyttigheter av olika slag för att helt rättvisande kunna jämföras.

Vår nuvarande drivmedelsförsörjning är baserad på ett i jordskorpan lagrat och utvunnet fossilt halvfabrikat, huvudsakligen råolja, som har sitt ursprung i biomassor för tiotals eller hundratals miljoner år och sedan omvandlats (fossilerats) under förhållanden som inte längre råder på jorden. System, som skall vara uthålliga, måste baseras på förnybara råvaror och inte ha större omfattning än vad naturen (med hjälp av människan) kan åstadkomma (den potentialen är dock ännu långtifrån utnyttjad). Det ligger då i sakens natur att varken energiverkningsgrader eller växthuseffekt-påverkan kan jämföras utan hänsyn till råvarornas tillkomsthistoria. Den längre processkedjan för unga biomassor leder naturligt och oundvikligt till skillnader, som inte får uppfattas som negativa.

Energiverkningsgrader eller –utbyten är alltid angivna med vattenfri råvaras/produkts lägre energivärde som bas (LHV), då detta varit kutym i Sverige även om angivelse på högre värmevärde (HHV) egentligen är riktigare och ger fullständigare redovisning. Det är viktigt att vara klar på denna punkt för att inte ge vilseledande resultat. Utbytestalen blir högre på HHV-bas om produkten är väterikare än råvaran (eller innehåller bundet syre såsom i alkoholer) och lägre om den är vätefattigare.

I studien har i de olika delarna av kedjan fossila drivmedel och processbränslen använts även om det vore möjligt och rimligt använda förnybara sådana för att beskriva alternativens potential fastän detta i många fall inte sker i dag. Det inom kedjan använda drivmedlet minskar då mängden avsaluprodukt men kedjan framstår som bättre vad gäller påverkan av växthuseffekten.

Baserat på resonemanget i avsnittet ovan kan man välja ut olika system att specialstudera. Två principiellt olika indelningar av systemen kan göras för att öka överskådligheten. De två indelningarna är följande:

1. En indelning baserat på råvara. Råvaran kan vara av fossilt ursprung (fossilgas) eller biomassa.
2. En indelning utifrån ifall bränslet är gasformigt eller flytande. Detta påverkar i hög utsträckning förutsättningar och kostnader för distribution, tankning och tankkapacitet i fordonen.

I projektupplägget har den senare varianten valts eftersom den är mer överskådlig och automatiskt ger en viss fokusering på problematiken i distribution och tankning, två av de viktigaste faktorerna när det gäller möjligheterna att nå en bred användning av alternativa drivmedel. Vid redovisning av resultaten är det dock ibland intressant att separat redovisa effektiviteten för fossila- respektive icke fossila råvaror och därför har även detta redovisningssätt använts.

3.5.2 Indelning av produktionsprocesser

Bränsleproduktionen kan indelas i två huvudtyper. Den första är termokemisk och den andra är biokemisk. En termokemisk omvandling innebär att biomassan (efter torkning) först förgasas och efter diverse behandling (rening, skift m.m.) syntetiseras sedan drivmedlet från denna syntesgas. Syntesgasen kan också användas för elproduktion. Även andra möjligheter att producera el från biomassa finns, t.ex. ångcykel (låg verkningsgrad), träpulvereldad gasturbin, eller system med värmepump. De två sistnämnda systemen behäftas emellertid stora tekniska svårigheter som ännu inte är lösta, varför de inte beaktas här. Den el som produceras kan i detta fall inte anses som något annat än en distributionsform för vätgas (elektrolys vid tankstället). Elbilar kan per definition klassas som en nisch med en potential under 1% av den totala energianvändningen i transportsektorn och de beaktas därför inte här.

Den biokemiska omvandlingen är egentligen två helt skilda principer. Dels kan det vara fråga om försockring (av cellulosaråvara) och jäsning (etanol), dels anaerob rötning (biogas). Den förstnämnda processen måste vidareutvecklas för att nå högre verkningsgrad och acceptabla kostnader. I det senare fallet är processen kommersiell men kan vara föremål för viss vidareutveckling.

Följande olika typer av bränsle kan vara av intresse i slutanvändningen (ej i prioritetsordning utan i densitetsordning)

- Syntetiska kolvätebränslen (i forts. ofta förkortat till "syntetiskt bränsle" eller "syntetiskt drivmedel"): dieselolja och/eller "bränslecellsbränsle" (dvs. speciell kvalitet anpassad för bränsleceller)
- Etanol
- Metanol
- DME
- Metan
- Vätgas

Jämfört med det förslag som diskuterades ursprungligen med Vägverket har syntetiska drivmedel och DME lagts till i det slutgiltiga projektförslaget. Detta innebär inte att dessa drivmedel skulle prioriteras speciellt högt utan snarare att de måste finnas med i en inledande diskussion. Intresset för DME har t.ex. tidvis varit högt (bl.a. från Volvo Lastvagnar) och ett ökande intresse kan också skönjas för syntetiska kolvätedrivmedel, främst i USA.

El redovisas inte separat som ett bränsle eftersom potentialen för elbilar visat sig vara liten. Något genombrott för batteritekniken som skulle möjliggöra en bred användning kan inte skönjas inom överskådlig framtid. Möjligen skulle "tankning" av el i hybridbilar kunna ha

en stor potential (eftersom de flesta resor är korta) men detta kräver också en relativt stor batterikapacitet hos dessa fordon. Detta förutsätter i princip att hybridfordonen skulle vara av seriehybridtyp men mycket tyder istället på att industrin kommer att prioritera parallellhybrider där man av kostnadsskäl kommer att försöka minimera batterikapaciteten. Bränslecellfordon är en applikation som *kanske* kräver större batterikapacitet än parallellhybrider och därmed vore potentialen för extern eltillförsel större i denna applikation. För att i viss mån reducera antalet varianter har dock detta alternativ försumrats. Den mest intressanta möjligheten att använda el är att producera vätgas genom elektrolys vid tankningsstället. Detta är en förhållandevis enkel och känd process och kan åtminstone i ett inledningsskede vara av intresse för att undvika problemen med vätgasdistribution. Någon användning av el (i fordon eller för vätgasframställning) som enbart genererats under nattetid har inte undersökts.

3.5.3 Indelning av drivsystem

De typer av drivsystem som är av intresse att studera är dels hybrider med konventionella kolvmotorer, dels bränsleceller. Kolvmotorerna kan indelas i otto- och dieselmotorer men även varianter som sträng taget är hybrider mellan dessa två (dvs. ett mellanting mellan otto och diesel) kan vara möjliga att utveckla för vissa drivmedel.

Bränslecellerna kan också indelas i två olika undergrupper; ett hybridsystem och ett system för direktdrift. I det senare fallet behövs inget batteri som är dimensionerat för hög effekttäthet men å andra sidan måste bränslecellpaketet vara större och det måste dessutom kunna följa körcykelns dynamik. Det enda bränsle som för närvarande kan uppfylla kraven på dynamik är vätgas. Bränsleceller för direktreforming av metanol (DMFC) diskuteras i USA men det är tveksamt om man kan nå tillräcklig dynamik för att kunna undvika ett stort batteri. Därför har det direktdrivna alternativet av detta system inte undersökts. En variant av det direktdrivna bränslecellsystemet som kan vara skäl att diskutera är ett system med mindre batterikapacitet än den ovan beskrivna. Dels kan det visa sig vara nödvändigt med en viss batterikapacitet för uppstart av systemet och för att ge acceptabel prestanda vid kallstart och dels ger det möjlighet till återmatning av bromsenergi. Den batterikapacitet som avses här är av samma storleksordning som för parallellhybrider med kolvmotorer, alltså en batterivikt på i storleksordningen 50 kg (jfr. med 10 – 20 kg för vanliga 12-V batterier). Kostnadsaspekterna för drivsystemet är också viktiga i detta sammanhang och mycket talar för att man inte kan tillåta för stor batterikapacitet av detta skäl.

3.5.4 Valda system

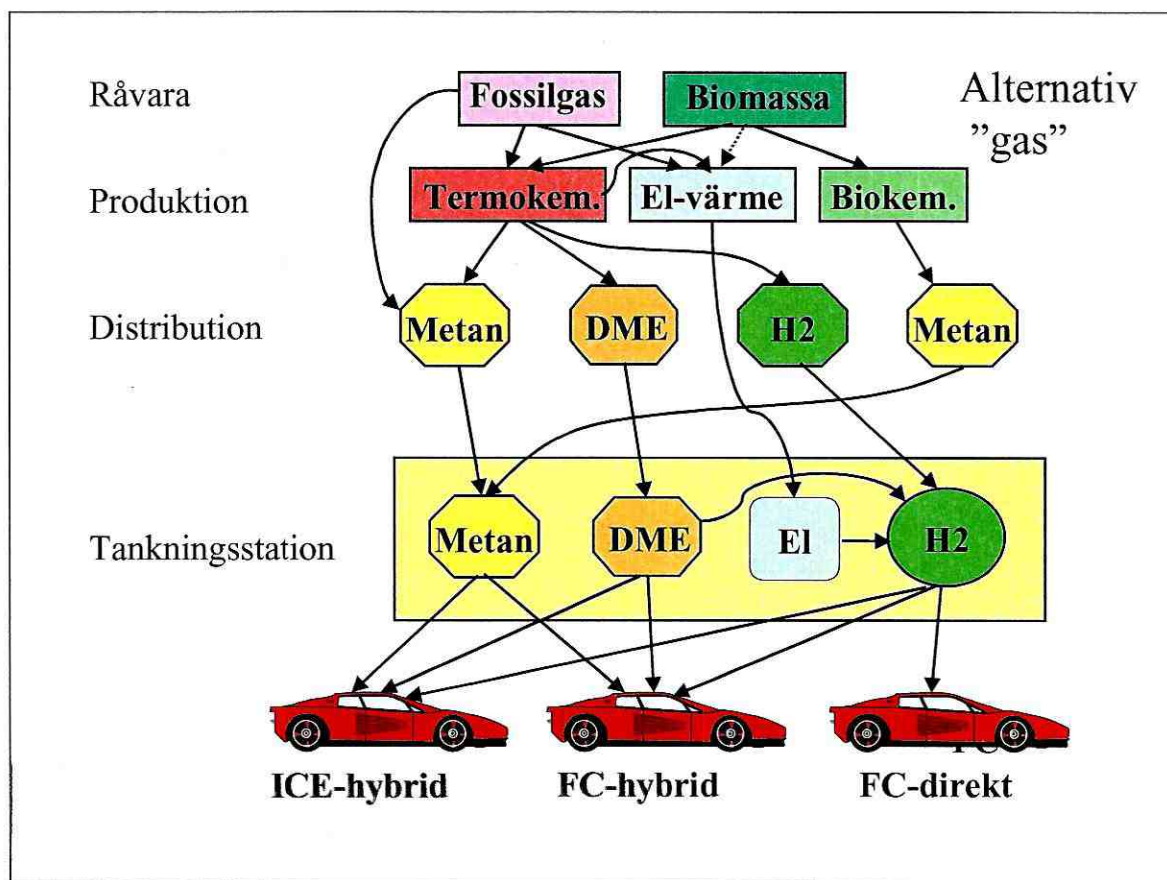
För att erbjuda en bättre översikt över de olika systemen har en par grafiska illustrationer gjorts som beskriver dessa gjorts nedan efter en ursprunglig idé av Olle Hådem från Vägverket. I diskussioner har den ursprungliga idén utvecklats vidare. Det bör påpekas att syftet med figurerna inte varit att visa en heltäckande bild av energisystemet utan istället har syftet varit att visa enkla översiktsskildringar som förenklar framställningen av ämnet.

Möjliga system för gasformiga resp. vätskeformiga drivmedel framgår av figur 1 och 2. Kriterier för val mellan möjligheterna bör vara att systemet skall ha utsikt att utvecklas för bred allmän användning och vara användarvänligt, d.v.s. kunna vara tillgängligt i ett finmaskigt nät, innefattande även avlägsna orter, och på säkert sätt kunna användas av vanliga människor (en ofta bortglömd aspekt i diskussion av ny teknik). Andra kriterier kan vara att drivmedlet bör användas och handlas internationellt, att det skall kunna användas i alla drivsystem och kunna framställas från alla råvaror och att det kan bedömas som ekono-

miskt rimligt. Mot denna bakgrund undersöks energieffektivitet och påverkan på växthuseffekt genom fossil CO₂.

Gasformiga drivmedel

En grafisk illustration av det "gasformiga" systemet visas i **Figur 1**. Som synes i figuren produceras 4 olika gasformiga drivmedel; naturgas (metan), DME (som i och för sig kan förvätskas), vätgas och biogas (metan). Vi har valt att "klassa" DME som ett gasformigt drivmedel trots att det transporteras i förvätskad form på grund av det inte kan hanteras som en normal vätska, vilket innebär en komplikation i distributions- och tankningsledet av nära nog samma storleksordning som för motorgas (LPG). El ses bara som en distributionsform för vätgas.



Figur 1. Alternativ "gas"

En samdistribution av metan från naturgas och av bioursprung förefaller vara en naturlig rationalisering i de fall där det är möjligt. Möjligheterna till distribution av metan i kryogen form (LNG) är ett alternativ som inte kan uteslutas och som potentiellt skulle kunna innebära att en storskalig introduktion och allmän användning av detta gasformiga bränsle blir möjlig. Vi har dock inte indikerat detta på något sätt i figuren.

Vätgas kan produceras från DME genom en reformering vid tankstationen på liknande sätt som metanol och detta skulle kunna vara ett sätt att förenkla distributionen av vätgas. Samtidigt förutsätter det naturligtvis att DME kommer att bli ett intressant bränsle för bränsleceller (reformering i fordonet) och under en övergångsperiod även för kolvmotorer. En framställning av DME enbart för att underlätta distributionen av vätgas ter sig inte sär-

skilt trolig. Metanol torde vara lämpligare för detta syfte eftersom detta är ett flytande bränsle, vilket underlättar distributionen i jämförelse med DME. Det kan också vara värt att notera att DME inte är lämpligt som bränsle för ottomotorer, vilket medför att detta alternativ inte finns med för denna motortyp.

Vätgas kan produceras från el genom elektrolys vid tankningsstället och detta är ett system som är intressant att studera som alternativ till att producera vätgas direkt (termokemiskt) eller att gå vägen över metanol eller DME. I de båda senare fallen skulle vätgasen framställas genom reformering vid tankstället. Elproduktionen antas ske i ett kraftverk med en kombination av en gasturbin och en ångturbin (kombicycle) alternativt en avancerad så kallad HAT cykel (Humid Air Turbine). Bränslet är antingen fossil naturgas eller förgasad biomassa (termokemiska metoden). Direkt produktion av vätgas i anslutning till kraftverket genom elektrolys är knappast intressant eftersom vätgas kan produceras billigare och med högre verkningsgrad direkt i den termokemiska processen. Lokal framställning vid station (elektrolys, metanol- eller metanreformering) är en tänkbar möjlighet. Det är emellertid något helt annat än tankning från pump och kräver utbildad personal.

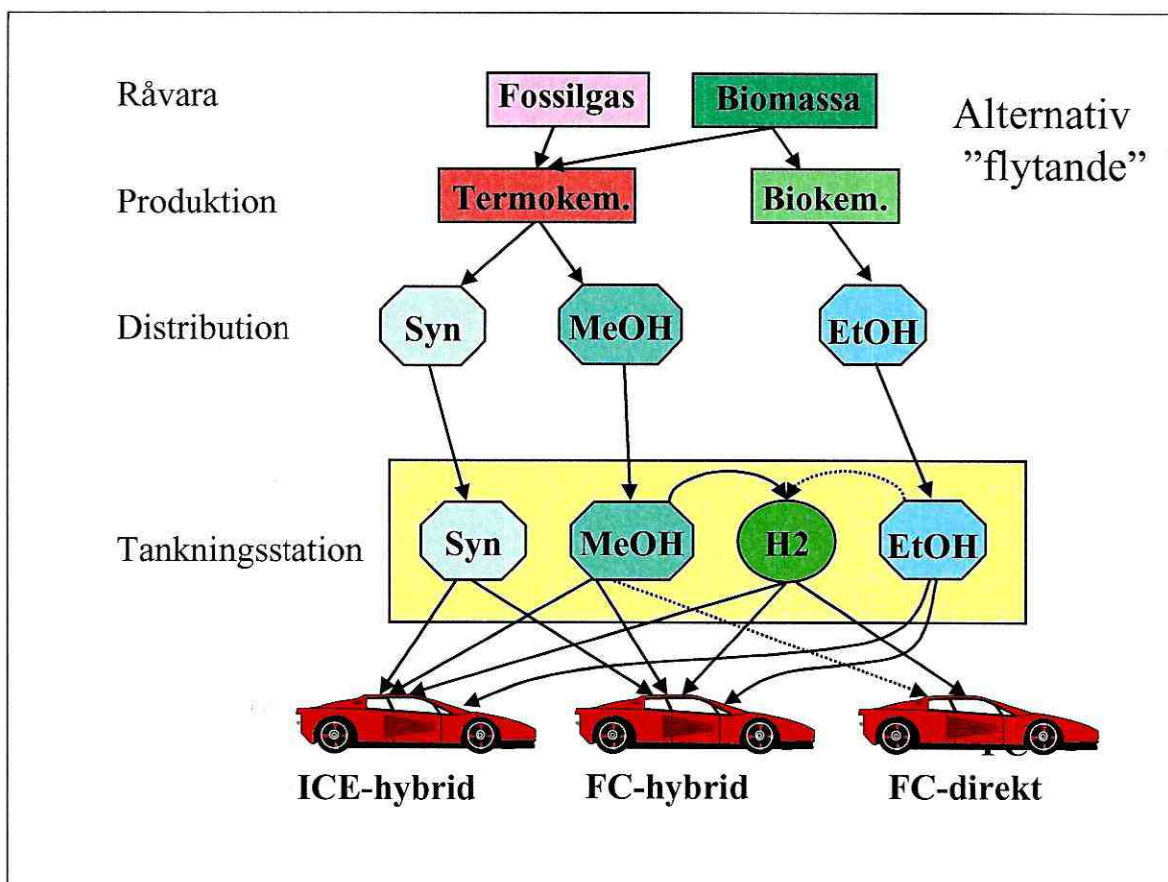
Distribution av gasformiga drivmedel, vätgas och metan, för drivmedelsanvändning i rörledning förutsätter att rörnät redan finns för andra ändamål då enbart transportsektorn inte kan bära kostnaden. Rördistribution till områden med låg förbrukning blir av samma anledning orimlig. System med helt gasformiga drivmedel blir därför nisch tillämpningar. Distribution bör ske med flytande drivmedel även om slutanvändning sker som gas. Kryogen metan (LNG) eller vätgas (LH₂) för distribution med tankbåt och tankfordon kan vara generellt användbara system och kan kombineras med slutanvändning både som vätska (LNG; LH₂) för tunga fordon (yrkesmässig hantering!) och i förångad och komprimerad form (CNG, GH₂) för lätta fordon (allmänhetens hantering). DME är liksom LPG också exempel på detta distributionssätt men enklare och mindre riskabelt då det kan ske icke-kryogent om än i system under (måttligt) tryck. Kryogena vätskor måste förutsättas bli producerade i stora, centrala anläggningar, t.ex. sådana baserade på "remote" NG (RNG). Tankning av kryogena vätskor av allmänheten måste anses tveksam ur säkerhetssynvinkel liksom lagring av sådana vätskor ombord på lätta fordon. Vi räknar inte med sådana system. Tidsfaktorn vid tankning är viktig att beakta. Gaser tar längre tid att tanka och detta gäller sannolikt också kryogena vätskor.

Flytande drivmedel

En grafisk illustration av systemet för flytande drivmedel visas i **Figur 2**.

På termokemisk väg kan antingen syntetiskt flytande drivmedel (kolvätebränsle) eller metanol tillverkas (**Figur 2**). Det sistnämnda bränslet ger en process som är effektivare och billigare men en marginellt dyrare distribution. Metanol är också ett lämpligare bränsle för bränsleceller eftersom det kan reformeras enklare. Högre energitäthet och en förenklad distribution (i form av en inblandningskomponent) är dock en fördel för de syntetiska drivmedlen som inte kan förringas. Ifall det syntetiska drivmedlet skall användas till bränsleceller måste det dock distribueras separat från övriga konventionella drivmedel som bensin och dieselolja. Det blir helt enkelt en ny bränslekvalitet. Reformeringen av bränslet kräver nämligen egenskaper hos bränslet (svavel, aromater m.m.) som nuvarande bensin- och dieselkvaliteter inte uppfyller. Å andra sidan finns en del förenklingar av produktionen jämfört med bensin möjlig ifall bränslet enbart skall användas i bränsleceller. För att anpassa bränslet för bränsleceller vill man ju ha så hög halt av väte som möjligt och i ett sådant perspektiv är reformeringen i raffinaderiet där man minskar innehållet av väte helt

fel. Denna process ökar oktantalet genom att öka andelen aromater, vilket innebär att samma bensinkvalitet inte är lämplig för bränsleceller och ottomotorer. Möjligen finns större förutsättningar att utveckla ett bränsle som är gemensamt för dieselmotorer och bränsleceller med hänsyn taget till att avvikelserna från de optimala egenskaperna för de båda tillämpningarna inte behöver bli alltför stora men detta är inte fullt utrett ännu. Klart är i alla fall att ett syntetiskt dieselbränsle som framställts på termokemisk väg fungerar väl i dieselmotorer och detta bränsle kan också (med utvecklad reformer) användas till bränsleceller.



Figur 2. Alternativ "flytande"

Reformering av metanol till vätgas vid tankningsstationen är, som nämnts ovan, en möjlighet som kan vara lämplig för att lösa distributionsproblemet för vätgas under en introduktionsfas. Frågan om vätgaslagring i fordonet måste i alla fall beaktas och sannolikt är en kortare räckvidd är något man måste acceptera i detta fall. För speciella fordonsflottor och för tunga fordon i synnerhet kan dock detta vara en lösning som åtminstone initialt är av intresse. Reformering av metanol ombord på fordonet kan ge en räckvidd motsvarande konventionella drivmedel och detta är en mer intressant lösning på lång sikt ifall vätgaslagringen inte kan lösas på ett tillfredsställande sätt. Reformering av etanol för att generera vätgas har inte förutsatts som ett alternativ då det är mer komplicerat och ger större förluster än om metanol används.

System (fram till fordonet) att närmare studera är:

Gasdrivmedel:

Fossilgas ("metan") importerad och distribuerad i rör (nisch) eller som LNG med tankfartyg (allmän användning). Kan kompletteras biogas (CBG) från rötning och med SNG (termokemiskt från biomassa). Tankas som komprimerad gas (CNG) eller LNG (tunga fordon).

Fossilgas termokemiskt konverterad till DME eller vätgas (GH_2 i nisch, LH_2 för allmän användning). Kan kompletteras eller ersättas med biomassa baserade. Tankas som vätska (DME) eller gas (väte/ allmän användning) eller vätska (yrkesmässig användning).

Vätskedrivmedel:

Fossilgas konverterad till metanol eller kolväten enl. Fischer-Tropsch eller Mobil.

Biomassa termokemiskt konverterad till samma eller biokemiskt till etanol.

Biomassa biokemiskt konverterad till etanol.

Ecotraffics sammanfattning

Det är viktigt att konstatera att en "rättvisande" jämförelse inte kan göras med dagens tekniknivå eftersom produktionen för flera drivmedel ännu inte är fullt utvecklad. Därför måste tidshorisonten vara längre, dock inte så lång att man hamnar i rena spekulationer. Därför är en lämplig tidshorisont för denna typ av studie ca 10 – 15 år.

En indelning av bränslen i sådana som bara är nischbränslen och sådana som kan komma till allmän användning, dvs. huvudbränslen är nödvändig eftersom potentialen för reduktion av emissioner och klimatgaser är begränsad för nischdrivmedel. Tillgång på råvara och kostnader för distribution och användning är begränsande faktorer. Gasformiga drivmedel är per definition nischbränslen av dessa anledningar.

Lämpliga indelningar av drivmedel är dels ursprung för råvaran (fossil eller icke fossil), dels distributionsformen (gasformiga eller flytande drivmedel).

AB 4 - 4.5.2
 PA 4.6 - 4.7.2
 AB 4.7.3 →

4 RESULTAT

Det kan vara viktigt att poängtera att indelningen i produktionskedjorna är densamma som i den tidigare studien "Life of Fuels" av Ecotrafic. Den intresserade läsaren hänvisas till denna publikation för en mer ingående beskrivning av förutsättningar och resultat. Även om strukturen är densamma i båda fallen har en hel del ändringar av indata gjorts i den föreliggande studien jämfört med den nämnda rapporten för att ta hänsyn till de framsteg som gjorts när det gäller effektivisering av produktionsprocesserna. Likaså finns skillnader när det gäller fordonen eftersom vi här förutsatt att det är fråga om framtida fordon (2012).

4.1 Produktion av råvara

I studien behandlas enbart naturgas som fossil råvara för drivmedel, biomassa av lignocellulosa-typ (ved) och från lucern som förnybar råvara.

4.1.1 Naturgas

Naturgas har sitt ursprung i biomassor för tiotals eller hundratals miljoner år sedan, som omvandlats (fossiliserats) i jordskorpan under förhållanden som inte längre råder på jorden. Utvinning sker från fyndigheter i jordskorpan genom borrhning på land eller "off-shore" till havs. Rågasen innehåller förutom huvudbeståndsdelen metan vanligen varierande mängder högre kolväten och ibland kväve, koldioxid och svavelföreningar. Rågasen benämnes ofta "vätgas". En hel del naturgas utvinns i samband med oljeutvinning, s.k. associerad gas, som ibland facklas om ingen marknad finns.

För att få en i rör transporterbar gas (torrgas) måste den i terminal befrias från korrosiva och till flytande form kondenserbara föreningar. Utvinning av lätta oljor, LPG (propan, butan) och etan görs även av ekonomiska skäl. Utvinning och upparbetning kräver energi och visst läckage kan inte helt undvikas. Förhållandena varierar mellan olika fyndigheter beroende tryckförhållande och våtgasens sammansättning. I denna studie räknar vi med att energianvändningen för utvinning (inkl. viss fackling) och transport till terminal typiskt uppgår till 3% av den färdiga gasens energiinnehåll och för upparbetning till torrgas åtgår 2%. I Nordsjö-området är sannolikt den förstnämnda siffran något lägre på grund av strikta regler mot fackling.

Gasen har en typisk sammansättning motsvarande den gas från Danmark som används i Sverige och har ett energiinnehåll (LHV) av 10,8 kWh per Nm³ (38,9 MJ) och ger 56 g fossil CO₂ per MJ vid förbränning. Det högre värmevärdet är 12,0 kWh per Nm³ (43,1 MJ). En typisk sammansättning för denna gas visas i **Tabell 1** (i volymsprocent).

Finns ingen rörledning för transport från terminal till marknad, vilket ofta kan vara fallet vid avlägsna fyndigheter, måste den omvandlas till flytande produkt för transport med tankfartyg. Detta kan ske genom nedkylning (<-162°C) så att gasen kondenserar till vätska (LNG, liquefied

Tabell 1. Sammansättning av Dansk naturgas

Ämne	Bet.	Volym (%)
Metan	CH ₄	91,1
Etan	C ₂ H ₆	4,7
Propan	C ₃ H ₈	1,7
Butan+	C ₄ H ₁₀	1,4
Koldioxid	CO ₂	0,5
Kväve	N ₂	0,6

natural gas) eller kemiskt genom konvertering till metanol eller kolväten (Mobil, Fischer-Tropsch). Sådana anläggningar är dyra och måste vara stora.

4.1.2 Biomassa – lignocellulosa

Trädrester från skogsbruk och skogsindustri är den stora biomassaresursen och antas ha ett typiskt värmevärde (LHV) i medeltal på 19,2 MJ/kg torrsustans (TS) vid 2% askhalt (5,33 kWh) och ger vid förbränning 90 g CO₂ per MJ, helt av förnybart ursprung. Värmevärdet HHV är 20,5 MJ/kg TS. Variationer i värmevärdet mellan olika sortiment av biomassa-TS är små och viktigaste inverkan är askhalten. Energiskog såsom Salix ges samma värmevärde på 19,2 MJ/kg TS. Elementarsammansättningen är som medeltal 49,0 %_m C, 5,8 %_m H, 43,0 %_m O, 0,2 %_m N och 0,05%_m S vid 2 %_m askhalt.

Vid den biokemiska vägen till etanol som drivmedel är halten av cellulosa och hemicellulosa avgörande. I genomsnittlig råvara ligger totala halten på ca 60% av TS. Med utvald råvara, t.ex. stamved eller sorterad biomassa för anrikning av stamvedsdelen, kan halten ökas till ca 66%. Det diskuteras (i amerikanska studier) att använda genmodifierad råvara med extra hög cellulosa-halt (80%) för att öka etanolutbytet. Detta kan dock leda till att resterna inte räcker för att täcka anläggningens energibehov vid konverteringen utan att extra råvara måste tas i anspråk för detta ändamål.

Biomassaråvaran antas ha en fukthalt på 50% vid ankomst till konverteringen.

Skogsskötsel och tillvaratagande av trädrester vid avverkning kräver energi för viss användning av fossilbaserade gödselmedel och drivmedel för skogsmaskiner. Denna energi har bedömts motsvara 3% (till 3/4 som dieselolja) av biomassans (TS) energiinnehåll. Vid mer intensiv odling av energigrödor som Salix anges gödsel- och drivmedelsbehov vara större och uppgår till 6,5% av energiinnehållet. Om konverteringen sker med 50% verkningsgrad till drivmedel betyder det att produktionen av råvaran motsvarar 6% respektive 13% av drivmedlets energiinnehåll.

Metoderna för tillvaratagande och transport av skogsråvara behöver utvecklas såsom anges av SLU/Skog och förutsättning härför är ny storskalig och stabil användning.

4.1.3 Biomassa för rötning

Råvara för biokemisk rötning till metan är i första hand slam från avloppsreningsverk kompletterad med våta avfall från jordbruk, livsmedelsindustri o.d. Dessa råvaror räcker för mindre nisch tillämpning. För större omfattning måste odlade vallgrödor, t.ex. lucern (luftkvävefixerande gröda), tas i anspråk. Odling och skörd är mindre energikrävande än t.ex. veteodling och bedöms motsvara 3% av biomassans (TS) energiinnehåll.

4.2 Transport av råvara

4.2.1 Transport av naturgas

Transporten av naturgas till anläggning för upparbetning till torrgas ingår i energianvändningen för utvinningen, då den förutses ligga i nära anslutning till denna.

4.2.2 Transport av biomassa - lignocellulosa

Biomassa från skogen är en utspridd och voluminös råvara (om ej kompakterad genom balning eller buntning vid tillvaratagandet). Transport till konverteringsanläggning måste

ske över visst avstånd, då denna bör ha betydande storlek ($>0,5$ Mt/år råvaru-TS) av ekonomiska skäl. Bränsleförbrukningen (dieselolja) bedöms konservativt motsvara 1,5% av energiinnehållet i råvarans TS, vilket tillåter transport på över 10 mils enkel medeltransportsträcka. Samma antagande görs för odlad råvara i form av energiskog även om mer koncentrerad biomassaproduktion kan vara tänkbar. (I amerikanska studier antages oftast mycket koncentrerad odling för att få låg råvarukostnad även till mycket stora anläggningar.) En kedja av 10-15 anläggningar i Sverige ger nämnda transportsträcka som rimligt antagande.

4.2.3 Transport av biomassa - lucern

För intransport av lucernråvara för biokemisk rötning till närbelägen anläggning med traktor och transporter för spridning av restprodukten (kvävegödningsmedel) bedöms bränsleförbrukningen motsvara ca 4% av biomassans (TS) energiinnehåll.

4.3 Framställning av drivmedel

Produktionsprocesserna i båda alternativen, "gas" och "flytande", är i stora delar gemensamma såsom är fallet för den termokemiska vägen baserad på primär förgasning av råvaran och upparbetning till syntesgas alternativt vätgas. Det följande syntessteget utformas sedan för de olika produkterna, metan, metanol, DME, kolväten. Förgasning och syntes sker integrerat med värmeåtervinning och kraftproduktion för att få energimässigt självförsörjande anläggning och optimering kan ske endast för hela anläggningen sammantaget. Även för rättvisande jämförelser måste självförsörjning antas som normalfall. I verkligheten kan det lokalt finnas speciella förutsättningar. Någon hänsyn till ev. användning av spillvärme från processerna har inte tagits. Översikter av produktion av drivmedel från naturgas har publicerats av bl.a. ANL [6] och (S&T)² Consultants [7].

För syntesen behövs en gas med väte/kolmonoxid-förhållande på ca 2 eftersom väterika produkter önskas. Med naturgas som råvara bereder detta inget problem eftersom den redan har högt väteinnehåll. Vätefattiga råvaror som kol och biomassa ger vid förgasning lågt väte/kolmonoxid-förhållande, som, för att få högsta möjliga utbyte av önskad produkt, måste höjas genom den s.k. skift-reaktionen, varvid en del kolmonoxid omsättes med vattenånga till väte och koldioxid, som sedan avlägsnas från syntesgasen. Dessa processer är energikrävande och leder till lägre utbyten av slutprodukt jämfört med väterik råvara. Detta är särskilt påtagligt för biomassa som är den vätefattigaste råvaran. Vid vätgasframställning drivs skift-reaktionen i två steg till enbart väte och koldioxid.

I själva syntessteget uppvisar DME och metanol de högsta teoretiska utbytena medan kolväten ger lägre utbyten. Härtill kommer att endast produkter utan kolkedja (metan, metanol, DME) kan erhållas 100%-igt till denna medan syntesen till (flytande) kolväten oundvikligen ger ett brett produktspektrum med inslag av gaser och ända upp till vaxer och därmed lägre utbyten av drivmedel och att efterbehandling behövs för att öka dessa. Även syntes av högre alkoholer (etanol, butanol) leder till lägre energiutbyten.

I de biokemiska systemen bestäms konverteringen, med hjälp av enzymer, jäst och bakterier, av halten av nedbrytbart material och av selektiviteten för mikroorganismerna. I biomassa är inte allt material tillgängligt för omvandling och i fallet etanol är det halten av hemicellulosa och cellulosa som sätter gräns. De anaerobt metanproducerande bakterierna synes mindre nogräknade vad gäller råvara.

4.3.1 Metan

Naturgasen är färdig från terminal och tankas som CNG efter distribution. Skall distribution ske som LNG sker förvätskning vid terminal. Förvätskningen till LNG är energikrävande och anges för moderna anläggningar förbruka ca 10% av producerad LNG vid el-drift av kylkompressorer och el producerad från naturgas i kombicykelsystem.

*Biogas*framställningen sker i reaktorer vid något förhöjd temperatur och elkraft behövs för drift av pumpar och omrörare. Utbytet av metan sätts till ca 70% av energiinnehållet i tillförd organisk substans, och för driften förbrukas primärenergi för el och värme motsvarande 18% räknat på produktenergin. Rening av gasen från CO₂ m.m. och kompression till 200 bar kräver för driften ytterligare 16%.

SNG, metan framställd via termokemisk förgasning till syntesgas och metansyntes är en väg att komplettera/substituera naturgas, därav den engelska benämningen SNG. Den tillämpas, ehuru, kolbaserad i USA och Sydafrika. Effektiviteten torde vara nära eller något lägre än för metanolsyntes och uppskattas vara 50% i självförsörjande, biomassabaserad anläggning. En sådan anläggning kan dessutom ge viss värmeproduktion (fjärrvärme o.d.) till en högre total verkningsgrad men någon användning av denna spillvärme har inte förutsetts i beräkningarna.

4.3.2 Metanol

Större delen av världens kapacitet för metanolproduktion, ca 35 Mt/år, är baserad på naturgas även om viss produktion sker från restoljor, stenkol och brunkol och marginellt från avfall och deponigas.

Energiverkningsgraden med den väterika naturgasen som råvara kan i nya anläggningar vara drygt 70% (en optimeringsfråga mot gaskostnaden) i självförsörjande enheter, vilket betyder att 0,42 MJ/MJ_{metanol} används för att driva anläggningen. Ett mindre överskott av elektricitet för export kan uppstå. Icke omsatt, väterik gas används för att täcka energibehoven. Kolomsättningen från råvara till produkt är över 90% varför utsläppet av fossil koldioxid är lågt i produktionsledet eller ca 8 g/MJ_{metanol}.

Med vätefattiga råvaror blir verkningsgraden lägre genom behovet att genom skiftreaktionen öka väteandelen på bekostnad av koloxidandelen och kolöverskottet avlägsnas i form av koldioxid till atmosfären. I utförda studier över biomassabaserad produktion bedöms metanolutbytet vara ca 54% i optimerad, självförsörjande anläggning baserad på förgasning med syrgas/vattenånga. Detta motsvarar ca 0,85 MJ/MJ_{metanol} för att driva anläggningen. Biprodukt är hetvatten för fjärrvärme och ev. torkade pellets. Med fjärrvärme blir totala utbytet av energibärare ca 65% (även om denna potentiella ökning av utbytet inte beaktats här då anläggningen skall vara fristående). CO₂-emissionen, helt av förnybart ursprung, är 104 g/MJ_{metanol} vid helt utbränd aska.

Metanolsyntesen kan modifieras till att i samproduktion även framställa viss del som högre alkoholer, etanol, propanol, butanoler, etc, men detta beaktas inte här då energiutbytet som drivmedel blir lägre än i den renodlade metanolsyntesen och intresset för produkten är mer specifikt (som blandkomponent) och litet.

4.3.3 DME

Framställning av DME är exakt densamma som för metanol fram till själva syntessteget, som har modifierad katalysator för direkt avvattning av bildad metanol till DME, och själ-

va avskiljningen av den gasformiga DME-produkten och recirkulation av icke omsatt metanol är annorlunda utformad. Genom gynnsammare förhållanden i syntesen blir omsättningen fullständigare och DME-utbytet något högre, ca 5%, än med metanol som produkt. Energiverkningsgraden med naturgas som råvara beräknas kunna vara 74% i självförsörjande anläggning och 57% med biomassa som råvara. Råvara om 0,35 respektive 0,75 MJ/MJ_{metanol} används således för att driva anläggningen.

4.3.4 Etanol

Här beaktas bara den biokemiska vägen från lignocellulosa (ved) till etanol även om andra vägar via termokemisk omvandling är möjliga och utvecklingsbara. Homologisering av metanol har undersökts men hittills har omsättning och selektivitet inte varit acceptabel, och vägen via DME till eten och vidare till etanol (som sker vid etanolframställning på petrokemisk bas), som borde ha möjlighet till god selektivitet, är ännu inte tillfredsställande undersökt. I båda fallen blir dock energiverkningsgraden sämre än med metanol som slutprodukt.

Etanolutbytet vid biokemisk omvandling är beroende av råvarans halt av hemicellulosa och cellulosa. Med en typisk total genomsnittshalt av ca 60%_m är det teoretiska utbytet 435 liter/ton TS eller i energitermer 48% av råvarans energiinnehåll. Med antagande att utvecklingen av enzymatisk hydrolys och jäsning av både C₅- och C₆-socker leder till att 85% av teoretiskt etanolutbyte kan nås (detta har ännu inte uppnåtts; i senaste amerikanska utvärdering av framtida teknik blev siffran 81%), så blir etanolutbytet knappt 41% eller ca 370 liter/ton TS [8]. Restprodukterna är tillräckliga för att täcka anläggningens behov av el och ånga och kan ge ett mindre överskott av fastbränsle ("lignin") eller elkraft, som ökar totala utbytet av nyttigheter till ca 49% (lignin) eller 45% (el). För att driva anläggningen används av råvaran således i ligninfallet drygt 1,0 MJ per MJ av summa produkter. Större delen måste allokeras till etanolen, som står för de mest energikrävande delprocesserna. Rimlig fördelning kan bara uppskattas, då tillgång till komplett processchema och fullständiga energibalanser behövs för en exaktare fördelning. I studien används 1,15 MJ/MJ_{etanol} resp. 0,45 MJ/MJ_{lignin}.

Emissionen av CO₂ (från jäsningssteget och eldning av bränslen som biogas och lignin), helt av förnybart ursprung, uppgår till 157 g/MJ_{etanol} vid ovan antaget utbyte och omvandling av restprodukterna till el vid fullständig utbränning av aska och rötrest.

4.3.5 Syntetiska kolväten

Vid den termiska omvandlingen kan i syntesen istället för metanol eller DME genom val av andra katalysatorsystem inriktas mot kolväten enligt Fischer-Tropsch eller Mobil processerna. Kolvätesyntesen är starkare exoterm än metanolsyntesen, vilket innebär lägre energieffektivitet till önskade produkter. För allmän översikt av F-T tekniken hänvisas till rapporter som kan hämtas hem från Internet hemsidor för företagen Sasol [9], Syntroleum [10] och Rentech [11], samt en rapport från Howard Weil, Labusse, Friedrichs Inc. [12].

Enligt Mobil-tekniken konverteras primärt bildad metanol direkt till huvudsakligen bensinkolväten och detta har använts i en stor naturgasbaserad anläggning på Nya Zeeland (nu i malpåse). Även om förlusten av nyttigheter i energitermer är bara några få procent utgör andelen bensin mindre än 80% av metanolens energiinnehåll (övrigt är LPG). Mobil-tekniken har utvecklats till att även producera även mellandestillat men den är ännu utan kommersiell tillämpning.

Fischer-Tropsch (FT)-tekniken används i Sydafrika av SASOL för kol- och naturgasbaserad syntesgas och av Shell i Malaysia på naturgasbas. FT-syntesen har fördel mot metanolsyntesen genom att kunna genomföras vid lägre tryck och större omsättning per passage genom reaktorn men är med använda katalysatorsystem ospecifik och ger en bred produktmix med allt från gaser (metan) över mycket olefinrika kolväten med raka kolkedjor till syrehaltiga föreningar och vaxer, som kräver omfattande efterupparbetning för att få marknadsförbara produkter. Om inte metangasen har en marknad utan måste återföras för omvandling till syntesgas blir utbytet av energiprodukter i självförsörjande anläggning knappt 40% av tillförd energi i råvaran kol. Med annan förgasningsteknik än av SASOL använd och utvecklad reaktorteknik (slurryfas) och katalysator har FT-tekniken bedömts kunna ge upp mot 50% som flytande drivmedel. Med biomassa som råvara bör utbytetstallet för drivmedel vara ca 5%-enheter lägre.

Med naturgas som bas (då ofta kallad GTL, gas-to-liquids, i USA) erhålls en väterikare syntesgas och produkterna får paraffinisk karaktär. För att få låg andel gaser styrs syntesen mot högmolekylära kolväten, som sedan upparbetas genom hydrokrackning för att få produkter som kan bli drivmedel med mellandestillat (dieselbränsle) som huvudprodukt. Naf-tafraktionen kan vara lämplig som petrokemisk råvara för framställning av eten, propen, etc. Krackningen är nödvändig för att få ett dieselbränsle med acceptabla vinteregenskaper [13, 14]. Produkten har framhållits på grund av friheten från svavel, kväve och aromatiska kolväten och av dess mycket höga cetantal. Den skiljer sig emellertid från den nuvarande dieseloljan genom mycket låg densitet, ca 0,78 kg/liter, och är därför en ny kvalitet, som inte direkt kan användas alternerande utan måste inom överskådlig tid ses som ett nischbränsle eller som en blandkomponent att förbättra sämre konventionella dieseloljor. FT-kolväten har diskuterats som möjlig produkt för vätgasframställning i fordon för bränsle-cell drift. Det har även antytts att FT-tekniken skulle vara lämplig för produktion av alkylat men detta måste vara en krånglig väg för en liten fraktion av produkterna med flera steg omfattande isomerisering och dehydrering av primära paraffiniska gaser före alkyleringen.

Inga fullständiga energibalanser för dessa moderna naturgasbaserade anläggningar har hittats i tillgänglig litteratur. Utbytestalen i energitermer med bara flytande drivmedel som produkt bedöms i naturgasfallet ligga närmare 15%-enheter under de vid metanolproduktion, d.v.s. ca 57% och 45% i biomassafallet. För att driva en självförsörjande anläggning behövs av råvaran således ca 0,75 resp. 1,2 MJ/M_{kolväte}. Det kan förekomma att sidoprodukt, t.ex. mindre mängd el produceras parallellt. Allokering mellan produkter bör då ske men underlag för sådana fall saknas.

4.3.6 Vätgas

Den billigaste vägen till den vätgas, som i dag används för hydreringsoperationer i oljeindustri och kemisk industri dag framställs från raffinaderigaser och naturgas, varvid metan, etan, etc reformeras med vattenånga med gasen som processbränsle, eller genom elektrolys av vatten. Elektrolysen ger direkt mycket ren produkt, medan reformerade kolväten måste efterbehandlas för att eliminera bildad kolmonoxid genom skift-reaktion med ånga och separation av bildad koldioxid, som avleds till atmosfären.

Skift-reaktionen vid vätgasproduktion måste drivas längre än vid framställning av syntesgas för metanolsyntes och kräver mer ånga men frånvaron av det exoterma syntessteget leder sammantaget till att utbytet av vätgas i energitermer blir ca 4%-enheter högre än vid metanolproduktion, d.v.s. ca 75%, i en stor anläggning. I små anläggningar, som skisseras för decentraliserad produktion vid tankningsstation, är utbytet 3-4%-enheter lägre. I själv-

försörjande anläggningar förbrukas naturgasresurs om ca 0,33 resp. 0,40 MJ/MJ_{väte} för driften. I båda fallen kan totala utbytet av nyttigheter höjas om det finns avsättning för låg-värdigt värme (fjärrvärme, lågtrycksånga). Vätgasen kan vara tillgänglig vid 20-30 bar tryck.

Med biomassa som råvara bedöms vätgasutbytet kunna vara 57% (0,75 MJ/MJ_{väte} råvara för drift).

Skall transport ske som kryogent väte (LH₂) kräver förvätskningen energi, som är 12-13 kWh/kg H₂, vilket betyder energieffektiviteten sjunker från ovannämnda 75% till 48% vid kompressordrift med el framställd i kombicykelsystem eller HAT-cykel för naturgas. Dessutom sker vid lagring och transport oundvikligen förluster genom avdunstning ("boil-off"), som kan uppgå till några procent av produkten i kedjan. Förlusten vid produktions-stället antas vara 1,5%.

Elektrolys av vatten till väte (och syrgas) kräver ca 1,25 kWh_{el} per kWh vätgas, d.v.s. 80% energiutbyte. Då el produceras från NG förbrukas 2,5 MJ_{NG} per MJ vätgas. Förvätskning tar 0,75 MJ_{NG} per MJ vätgas med eldriven kylkompressor och el från NG och totalt förbrukas således 3,25 MJ av NG-resurs per MJ väte. Elektrolys antas komma att ske endast vid lokal produktion vid tankningsstation då central produktion och distribution i rörsystem synes osannolik.

Nämnda energibehov måste korrigeras för ev. förluster av målprodukt senare i kedjan, t.ex. genom avdunstning.

4.4 Distribution och omvandling

Transport från produktionsställe och distribution till tankningsstationer kräver energi och medför i vissa fall förluster i form av läckage och avdunstning, vilket är särskilt påtagligt och oftast oundvikligt för kryogena vätskor.

4.4.1 Metan

Rörtransport av gas sker vanligen genom kompression av gasen till ca 80 bar och dimensionering av ledningen görs för tryckfall som kräver kompressorer längs ledningen med en förbrukning i gasmotordrivna kompressorer motsvarande 2% av transporterat flöde per 100 mil. Denna siffra används i denna studie.

Transport av LNG i stora tankfartyg (100.000 m³ eller mer i framtiden) med väl isolerade tankar över oceaner och man räknar med en förlust genom avdunstning på 0,15% per dygn eller ca 1,5% per resa om 10 dygn, då LNG förutsätts komma från anläggningar vid avlägsna gasfyndigheter. Förbrukningen av bränsle för fartygets drift sätts till den dubbla mot transport av olja p.g.a. det lägre energiinnehållet för samma last i volym. Samma gäller för distributionen till tankningsstationer. Avdunstad produkt kan ev. återvinnas i kylsystem eller användas som delbränsle i fartygets motorer men är ej inräknad i studien.

Biogas förutsätts bli förbrukad nära produktionsplatsen utan extra energiinsats.

4.4.2 Metanol

Import av metanol producerad från fossilgas i avlägsna anläggningar förutsätts i framtiden ske i stora tankfartyg i oceanfart till terminaler som för råolja och oljeprodukter (hittills byggda största metanoltanker har kapacitet för 100.000 m³). Energianvändningen för far-

tygsdriften antas vara 1,2% av transporterad energi i metanol. Förluster i detta led bedöms vara försumbara. För distribution från terminal till tankningsstation med tankbil sätts drivmedelsförbrukningen (inkl. 0,2% avdunstningsförlust) till 1%.

Inhemskt producerad metanol från biomassa antas bli distribuerad med enbart tankbil, ev. kombination kusttanker/tankbil och antas ha en drivmedelsanvändning på 2% av metanolens energiinnehåll.

4.4.3 Etanol

Enbart inhemskt producerad etanol förutsätts med distribution som för metanol och drivmedelsanvändning i energitermer något lägre än för denna, d.v.s. 1,5%.

4.4.4 Kolväten

FT/GTL-kolväten från naturgas förutsätts vara producerade vid avlägsna fyndigheter och transporteras som sker för råolja i stora tankfartyg i oceanfart vid storskaligt genomfört system även om transporten till att börja med sker i mindre fartyg. FT-produktens lägre densitet jämfört med råolja ger något högre drivmedelsanvändning. Siffran 0,008 MJ/MJ ansätts i studien.

Distribution från terminal till tankningsstation sker som för konventionella oljeprodukter med en förbrukning av drivmedel om 0,01 MJ/MJ_{FT}.

4.4.5 Vätgas

Rörtransport av gasformig vätgas från central anläggning kräver mer drivenergi jämfört med naturgas p.g.a. dess mycket lägre energiinnehåll, trots låg densitet. Drivenergi ca 75% högre för samma transporterade energimängd har uppgivits, och siffran 3,5% används i studien för detta fall.

Transport som förvätskad produkt, LH₂, från avlägsen anläggning vid naturgasfyndighet förutsätts ske i stora tankfartyg till terminaler. Den relativa drivmedelsförbrukningen blir dock betydligt större, ca 5 ggr, än för flytande kolväten p.g.a. det låga energiinnehållet i produkten, ca 8,5 MJ/liter jämfört med ca 40 MJ/liter för olja även om fartygen skulle transportera lika volym, vilket inte är sannolikt för flytande kryogena vätskor. Härtill kommer att avdunstning under transporten sker med ca 0,3% per dygn eller 3% för en 10 dygns enkel resa. Detta är betydligt mer än vad drivmaskineriet i tankfartyget använder.

Lagring vid terminal och transport med tankbil till tankningsställe leder utöver drivmedelsanvändningen, 5 ggr högre än för oljeprodukter, till fortsatta avdunstningsförluster, som sätts till 3%.

4.4.6 Elektricitet

El förutsätts vara producerad i regionala kraftverk med kombicykelsystem eller avancerad cykel (HAT) med verkningsgrad för turbinaggregatet på ca 55%. I eldistributionen till förbrukare räknas med en förlust av 5%.

4.5 Tankning

Tankning av under normala omgivande förhållanden flytande drivmedel kräver energi som är försumbar i hela kedjan och inte heller leder spill eller avdunstning till förluster som är

märkbara i kedjan. Gasformiga och kryogena drivmedel kräver energi vid tankning och kan medföra förluster av produkt.

4.5.1 Metan

Naturgas måste komprimeras till ca 250-280 bar för snabb fyllning av fordonstank till ca 200 bar och gasen tas vid stationen från lågtrycksnätet. Elmotordrivna kompressorer antas som el förbruka motsvarande 4% av gasens energiinnehåll eller 8% räknat som NG-resurs i kombicycle kraftverk.

Tankning av LNG som sådan till fordonstank bedöms inte kräva energi som är märkbar i kedjan men för att undvika förluster vid lagring kan kylkompressor behövas. Tankning som CNG kräver pumparbete före förångning men ingen kylkompressor vid normal omsättning. Elenergibehovet för pumparbetet uppgår till 0,004 MJ per MJ naturgas, vilket kan anses som nästintill försumbart. Orsaken till det väsentligt lägre pumparbetet i detta fall jämfört med "normal" CNG är att pumpningen sker som LNG och att förångningen görs efter att det höga trycket uppnåtts. Den väsentligt mindre volymen för vätskan i förhållande till gasen reducerar pumparbetet.

4.5.2 Vätgas

En tankningsstation för vätgas till fordon kan vara utrustad för framställning av gasen genom elektrolys vid stationen och komprimering av gasen till drygt 400 bar för snabbfyllning av fordonstank till 350 bars tryck. Alternativt mottar stationen vätgas från rörledning och endast kompression sker för tankning som gasformigt drivmedel. Allmän rördistribution av vätgas synes dock inte sannolik. Som tredje alternativ mottar station kryogent väte (LH_2) för lagring och tankning som sådant eller som gasformigt väte till fordonstank.

Elektrolys av vatten till väte kräver som nämnts (4.3.6) typiskt ca 2,5 MJ naturgas per MJ vätgas, vilket också gäller små anläggningar. Komprimering till drygt 400 bar för drift av elmotordrivna kompressorer som el motsvarande ca 10% av vätgasens energiinnehåll eller 20% som NG i kombicyclekraftverk eller 0,25 MJ NG per MJ väte.

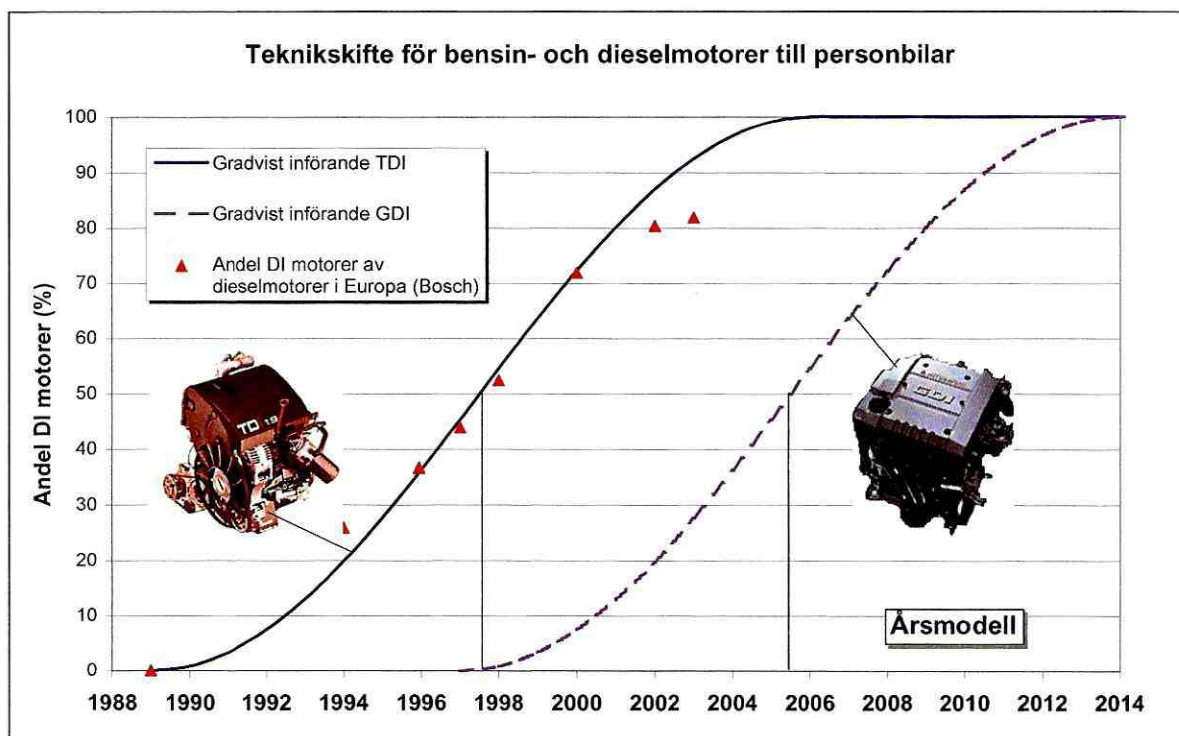
Tankning av kryogent väte kräver försumbar elenergi men förluster genom avdunstning vid lagring och överföring är sannolikt oundvikliga och uppskattas till 1%. Alternativt måste kylkompressor användas för att förhindra avdunstningsförlusterna men den kräver i sin tur el, vilket också innebär en förlust. Vid tankning som gasformigt drivmedel krävs pumparbete och värme för förångning.

4.6 Slutanvändning

4.6.1 Teknikskifte för bensin- och dieselmotorer

Man kan inleda beskrivningen av tekniken i personbilar med att konstatera att det för närvarande pågår ett teknikskifte för såväl otto- som dieselmotorer. I båda fallen är det fråga om genomgripande förändringar i förbränningskonceptet och efterbehandlingen av avgaserna även om förändringarna på "utsidan" av motorerna inte är påfallande stor. Det förutsätts att nämnda teknikskiften kommer att vara mer eller mindre genomförda på den tidsplanen som studien beaktar.

I den tidigare citerade rapporten om emissioner och deras effekter från denna rapportens författare finns en bild (**Figur 3**) som illustrerar tänkbara scenarier för de nämnda teknikskiftena [2].



Figur 3: Teknikskifte

Som framgår av **Figur 3** har teknikskiftet för de dieselmotorerna redan pågått ett antal år och håller nu på att fullbordas. Detta betyder inte att potentialen till minskad bränsleförbrukning ännu är fullt utnyttjad utan konceptet kommer säkert att kunna utvecklas vidare under ett antal år framöver. Teknikskiftet för de bensindrivna ottomotorerna har nyss inletts och vi har förutsatt en övergångstid som är ungefär lika lång som för de dieselmotorerna även i det här fallet. Att döma av data för de fordon som hittills introducerats på marknaden, finns fortfarande en stor utvecklingspotential för den nya tekniken på ottomotorer. Detta kommer sannolikt att medföra att skillnaden i bränsleförbrukning mellan bilar med ottomotorer och dieselmotorer kommer att minska framgent (sett som ett medeltal för populationen av respektive typ).

Bensindrivna ottomotorer

Ottomotorer använder i dag avgasrening med en så kallad trevägskatalysator. Istället för den konventionella "indirekta" insprutningen i inloppsröret kommer insprutningen att ske direkt i cylindern, så kallad "direktinsprutning". Den japanska tillverkaren Mitsubishi var först med tekniken på den japanska marknaden och sedermera har dessa motorer även introducerats i Europa i ett flertal av företagets bilmodeller. De flesta europeiska biltillverkare har också utvecklat liknande teknik som antingen introducerats helt nyligen eller kommer att introduceras inom kort.

Den största fördelen med direktinsprutning för ottomotorer är att bränsleförbrukningen minskar avsevärt. Orsaken till detta är främst att de så kallade pumpförlusterna minskar genom att motorn körs med stort luftöverskott (mindre strypning). Detta medför dock att

en vanlig trevägskatalysator inte kan användas för att reducera NO_x emissionerna, vilket är den största nackdelen med konceptet. Den teknik som verkar ha den största potentialen innebär att NO_x lagras i katalysatorn. Med jämna mellanrum regenereras katalysatorn genom att motorn körs "fett" under någon sekund, varvid den NO_x som bundits reduceras på liknande sätt som i en normal trevägskatalysator. Problemet är att dessa katalysatorer kräver lågsvavligt eller svavelfritt bränsle eftersom sulfater binds lättare än kvävedioxid i katalysatorn.

De koncept som nu håller på att introduceras på marknaden tolererar i och för sig en viss nivå av svavel i bränslet men helt klart är att de fungerar bättre med lägre svavelhalt. Problemet med svavel i bränslet har också uppenbart försenat utvecklingen i jämförelse med kurvan i **Figur 3** ovan. Det är dock troligt att ett flertal nya motorgenerationer kommer att introduceras inom kort, vilket sannolikt innebär att teknikskiftet trots allt kan komma att ske så snabbt som förutspått i den tidigare citerade rapporten av denna rapports författare [2].

Dieseloljedrivna dieselmotorer

För drygt 10 år sedan introducerades direktinsprutning för dieselmotorer i personbilar men tekniken är ingalunda obekant eftersom den introducerades i större skala i tunga fordon redan för drygt 50 år sedan. Av de tre olika motorer som introducerades för personbilar 1988/1989 (Audi, Rover och Fiat) blev *endast en av dessa* (Audi) någon större kommersiell succé. Tekniken kom sedermera att sprida sig till VW koncernens övriga företag och gav på så sätt dessa biltillverkare ett teknikförsprång före de övriga konkurrenterna. Det är dock först under de 3 senaste åren som utvecklingen tagit fart på allvar och mycket av denna utveckling kan tillskrivas utvecklingen av den nya insprutningstekniken (common rail, rotorpump med högt tryck och pumsinsprutare). Direktinsprutning för dieselmotorer kräver som bekant mycket högt insprutningstryck för att den fulla emissions- och bränsleförbrukningspotentialen skall nås.

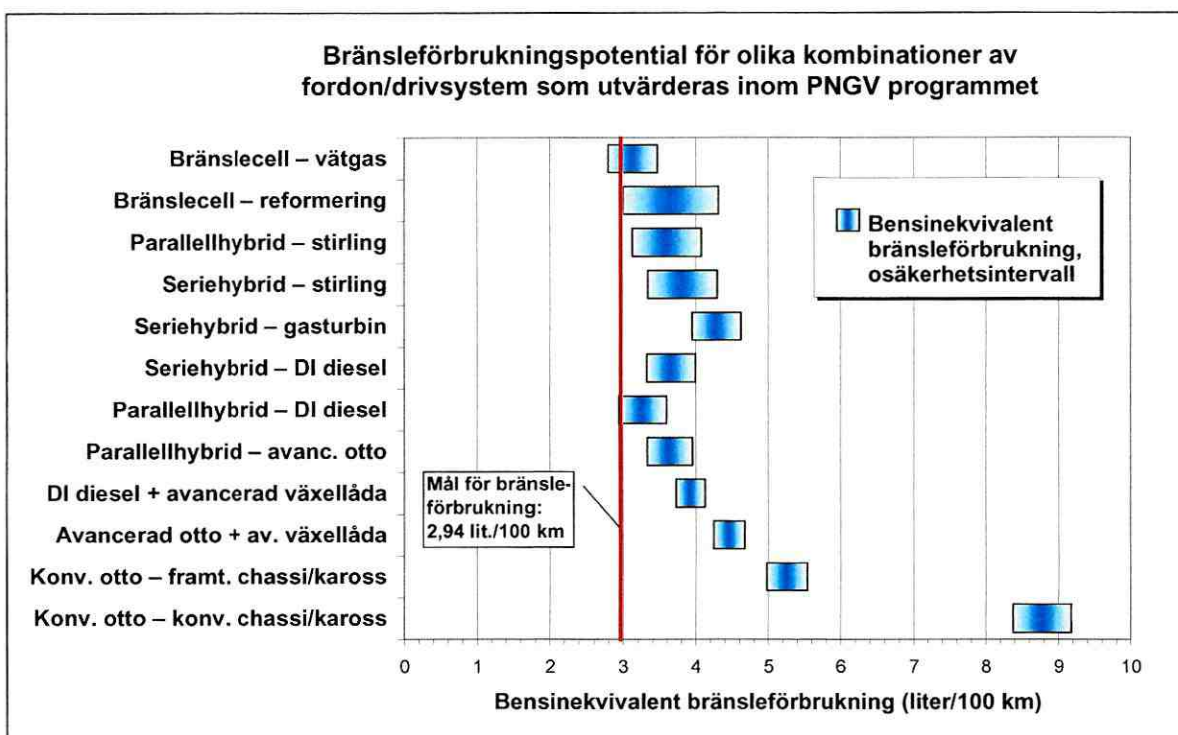
En stötesten för dieseloljedrivna motorer är fortfarande NO_x och partikelemissionerna. Partikelfilter håller nu på att kommersialiseras av en tillverkare (Peugeot) medan flera andra tillverkare också aviserat att de håller på och utvecklar partikelfiltersystem och kommer att starta produktion inom kort (2002/2003). Teknik för att med efterbehandling reducera NO_x emissionerna får fortsättningsvis avvakta införandet av bränsle med lägre svavelhalt. Trots att Sverige har ett bränsle med mycket låg svavelhalt (<10 ppm) torde inte vår marknad vara tillräckligt stor för att motivera utveckling och ett tidigare införandet av tekniken här. Det kan också vara värt att nämna att det faktiskt är fråga om i stort sett samma teknik för NO_x rening (NO_x lagrande katalysator) som kommer att användas i både diesel- och ottomotorer i framtiden. Därmed kommer också NO_x emissionerna att bli snarlika för båda dessa motortyper i framtiden.

Erfarenheter från det amerikanska PNGV programmet

Inom det amerikanska PNGV⁵ programmet har hybridsystemens potential till minskad bränsleförbrukning utvärderats. Programmet syftar till att minska bränsleförbrukningen till 3 liter/100 km (egentligen 80 miles/gallon) för ett fordon med en storlek motsvarande en normalstor amerikansk personbil (exempelvis Ford Taurus), vilket är en betydligt större biltyp än de europeiska bilar med samma bränsleförbrukning som nyligen har kommersialiserats (VW Lupo 3L och Audi A2 3L). Andra högt ställda krav finns i PNGV för emis-

⁵ PNGV: Partnership for a New Generation of Vehicles.

sioner, säkerhet, prestanda, komfort, kostnader mm. Programmet är tioårigt och startade 1994. Huvudmålet är att år 2004 kunna presentera produktionsklara prototyper som klarar de högt ställda kraven. I en utvärdering av programmet för två år sedan har en uppskattning av potentialen till minskad bränsleförbrukning för de olika tänkbara drivsystemen gjorts [15]. En (av Ecotrafic) bearbetad sammanställning av resultaten visas i **Figur 4**. Varje stapel i figuren representerar ett osäkerhetsintervall. Linjen strax under 3 l/100 km representerar utvecklingsmålet för bränsleförbrukningen (i bensinekvivalenter).



Figur 4: Bränsleförbrukningspotential för olika drivsystem och drivmedel (PNGV)

Det man först kan konstatera i **Figur 4** är att den pågående utvecklingen av chassi och kaross i syfte att minska *framdrivningsmotståndet* ger det största bidraget till sänkningen av bränsleförbrukningen. Målen för utveckling av chassi och kaross har nämligen satts mycket högt. Ur figuren kan vidare utläsas att inget av de konventionella drivsystemen (dvs. "icke hybrider") anses ha potential att klara målet för bränsleförbrukning ens i den nya avancerade bilen. En dieselhybrid (av parallelltyp) samt de två varianterna av bränsleceller är de enda drivsystem som tangerar målet för bränsleförbrukningen. På senare tid har man också börjat diskutera möjligheterna att använda en avancerad ottomotor i PNGV konceptet. Även om detta drivsystem inte klarar målet för bränsleförbrukning är det ett intressant koncept att studera av rent kommersiella skäl. Kanske kommer man också att ändra målet för bränsleförbrukning om det visar sig att dieselmotorer och bränsleceller inte bedöms klara de övriga målen (t.ex. emissioner i det första fallet och kostnader i det andra fallet).

Kraftig kritik har riktats mot PNGV programmet för den stora fokuseringen på dieselmotorer, eftersom dessa av flera amerikanska luftvårdsmyndigheter och miljöorganisationer anses emittera mer skadliga avgaser än bensindrivna fordon. Eftersom partikelemissioner är en emissionskomponent som förknippas med dieselmotorer kan nämnas att målet i PNGV för partikelemissionerna har satts till 0,01 g/mile (0,0062 g/km), vilket sannolikt

kräver partikelfilter. Dagens krav i Europa (Euro III, 2000/2001) ligger på 0,05 g/km och de framtida kraven (Euro IV, 2005/2006) ligger på 0,025 g/km. Trots att PNGV:s emissionsmål måste anses som en *mycket* låg nivå för denna typ av motor, tilltalar inte konceptet luftvårdsmyndigheter och miljöorganisationer eftersom man anser att andra koncept (t.ex. bensindrift) är bättre i detta avseende.

4.6.2 Val av fordonstyp

För att beräkna energianvändningen i fordonen har en del simuleringar gjorts med programmet Advisor® från det amerikanska federala laboratoriet National Renewable Energy Laboratory (NREL). Programvaran är egentligen inget "riktigt" program utan det är istället en applikation i programpaketet Matlab/Simulink®. Den körcykel som valts för simuleringarna är nuvarande Europeiska körcykel (NEDC) som används vid certifiering av fordonen. Simuleringar har inte gjorts för samtliga kombinationerna av fordon och bränslen utan tumregler och data från andra undersökningar har använts för att beräkna energianvändningen för några av alternativen. Det bör för ordningens skull också framhållas att mycket mer arbete skulle kunna läggas ned på nämnda beräkningar och det underlag som de baseras på. Speciellt viktigt är det när det gäller det underlag som används som indata till beräkningarna. En ingående och noggrann analys av detta slag har emellertid legat utanför ramarna för denna studie.

Valet av fordonstyp har gjorts för att fordonet skall vara representativt för fordon som kan tänkas dominera marknaden för nya fordon för tidsperioden 2010 – 2015. För att konkretisera en årsmodell inom intervallet har 2012 valts. Det är alltså fråga om ett "medelfordon" för nysålda bilar i Sverige (för denna årsmodell). De tidigare nämnda frivilliga gränserna för begränsning av CO₂ emissionerna för lätta fordon i EU framgår av **Tabell 2**.

Tabell 2: Frivilliga gränser för CO₂ i Europa

Årtal	CO ₂ (g/km)	Red. (%)	Anmärkning
1995	186	0%	Basnivå för jämförelsen
2003	165 – 170	-9,9%	Delmål för övervakningsprocessen
2008	140	-24,7%	Frivilligt mål för 2008
2012	120	-35,5%	Förslag för 2012

Det man först kan konstatera avseende värdena i **Tabell 2** är att de nya fordon som såldes i Sverige 1995 var väsentligt större och motorstarkare än medelfordonet i Europa, vilket medfört en högre förbrukning i Sverige än medeltalet i hela EU. Detta gäller fortfarande och det är tveksamt ifall beteendet kommer att ändras väsentligt till 2012. Det kan också påpekas att det frivilliga åtagandet enligt ovan gäller för hela EU; för alla ACEA:s medlemmar och således inte på enskilda marknader eller för enskilda tillverkare. Det är något oklart hur och om ACEA kommer att "fördela" utsläppsrättigheterna mellan sina medlemmar eller om man kommer att använda något annat förfarande. Eftersom överenskommelsen är frivillig och åtagandet gäller enbart ACEA är det – under förutsättning att målen nås – strängt taget ointressant *hur* man når målet. Vissa förbehåll i åtagandet finns dock om bl.a. att införandet av ny teknologi inte får förhindras på de olika delmarknaderna. Hänsyn till sådana omständigheter skall tas i övervakningsprocessen.

I vår bedömning av hur fordonsparken kommer att se ut i Sverige har vi med hänvisning till resonemanget ovan förutsatt att fordonen fortsättningsvis kommer att vara något större i Sverige än i resten av Europa medan skillnaden i motorstorlek (och motoreffekt) kommer att minska. Vidare förutsätter vi ej heller att penetrationen av dieslbilar kommer att vara tillnärmelsevis lika stor i Sverige som i övriga Europa. För närvarande är andelen dieslbilar åter minskande och ligger i skrivande stund (statistik från oktober 2000) på 4,7%. Även om andelen kan komma att öka till 2012 torde inte ökningen bli lika stor som för resten av Europa och därför har vi ansett att denna effekt och effekten av förändringen av motorstorleken kommer att ta ut varandra. Slutsatsen är således att bränsleförbrukningen för nya bensindrivna bilar i Sverige procentuellt måste minska ungefär lika mycket som förbrukningen i Europa, dvs. med 35,5%. Minskningen av bränsleförbrukningen kan ske på två principiellt olika sätt. Dels kan effektiviteten i drivsystemet öka och dels kan fordons färdmotstånd minskas. Möjligheterna att tillvarata bromsenergin (hybridfordon) inräknas i det här fallet in i förbättringen av drivsystemet. Vi har förutsatt en förbättring av drivsystemet och fordons färdmotstånd kommer att vara ungefär lika stora. Förutsättningarna för det medelfordon som avses i vår studie är följande:

Tabell 3: Några viktiga fordonsparemetrar

Parameter	Värde	Enhet	Anmärkning
Rullningsmotstånd (r_0)	0,007	dim. lös	Lättrullande däck
Luftmotståndskoefficient (C_d)	0,25	dim. lös	Ca 10% lägre än de bästa i dag
Frontarea (A)	2,1	m ²	Som en normalstor bil i dag
Luftmotståndsindex ($C_d \cdot A$)	0,525	m ²	
Vikt med drivsystem (konv.)	1 088	kg	Inkl. motor, växellåda, etc.
Acceleration (0-100 km/h)	11,0	s	Jfr. PNGV: 12 s för 0-96,6 km/h
Förbättring av ottomotorn	17,6	%	Gäller som medel för körcykeln

I **Tabell 3** kan man notera några intressanta punkter:

- De lättrullande däck som förutsatts finns i princip redan i dag och används bl.a. till elbilar och andra energisnåla fordon. Det är dock som regel fråga om däck som är smalare än normalt för denna storlek av bil och som har vissa andra nackdelar (buller, väghållning m.m.). Det verkar dock inte omöjligt att kunna nå den förbättring för förutsatts i tabellen.
- Luftmotståndskoefficienten är väsentligt lägre än för nya bilar i dag av samma storlek men ändå måste man konstatera att den förväntade förbättringen inte är tillnärmelsevis lika stor som för de konceptbilar som visats. Exempelvis ligger prototypbilarna i det amerikanska PNGV programmet på eller under 0,20.
- Någon väsentlig minskning av frontarean har inte förutsatts eftersom bilens innerutrymmen inte förväntas minska. En betydligt lägre och längre bil vore en möjlighet att minska frontarean men den skulle knappast accepteras av köparna så även denna möjlighet har uteslutits. Inga avancerade koncept som t.ex. aktiv gränsskiktsskontroll förutses kunna införas inom tidshorisonten.

- Vikten för bilen måste reduceras väsentligt jämfört med dagens nivå. Den vikt på 1 088 kg för en bil med ett konventionellt drivsystem för bensindrift kan tyckas låg men är en nödvändighet om kraven på bränsleförbrukning skall kunna nås med en rimlig verkningsgrad för drivsystemet. För att nå en så låg vikt som ca 1 100 kg krävs att nya lätta material (t.ex. aluminium) används i karossen men även att drivsystem och övriga komponenter bantas kraftigt jämfört med dagens bilar i samma storleksklass.
- I det amerikanska PNGV programmet har en acceleration från 0 till 60 mph (96,6 km/h) på maximalt 12 s förutsatts. Detta torde innebära en långsammare bil än kundpreferenserna i Sverige och därför har accelerationen för 0 – 100 km/h satts till 11,0 s, vilket motsvarar ca 10,5 s för 0 till 60 mph. Frågan är om "bortskämda" svenska bilköparna skulle acceptera en sämre acceleration än så även i ett framtida perspektiv där CO₂ emissionerna måste minskas väsentligt. Förvisso finns i dag ett antal miljöbilar som har en acceleration av storleksordningen 14 – 16 s men det kan inte förutsättas att en medelbil med en så "dålig" acceleration skulle accepteras av kunderna.
- Den nödvändiga förbättringen av ottomotorn som anges i tabellen har hämtats från underlagsdata till den tidigare citerade rapporten för KFB [2]. Dessa data skall tolkas som en förbättring av ottomotorn i det för ett konventionellt drivsystem relevanta arbetsområdet. Detta brukar generellt anses ligga vid ca 2 bar i effektivt medeltryck (ca 20% last) vid 2000 r/min för dagens bilar. Potentialen att öka verkningsgraden vid fullast eller i den optimala belastningspunkten är inte lika stor.

För att ytterligare belysa möjligheten att minska luftmotståndet visas i **Tabell 4** data för några Audi/VW modeller [16]. Det man först kan notera i **Tabell 4** är att en luftmotståndskoefficient väsentligt lägre än 0,30 bör vara möjligt att åstadkomma i framtiden. Vidare ser man att en hög bil som Audi A2 får ett stort handikapp ge-

Tabell 4: Luftmotstånd för några bilmodeller

Bilmodell	C _d	A (m ²)	C _d • A (m ²)
Audi A2, 1.4 TDI	0,28	2,20	0,616
Audi A2, 3L	0,25	2,18	0,544
Audi A4	0,31	2,04	0,632
Audi A6	0,31	2,19	0,679
VW Passat	0,27	2,15	0,581

nom att frontarean blir så stor. Audi A2 karossen utan de aerodynamiska finesserna (1.4 TDI i **Tabell 4**) har faktiskt ett högre luftmotstånd (prop. Mot C_d • A än en så pass stor bil som en VW Passat. Slutsatsen är att konventionellt byggda bilar är bättre än höga och korta bilar i detta avseende.

Eftersom valet av drivsystem och bränsle påverkar fordonets vikt väsentligt i en del fall (t.ex. bränsleceller) kan det vara av intresse att redovisa vikten för de olika alternativen. En del approximationer har gjorts för att förenkla analysen vilket medför att mindre felaktigheter på något tiotal kg inte beaktats. För att erhålla samma prestanda som referensfordonet har sedan motorstorleken skalats och detta har i sin tur ökat vikten ytterligare i en del fall. Någon hänsyn till att även vikten på karossen (och resten av fordonet) också borde öka med en ökad vikt för drivsystemet har inte tagits. Uppenbart är att en mer noggrann analys av förutsättningar och indata skulle kunna förbättra uppskattningarna av vikten men skillnaderna jämfört med en mer ingående analys torde inte bli stora utom i fallet med bränslecellerna där den största osäkerheten finns. I detta fall finns helt enkelt inga tillförlitliga in-

data än och speciellt gäller det för DMFC bränslecellen. Resultaten för de olika drivsystem och drivmedelskombinationerna visas i **Tabell 5**.

Tabell 5. Vikt för bilen med olika drivsystem och drivmedel

Drivmedel	Energiomvandlare	Drivsystem	Vikt
Bensin	Ottomotor	Konventionellt	1 088
Bensin	Ottomotor	Hybrid	1 097
Dieselolja	Dieselmotor	Konventionellt	1 102
Dieselolja	Dieselmotor	Hybrid	1 096
Metan	Ottomotor	Konventionellt	1 195
Metan	Ottomotor	Hybrid	1 204
Vätgas	Ottomotor	Konventionellt	1 195
Vätgas	Ottomotor	Hybrid	1 204
Vätgas	Bränslecell	Direkt	1 270
Vätgas	Bränslecell	Hybrid	1 323
Metanol	Bränslecell	Direkt	1 244
Metanol	Bränslecell	Hybrid	1 272
Metanol	DMFC	Hybrid	1 438
DME	Bränslecell	Direkt	1 270
DME	Bränslecell	Hybrid	1 296

Det man först kan konstatera angående resultaten i **Tabell 5** är att bensin och dieselolja i både konventionellt och hybriddrivsystem ger den lägsta vikten. Eftersom vi förutsatt att hybriddrivsystemet är av parallellhybridtyp används mycket små batterier och viktökningen som kan hänföras till eldrivsystemet kompenseras i stort sett av minskningen i vikt för energiomvandlaren. Andra typer av hybridssystem kan bli väsentligt tyngre. Skillnaden mellan bensin och dieselolja borde rent resonemangsmässigt vara till bensinmotorers fördel med något tiotal kg. Att skillnaden inte blev den förväntade kan bero på att den bensinmotor som använts som bas haft en mindre cylindervolym (1 liter) än motsvarande dieselmotor (1,9 liter). Den skalning av motorstorleken som gjorts i Advisor® har varit störst i dieselmotorfallet och speciellt gäller det för motorn till hybridsystemet. Frågan är ifall det är möjligt att skala ned en motor så mycket som i det fallet med bibehållet vikt/effektförhållande. En annan orsak till det något oväntade resultatet kan vara att den dieselmotor som använts som bas (VW 1,9 liter TDI på 66 kW) är en tämligen lätt motor som bara väger några få kg mer än motsvarande storlek av bensinmotor.

De övriga flytande drivmedlen som det syntetiska bränslet, metanol och etanol men även DME har förutsatts ha samma vikt som bensin respektive dieselolja och därför visas dessa alternativ inte i **Tabell 5**. Denna approximation är rimlig ifall samma tankvolym används (densiteten skiljer inte mycket för de flytande drivmedlen) men är inte helt korrekt om man eftersträvar exakt samma räckvidd för alla bilarna. Likaså väger en tank för DME med samma energiinnehåll något mer än en tank för de flytande drivmedlen men vi har istället förutsatt en mindre volym och därmed en något kortare räckvidd i det fallet.

De gasformiga bränslena får en högre vikt än bensen och dieselolja på grund av den högre tankvikten. Även i detta fall har emellertid en kortare räckvidd förutsatts. Det är knappast rimligt att öka vikt och volym så mycket att räckvidden skulle bli densamma. Frågan är istället ifall kunderna kan acceptera en betydligt kortare räckvidd än de ca 600 – 1 000 km som dagens personbilar har. Detta är något som generellt torde begränsa marknadspenetrationen för gasdrivna fordon.

Vikten för bilarna med bränsleceller blir väsentligt högre än för de övriga drivsystemen och detta är en orsak till att bränsleförbrukningen inte blir riktigt så låg som man kunde förvänta sig i detta fall. Den i särklass tyngsta bilen är den med DMFC bränslecellen men i detta fall har inga andra uppgifter än de data som finns i Advisor® använts. Dessa uppgifter torde vara mycket osäkra eftersom detta är den minst utvecklade typen av bränslecell. Det är troligt att vikten kan reduceras väsentligt för detta drivsystem i framtiden förutsatt att ett genombrott görs i denna utveckling.

Med hjälp av indata enligt ovan för fordonet och för drivsystemet enligt nedan har beräkningar utförts i simuleringsprogrammet Advisor® för att uppskatta bränsleförbrukningen för normfordonet. Med hjälp av andra ingångsdata har sedan bränsleförbrukningen för de övriga drivsystemen beräknats. En del korta kommentarer om de överväganden som gjorts när ingångsdata tagits fram beskrivs nedan.

4.6.3 Ottomotor

Motortekniken som används för konventionellt drivsystem och i ett elektriskt hybridsystem skiljer sig inte mycket åt och därför är de förbättringar av ottomotorn som beskrivs nedan mer eller mindre generella för denna motortyp. Den bensindrivna ottomotorn är basalternativet och därför beskrivs den först.

Bensin

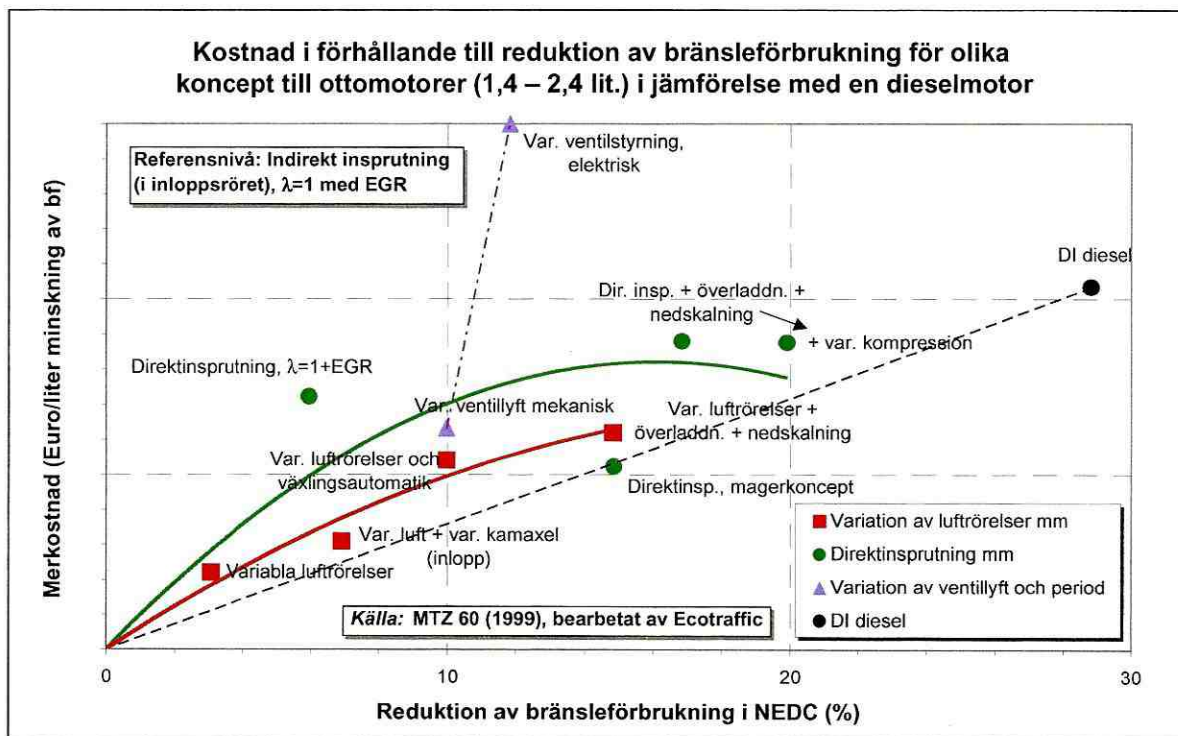
För ottomotorer är ingalunda direktinsprutningen den enda möjliga tekniken för att minska emissionerna. En översikt av olika tänkbara framtida teknologier visas i **Figur 5** som ursprungligen härrör från konsultföretaget AVL och som modifierats något av Ecotrafic (genom att diverse linjer lagts till) [2]. I figuren jämförs den procentuella förbättringen av bränsleförbrukningen i förhållande till ökningen av kostnaderna. En direktinsprutad dieselmotor finns också med som referens i figuren.

Som framgår av **Figur 5** finns en mängd olika alternativ för att minska bränsleförbrukningen för bensindrivna ottomotorer. Direktinsprutning av bensin är ingalunda den enda möjligheten utan även andra koncept kan ge nästan lika stor reduktion av bränsleförbrukningen⁶. Vissa av alternativen ter sig i dag som alltför dyra för att vara realistiska men med fortsatt utveckling kommer säkert flera av dessa att bli intressanta i framtiden. Exempelvis är skillnaden i bränsleförbrukning mellan den direktinsprutade bensinmotorn med magerkoncept och en motor med elektriskt manövrerade ventiler (fullvariabel ventilstyrning) inte stor. Skillnaden i kostnad är däremot betydande.

Direktinsprutningen förbättrar en ottomotor mest på dellast. Därför kommer inte potentialen för den *relativa* förbättringen med hybridsystem att vara lika stor för sådana motorer

⁶ Observera att bränslebesparingarna genom olika tekniska åtgärder sällan är adderbara. Två lösningar som var för sig minskar bränsleförbrukningen med 10% ger inte alltid en total minskning med 20%. Istället kan minskningen bara blir blygsamma 12%.

som för konventionella ottomotorer. Man bör ta hänsyn till detta i beräkningarna även om vi i detta fall endast gjort en schablonmässig uppskattning.



Figur 5: Reduktion av bränsleförbrukning för ottomotorer i relation till kostnader

För att simuleringen av bränsleförbrukningen för ett framtida koncept skall bli så korrekt som möjligt krävs egentligen att ett nytt så kallat musseldiagram över bränsleförbrukningen som funktion av last och varvtal uppskattas. Eftersom framtagandet av ett nytt bränsleförbrukningsunderlag är ett omfattande arbete har istället en proportionering av verkningsgraden gjorts för att approximera den tänkta förbättringen inom det i körcykeln relevanta området (last och varvtal) för bränsleförbrukningen. Förbättringspotentialen är som beskrivits ovan störst för dellast men en viss förbättring kan även förväntas på fullast. Därför har en *högre* maximal verkningsgrad än den realistiska för 2012 använts med vetskapen om att detta inte har någon avgörande betydelse i körcykeln eftersom motorn inte körs på fullast i den använda körcykeln. En av motorerna i Advisor® (med 1,0 liters cylindervolym) har använts som bas och den maximala verkningsgradsöken har ökat från 34 till 42% för att nå den minskning av förbrukningen på lägre belastningar som förväntas vara möjlig. Även om denna ökning kan tyckas stor finns ändå en viss risk för att bränsleförbrukningen över-skattas genom att potentialen till förbättring är så stor på låga laster. Detta skulle ytterligare accentueras ifall överladdning av motorerna fick ett större genomslag än i dag.

En viktig förbättring av bränsleförbrukningen är att det förutsätts att de framtida ottomotorerna i ett konventionellt drivsystem stängs av vid tomgång. Detta förutsätts tillämpas när motorn blivit någotsånär driftsvarm. Vi har förutsatt att tomgången kan reduceras till 25% jämfört med i dag. Kraftigare startmotor, generator och batteri krävs för att åstadkomma detta. Ett sådant system används redan i den så kallade 3-liters bilen VW Lupo 3L och det är ett väsentligt billigare system än ett hybridsystem. En faktor som i dag hindrat avstängning av bensinmotorer vid stopp är den emissionsökning som sker vid starten. Även om

detta bidrag är litet jämfört med bidraget från kallstarten skulle många starter ske under en körcykel och bidraget från dessa är inte försumbart. Framtida motorteknik kommer inte att ha denna begränsning.

Hybridsystem av parallell- och serietyp är tänkbara för förbränningsmotorerna. Parallellhybrid varianten har använts eftersom analyser både av NREL och av författarna själva visat att detta system har en något större potential till minskad bränsleförbrukning. Vidare behöver inte parallellhybriden lika stort batteri som seriehybriden och blir därmed billigare. En speciell variant av parallellhybriden är det system som Toyota använder i sin modell Prius. Detta system har minst lika stor potential till minskad bränsleförbrukning som den "konventionella" parallellhybriden men torde vara mycket dyrare i tillverkning. I ett hybridsystemet förutsätts att en startmotor-generator med en (intermittent) effekt på 15 kW används. Ett effektbatteri med hälften av vikten för ett avancerat blybatteri för hybridsystem enligt tillgängliga indatafiler till Advisor® krävs. Ett sådant batteri kan vara ett litiumbatteri eller ett avancerat nickel-metallhydrid batteri. Förbränningsmotorn har skalats ned för att ge den erforderliga accelerationen. Ingen försämring av verkningsgraden har förutsatts vid nedskalningen även om en liten försämring kanske kunde förväntas i praktiken. Det kan också nämnas att hybrider av det ovan beskrivna slaget torde ha potential till ett stort genomslag på marknaden till 2012 genom att kostnadsökningen (jämfört med ett konventionellt drivsystem) bör vara acceptabel.

Alternativa bränslen

En viktig fråga när det gäller användning av alternativa bränslen är hur väl motorerna anpassats till respektive bränsle och huruvida de alternativa bränslena har fördelar som kan utnyttjas. Sannolikt är det så att den fulla potentialen inte utnyttjas i dag. Ett överslagsmässigt underlag och resonemang används för att belysa dessa frågor.

Alkoholer

Alkoholerna, etanol och metanol, har som bekant en hel del fördelar när de används i ottomotorer – de är helt enkelt "naturliga" ottomotorbränslen. Oktantalet är högre än bensin, vilket är gynnsamt eftersom ottomotorns maximala kompressionsförhållande begränsas av bränslets oktantal (knackning). Vidare har alkoholerna ett högre förångningsvärme än bensin och eftersom energiinnehållet (per liter och per kg) är lägre skulle en total förångning av bränslet före motorn innebära att temperaturen sänks mer än med bensin. En lägre temperatur innebär i sin tur att fyllnadsgraden ökar även om detta delvis motverkas av att alkoholemolekylerna är mindre än bensinmolekylerna och därför "tar mer plats" än de senare. Nu är i och för sig inte förloppet fullt så enkelt när det gäller förångningen eftersom förångningen inte sker fullständigt vid en bränsle-luft preparering i inloppsröret (indirekt insprutning). Ej heller tas all energi för denna förångning från luften som man kanske kunde vänta sig. Värmet för denna förångning kommer, förutom från luften, även från ytorna i inloppssystemet (genom lagringen av bränsle på dessa väggar) och från de varma ytorna i cylindern som träffas av bränsledropparna. Resultatet är en lägre fyllnadsgrad och högre värmeförluster. Man kan notera att alkoholmotorer med indirekt insprutning har en något högre volymetrisk verkningsgrad än bensindrivna motorer, vilket således är en effekt av bränslets annorlunda fysikaliska egenskaper i förhållande till bensin. Ytterligare en marginell fördel är en högre massa per energienhet, vilket genom det ökade massflödet ger en liten ökning av effekt och verkningsgrad.

Det stora problemet med alkoholer i ottomotorer i dag är den kraftiga ökningen av emissionerna när motorn kallstartas vid låg temperatur. Detta problem kan i framtiden lösas

med den nya motortekniken (bl.a. direktinsprutning). I en direktinsprutad ottomotor sker insprutningen vid högre laster tidigt under inloppsfasen. Detta görs dels för att erhålla en homogen blandning och dels för att utnyttja den kylande effekten hos bränslet när det förångas. För de bensindrivna direktinsprutade motorerna har man kunnat notera en påtaglig ökning av motoreffekten som följd av att förångningsvärmets i detta fall inte tas från varma ytor under insugningsfasen (innan inloppsventilen stängts). Istället tas en större del av förångningsvärmets från insugningsluften. Sannolikt kommer alkoholerna även att ha en fördel jämfört med bensin även med direktinsprutning på grund av det högre förångningsvärmets. Kylningen av bränsle-luft blandningen enligt ovan medför också att kompressionsförhållandet för direktinsprutade motorer kan höjas i jämförelse med konventionella motorer. Försök har tidigare gjorts med direktinsprutning av alkoholer i ottomotorer och man har konstaterat att detta ger en mängd intressanta fördelar, inte minst vid kallstart.

Den kanske viktigaste frågan är emellertid huruvida alkoholdrivna fordon med direktinsprutade motorer kan göras bränsleflexibla (FFV). Även om FFV-konceptet innebär en kompromiss i förhållande till en optimerad motor är FFV ett koncept som måste tillgripas under en introduktionsfas. Man vet sedan tidigare att insprutningssystem och bränsle-luft preparering för dieselmotorer inte är särskilt väl lämpade för FFV drift eftersom skillnaderna i densitet (volym) för de bränslen som avses (dieselolja och alkoholerna) är stora och insprutningen måste genomföras under mycket kort tid. För konventionella ottomotorer med indirekt insprutning är problemet något mindre eftersom insprutningsperioden kan vara längre genom att insprutningen och bränsle-luft prepareringen sker utanför cylindern. Ingen undersökning på en FFV med modern⁷ direktinsprutad ottomotor är känd för författarna men en nyligen publicerad undersökning från högskolan i Zwickau om inverkan på insprutningsutrustningen finns [17]. Resultaten i denna studie, som utfördes på bensin, metanol och blandningar av dessa bränslen, indikerar att det borde finnas goda förutsättningar för att åstadkomma ett FFV koncept med direktinsprutning. I modellförsök har man funnit att penetrationen av sprayen minskar med metanol beroende på bränslets annorlunda fysikaliska egenskaper i förhållande till bensin. Generellt sätt borde penetrationen öka eftersom bränslemassan ökar när metanol används men atomiseringen och förångningen överkompenserar detta. Detta torde vara en väsentlig fördel då väggvätning är ett stort problem för motorer med direktinsprutning (speciellt under kallstart). Vi har därför förutsatt att den framtida alkoholdrivna ottomotorn kommer att vara direktinsprutad och av FFV typ. Istället för M85 respektive E85 förutsätter vi emellertid "rena" alkoholer (bortsett från ev. denaturering), dvs. M100 respektive E100. Den direktinsprutade motorns goda kallstartegenskaper bör möjliggöra att bensininblandningen slopas. *Därmed öppnas också möjligheten att använda samma bränslekvalitet för alkoholdrivna diesel- och ottomotorer under förutsättning att de förstnämnda inte kräver tillsats av tändförbättrare.*

I framtiden kommer NO_x reningen för bensindrivna direktinsprutade ottomotorer att ske med hjälp av så kallade NO_x lagrande katalysatorer. Dessa katalysatorer är generellt känsliga för svavel och därför har alkoholer, som är svavelfria, en fundamental fördel i detta avseende jämfört med bensin där svavelhalten i framtiden måste minskas⁸. För att en NO_x

⁷ Utvecklingsföretaget FEV i Aachen har tidigare utvecklat en direktinsprutad ottomotor baserat på ett gammalt VW-koncept för en direktinsprutad bensinmotor. Detta koncept var dock principiellt helt olika de nya koncepten för direktinsprutning, varför paralleller till denna motor inte är relevanta.

⁸ Dieseloljan har i Sverige en mycket låg svavelhalt men i Europa måste denna halt minskas innan den nämnda typen av katalysatorer kan användas på motorer som körs på dieselolja.

lagrande katalysator skall fungera krävs en regenerering med jämna mellanrum. Detta åstadkommes genom att motorn körs med fet bränsle-luft blandning under en kort period. Under regenereringen sker en reduktion av NO_x med hjälp av CO och HC under liknande förhållanden som för "normala" katalysatorer och detta fungerar eftersom man ju har ett syreunderskott vid regenereringen. Det är känt att sammansättningen av HC är viktig för att nå en hög NO_x reduktion och frågan är hur avgaserna ("HC") från alkoholer förhåller sig i det sammanhanget. Genom försök med så kallade "lean-NO_x" katalysatorer vet man att alkoholerna, i alla fall metanol, är minst lika bra som bensin och dieselolja i detta avseende och detta indikerar också att regenereringen av en NO_x lagrande katalysator borde fungera tillfredsställande. Ytterligare en fördel med alkoholer i direktinsprutade ottomotorer är den minskade sot- och partikelbildningen i jämförelse med bensin. Detta är ett påtagligt problem med dagens direktinsprutade bensinmotorer eftersom partikelnivåerna ligger i paritet med moderna dieselmotorer utan partikelfilter.

Metan

Metan är i teorin ett utmärkt bränsle för ottomotorer. Metan har ett mycket högt oktantal, vilket ökar verkningsgraden jämfört med bensin. Genom att metan är gasformigt erhålls också låga emissioner vid kallstart – bränslet är ju redan förångat. Nackdelar är problem med styrningen av bränsle-luft förhållandet. Att bränslet är gasformigt ökar svårigheterna att exakt styra förhållandet genom den stora inverkan av tryck och temperatur på densiteten. Vidare är det s.k. λ -fönster som finns för katalysatorn som regel mindre än för bensin även om katalysatorutvecklingen minskat denna nackdel något i förhållande till bensin. Den långsiktiga stabiliteten för avgasreningssystemet till metandrivna fordon är fortfarande bristfälligt dokumenterade och vissa resultat finns som antyder väsentligt sämre stabilitet än för bensin [18].

Tunga motorer för metandrift körs ofta med ett stort luftöverskott för att minska bränsleförbrukningen (s.k. lean-burn). Detta koncept torde emellertid vara svårt att tillämpa för metandrivna lätta fordon med hänvisning till de förhållandevis hårda kraven för NO_x emissioner som kommer att gälla i framtiden för dessa fordon, i kombination med svårigheterna att reducera NO_x vid högt luftöverskott. Problematiken kommer också att vara snarlik ifall en direktinsprutning⁹ av gas används (i analogi till direktinsprutning av bensin). Liknande problematik finns i och för sig för bensindrivna direktinsprutade ottomotorer men de katalysatorer som för närvarande används (Mitsubishi GDI) ger ändå en viss NO_x rening i katalysatorn genom att bensinen används som reduktionsmedel. Den framtida katalysatortekniken med NO_x lagring torde bereda vissa problem med metan som drivmedel. Metan är sannolikt det *sämsta* tänkbara kolvätebaserade reduktionsmedlet för en sådan katalysator och det krävs således att reduktionen fungerar med enbart CO som reduktionsmedel. Inga publicerade resultat finns ännu tillgängliga som kunde antyda potentialen för metan i sådana katalysatorer men resonemangsmässigt finner man, som indikerats ovan, att vissa problem torde föreligga. Rent praktiskt finns också vissa problem med att spruta in metan direkt i cylindern och det torde var svårt att kombinera denna direktinsprutning med direktinsprutning av bensin (se vidare beskrivning nedan).

System för direktinsprutning av metan håller i och för sig på att utvecklas för motorer till tunga fordon, vilket antyder att problemen med direktinsprutning av gas kan komma att lösas i framtiden med en viss utveckling. Dessa motorer använder emellertid dieselolja eller glödstift som tändhjälp och mycket högt kompressionsförhållande (samma som för die-

⁹ Termen borde kanske vara "direktinblåsning" för att ta hänsyn till att det är bränsle i gasfas som sprutas in.

selmotorer), vilket stängt taget medför att dessa motorer bör klassas som dieselmotorer. Som beskrivits ovan är det inte fastställt att problemen med en direktinsprutad metandrivna ottomotor kan lösas inom den tidsram som avses för fordonen i studien. För att kunna hålla jämförelsen på en tekniskt sett likvärdig nivå har vi ändå förutsatt att den metandrivna framtida motorn kommer att vara en direktinsprutad ottomotor (med tändstift). Kan man inte lösa de tekniska problemen som indikerats ovan återstår möjligheten att använda en mer konventionell motor med indirekt insprutning. Detta skulle emellertid innebära en avsevärt högre bränsleförbrukning än den vi förutsatt.

Det bör också framhållas att det finns en del praktiska svårigheter att åstadkomma en så kallad "dual-fuel", dvs. tvåbränslemotor med *direktinsprutning av båda bränslena* (bensin och metan). Utrymmet i ett modernt cylinderhuvud (topplock) med 4 ventiler per cylinder är ytterst begränsat. Det är svårt nog att dessutom få plats med både tändstift och en insprutningsventil för bensin. Eftersom en insprutningsventil för metan per definition kommer att vara större än för flytande drivmedel och man i en tvåbränslemotor måste ha plats för *två helt olika insprutningsventiler* ter sig denna lösning nästintill omöjlig. En kombination där den ena använder direktinsprutning och den andra använder indirekt insprutning borde dock vara fullt möjlig. En högre bränsleförbrukningen för varianten med indirekt insprutning är dock ofrånkomlig som följd av denna kompromiss. Vi har därför förutsatt att den metandrivna motorns bränsleförbrukning med metan som bränsle kommer att vara lika låg som för en dedikerad typ av motor med direktinsprutning, vilket är att betrakta som ett idealfall. Kan inte denna motor göras bränsleflexibel i någon form (dual-fuel) medför detta en hel del problem under introduktionsfasen. Kanske måste man frånga denna lösning till förmån för en mer konventionell teknik under en introduktionsfas. Ett annat problem är den begränsade räckvidden för en dedikerad metangasdriven bil, vilket medför en del begränsningar när det gäller marknadspenetrationen.

Trots att det höga oktantalet för metan innebär att verkningsgraden blir högre för detta bränsle än för bensin, finns en del nackdelar. Den volymetriska verkningsgraden blir lägre än för bensin och alkoholer eftersom metan redan är förångad och således "tar mer plats". Detta kan möjligen delvis kompenseras med en senare insprutning (efter insugningsventilens stängning) när direktinsprutning används men med ett högre insprutningsarbete som följd. Man bör också notera att fordonsvikten ökar när metan används som bränsle även om räckvidden är kortare än för bensin och alkoholer¹⁰. Detta är ett fundamentalt faktum som inte kan bortses från vid beräkning av bränsleförbrukningen.

Vätgas

Det finns en del publicerade resultat för vätgas som drivmedel i motorer av både otto- och dieseltyp. Underlaget är dock inte tillräckligt gediget för att en tillfredsställande uppskattning av potentialen skall kunna göras. Möjligheter att köra en motor med mycket mager bränsle-luft blandning finns med vätgas som bränsle, vilket är positivt för att nå en hög verkningsgrad. Å andra sidan ger detta i kombination med att vätgasen upptar stor volym en låg effekt, vilket i sin tur leder till att motorns storlek måste ökas väsentligt om man vill bibehålla effekten. Någon form av överladdning är alltså nödvändigt. Vi har förutsatt att inverkan av flera av dessa parametrar i stort sett tar ut varandra, varför samma verkningsgrad som för en bensindrivna ottomotor kan förutsättas.

¹⁰ Vi har inte beaktat en metandrivna bil med samma räckvidd som en bensin- eller dieseldrivna bil som en realistisk möjlighet. Detta innebär självfallet en begränsning av den möjliga penetrationen på marknaden för metandrivna bilar.

4.6.4 Dieselmotor

En dieselmotor avsedd för dieselolja är basen även för dieselmotorer drivna med andra drivmedel. Några avgörande skillnader i verkningsgradspotential kan inte skönjas med fullt utvecklade koncept för dieselmotorer drivna med alternativa drivmedel.

Dieselolja

En väsentlig ökning av det specifika effektuttaget genom kraftig överladdning och en samtidig minskning av cylindervolymen är den främsta åtgärden för att minska bränsleförbrukningen för denna motortyp. Därigenom minskar bränsleförbrukningen vid dellast. En minskning av friktionsförluster, pumpning och värmeförluster är ytterligare områden där en viss förbättringspotential finns. Toppverkningsgraden förutsätts öka tämligen marginellt i sammanhanget från dagens nivå på 43 – 45% till 46%. Denna nivå är f.ö. målet till 2004 i det amerikanska PNGV programmet. En korrektion av ökningen av bränsleförbrukningen vid kallstart med dieselmotorer har gjort då modellen är felaktig i Advisor® programmet (samma modell som för bensinmotorer används, vilket inte överensstämmer med experimentella data).

För att klara de framtida kraven för NO_x emissioner – som förväntas skärpas avsevärt för dieselmotorer – krävs en NO_x lagrande katalysator. Denna katalysator kräver i sin tur sin tribut i form av en ökad bränsleförbrukning under NO_x regenereringen (vilken kan vara samtidig som regenereringen av ev. partikelfilter). En ökning av bränsleförbrukningen med 2% har antagits nödvändig för att klara regenereringen av NO_x fällan. Samma faktor har också använts för de dieselmotorer som drivs med andra bränslen än dieselolja eftersom även dessa måste använda samma typ av katalysatorer.

Syntetiskt kolvätebränsle

Ett syntetiskt kolväte har flera egenskaper som skiljer sig från konventionellt dieselbränsle. Bildningen av NO_x och partiklar är mindre. Bränslet är helt svavelfritt, vilket är en stor fördel när det gäller att åstadkomma en effektiv efterbehandling. Genom att bränslet ej heller innehåller polycykliska aromatiska kolväten (PAH), diolefiner och cykloparaffiner torde de hälsofarliga emissionerna vara lägre än för dieselolja av miljöklass 1. Densiteten för det syntetiska dieselbränslet är lägre än för både Mk1 och konventionell dieselolja, vilket minskar effekten i motorn ifall man inte kompenserar för detta. Det syntetiska bränslet kan också med fördel blandas in i konventionell dieselolja och kan faktiskt ha ett högre ekonomiskt värde vid en sådan användning än som en separat drivmedelskvalitet. Denna användning kan också tolkas som en viss bränsleflexibilitet för det syntetiska kolvätet.

DME

DME är ett "naturligt" dieselmotorbränsle i och med det höga cetantalet. Därigenom kan samma verkningsgrad åstadkommas som med dieselbränsle i en dieselmotor som anpassats för DME. Lägre NO_x emissioner än för dieselolja har konstaterats i flera studier. Bättre förutsättningar finns också för att använda höga mängder EGR, vilket leder till en lägre NO_x emissioner än för dieselolja. Även NO_x rening med NO_x lagrande katalysator torde ha förutsättningar för att fungera väl med ledning av det tämligen begränsade underlag som finns tillgängligt.

En motor för DME kan inte göras bränsleflexibel utan alltför stora kompromisser och till en rimlig kostnad. Detta är naturligtvis en väsentlig nackdel under en introduktionsfas och speciellt gäller detta för en allmän användning av bränslet som är fallet med personbilarna.

Etanol och metanol

Erfarenheterna från tunga fordon har visat att etanol och metanol även kan användas i dieselmotorer. En extern tändhjälp med glödstift förutsätts för att tändförbättrare skall kunna undvikas. Trots att en snabb utveckling skett för glödstift till dieseloljedrivna personbilar är det troligt att ytterligare utveckling är nödvändig för att detta alternativ skall bli tillförlitligt och erhålla tillräcklig livslängd. Nödvändigheten av tändhjälp i alkoholdrivna dieselmotorer är naturligtvis en nackdel jämfört med DME.

NO_x emissionerna blir lägre för alkoholer än för dieselolja samtidigt som mer EGR kan användas, vilket ger ännu lägre NO_x emissioner. Viss risk för ökning av partikelemissioner när EGR används, vilket har kunnat skönjas i tester på tunga motorer med etanol. Det är osäkert ifall samma problem föreligger för metanol men rent teoretiskt borde denna molekyl vara bättre än etanol i detta fall genom avsaknaden av kol-kol bindningar och genom att metanol innehåller procentuellt sett mer syre än etanol. En NO_x lagrande katalysator borde ha stora förutsättningar för att fungera bra med metanol, enligt de få testresultat som finns. Även etanol har förutsättningar att fungera men är inte riktigt lika väl lämpat som reduktionsmedel vid regenereringen av katalysatorn.

På samma sätt som för DME finns inga realistiska praktiska möjligheter att göra alkoholmotorerna bränsleflexibla.

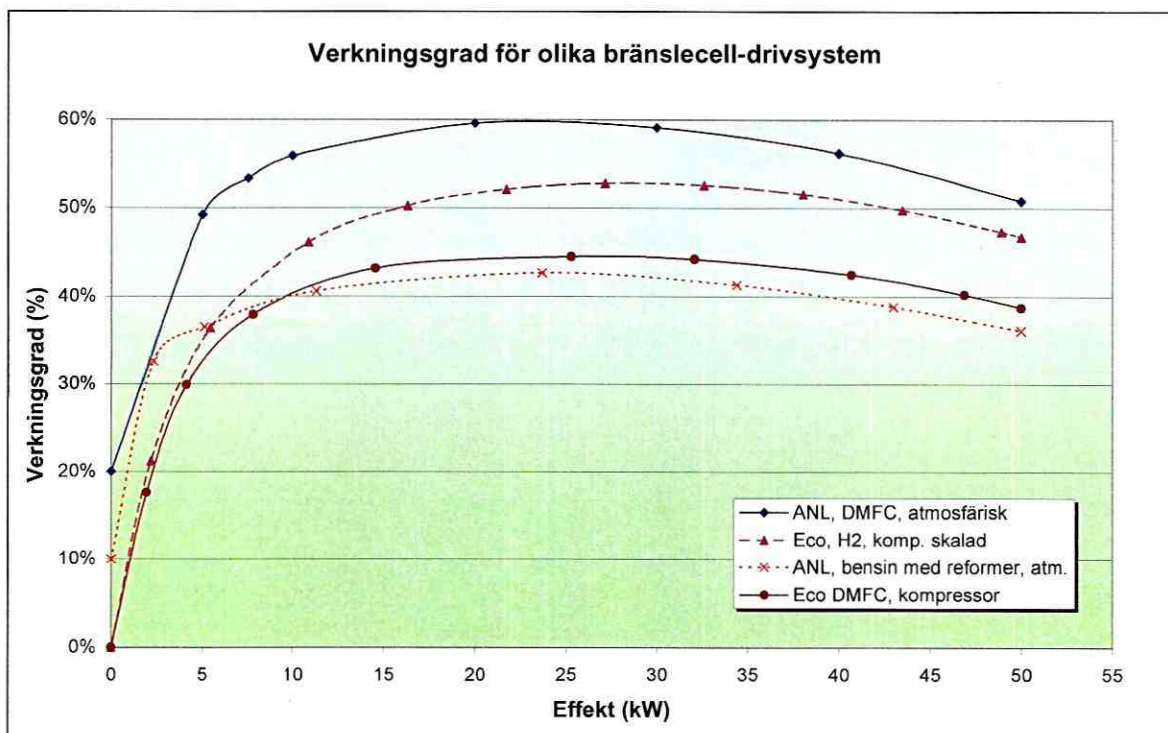
4.6.5 Bränslecell – direktdrift

En bränslecell i Advisor® programmet har primärt använts som underlagsdata för simuleringen av bränslecelldriften. Detta underlag baseras i sin tur på experimentella data för en prototyp till en bränslecell som utvecklats av laboratoriet ANL i USA. Modellen i Advisor® ger en maximal nettoverkningsgrad inklusive hjälpaggregat på hela 60%, vilket är en av de högsta siffror som publicerats för bränslecellsaggregat (verkningsgraden för en enskild cell utan kringutrustning är i och för sig alltid högre).

En speciell egenhet för den bränslecell som används i Advisor® är dock att verkningsgraden vid nolleffektuttag ligger på ca 20%, vilket är en omöjlighet rent tekniskt¹¹ (i analogi med evighetsmaskiner). Vidare är bränslecellen atmosfärisk, vilket skulle medföra ett stort och dyrt aggregat (mycket platina). Ett mer realistiskt aggregat använder ett trycksatt system, vilket i sin tur kräver en kompressor-expander med tillhörande (elektrisk) drivning. Det torde vara oundvikligt att ett system för fordonsdrift får ytterligare "parasitiska" förluster jämfört med den tämligen ideala modellen i Advisor®. En ny modell för en bränslecell har därför beräknats med förutsättningen att förlusteffekten uppgår till 4 kW vid full effekt (50 kW) och 2 kW vid nolleffekt. En uppskalning av systemet för att nå samma effekt som tidigare (50 kW) är nödvändig för att kompensera för de tillkommande parasitiska förlusterna. I **Figur 6** har verkningsgraderna för några olika bränsleceller plottats.

Den direktdrivna bränslecellen har inget stort batteri och måste därför dimensioneras för hela effektbehovet, vilket leder till att drivsystemet måste skalas upp till drygt 66 kW. Vidare kan inte bromsenergin tas tillvara. Därför blir den totala verkningsgraden något lägre än för ett bränslecellsystem med ett större batteri (hybridsystem). Ifall inte en tillräckligt kort uppstartningstid kan åstadkommas finns ingen praktisk möjlighet att klara sig utan stort batteri och den direktdrivna bränslecellen måste då överges till förmån för bränslecellhybriden.

¹¹ När lasten är noll måste verkningsgraden per definition vara noll.



Figur 6. Verkningsgrad för bränsleceller

Generellt ser man i **Figur 6** att verkningsgraden för bränslecellerna är hög vid låga laster. Det framgår också av figuren att försämringen på grund av de "parasitiska" förlusterna är proportionellt större för de låga lasterna i den bränslecell som använts i simuleringarna ("Eco, H₂, komp. skalad" i figuren). I figuren visas även en bränslecell med bensinreformer från ANL och en bränslecell med internreformer för metanol (DMFC) där verkningsgraden uppskattats av Ecotrafic.

4.6.6 Bränslecell – hybrid

Samma modell som för den direktdrivna bränslecellen har använts men effekten har reducerats till ca hälften, dvs. 35 kW, jämfört med den direktdrivna bränslecellen.

Batterier med samma prestanda som för övriga hybridsystem har förutsatts men eftersom effektbehovet är större krävs också större batterier. Eftersom uppstartningstiden för en bränslecell troligen blir lång (speciellt med om reformer används) kan inte maximal effekt erhållas vid start och en viss risk finns för att en större batterikapacitet kan krävas än den vi förutsatt.

4.6.7 Bränslecell – internreformer (DMFC)

I dag finns mycket lite information om direktmetanolceller (DMFC) och deras prestanda. Hittills har de verkningsgrader som rapporterats ofta varit mycket låga (sällan över 15%) men viss förhoppning om en maximalverkningsgrad över 40% verkar finnas med ny teknik. Stora framsteg har således gjorts de senaste åren och detta alternativ kan därför inte förbises. Den verkningsgrad som vi förutsatt för DMFC bränslecellen skall naturligtvis ses som en kvalificerad gissning. Under förutsättning att en hög verkningsgrad för denna bränslecell kunde åstadkommas i framtiden vore detta alternativ en mycket intressant lös-

ning eftersom den ger ett enklare system än en bränslecell som kräver reformer. Tekniken kan bara tillämpas på metanol och andra drivmedel är således ointressanta för DMFC.

4.7 Total systemeffektivitet

Det totala antalet kombinationer av råvara, drivmedel, energiomvandlare och drivsystem som undersökts är 98 st., varav 6 representerar konventionella drivmedel som bensen (4) och dieselolja (2). Det är svårt att göra en överskådlig sammanställning av alla dessa data. Vi har valt att göra en huvudindelning i alternativen i gasformiga och flytande drivmedel som i sin tur delats in enligt den råvara som använts för drivmedlen. Totalt har alltså resultaten sammanfattats i 4 olika tabeller och som komplement visas också diagram för ett antal utvalda alternativ. För att förenkla redovisningen av resultaten har de olika delstegen i systemet sammanförts till följande olika delsteg:

- Produktion ("Prod.") som innefattar stegen: råvaruproduktion, råvarutransport och produktion av drivmedel
- Distribution, lokal reformering (i förekommande fall) och tankning ("Distr".)
- Reformering ("Ref.") av bränslet i fordonet
- Drivsystemet ("Drivsyst.") som innefattar energiomvandlaren (motorn) och resten av drivsystemet (mekaniskt eller elektriskt)
- Total systemeffektivitet ("Totalt")
- Relativ (Rel.) systemverkningsgrad i jämförelse med bensen (=1)

De 4 första stegen i kedjan är logiska delsteg i livscykeln och dessutom visas den totala systemeffektiviteten. Ytterligare ett jämförelsetal visas och det är en relativ jämförelse mellan respektive alternativ med en bensindriven bil med ett konventionellt drivsystem (Rel.). Det bör också påpekas att verkningsgraden i drivsystemet inte är den verkningsgrad som erhålls direkt från simuleringsprogrammet. Att använda en sådan jämförelse vore inte relevant i detta fall eftersom man då inte skulle ta hänsyn till att vikten varierar mellan de olika fordonen. Istället har en "korrigerad" verkningsgrad använts, vilken utgår från den energi som används i fordonet och ställer denna i relation till den energianvändning och verkningsgrad som ett konventionellt drivsystem har.

För att beräkna verkningsgraden i fordonet har vi summerat den energi som används för att övervinna rullmotstånd, luftmotstånd och det som förloras i rörelseenergi som inte kan tas tillvara (bromsning). Förhållandet mellan denna summa och energin i använt bränsle ger verkningsgraden för hela drivsystemet. Andra definitioner av verkningsgrad används ibland och exempelvis Advisor® använder en definition som inte tar med den sistnämnda termen.

4.7.1 Gasformiga drivmedel

Råvara: naturgas

I **Tabell 6** visas systemverkningsgraden för gasformiga drivmedel där dessa framställts från fossil naturgas. Vissa slutsatser är mer eller mindre generella och därför tas de upp enbart för denna tabell och inte för de tabeller som visas senare.

Tabell 6. Systemverkningsgrader för gasformiga drivmedel från fossil naturgas

				Verkningsgrader					
	Bränsle	En omv.	Drivsyst.	Prod	Distr.	Reform.	Drivsys.	Totalt	Rel.
Olja	Bensin	Otto	Konv.	0,841	0,986	1,000	0,149	0,124	1,000
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,841	0,986	1,000	0,185	0,153	1,240
	– ⌘	FC	Direkt	0,841	0,986	0,780	0,226	0,146	1,184
	– ⌘	FC	Hybrid	0,841	0,986	0,780	0,235	0,152	1,228
	Diesel	Diesel	Konv.	0,888	0,990	1,000	0,176	0,155	1,250
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,888	0,990	1,000	0,212	0,186	1,507
Gasformiga bränslen från fossil naturgas	Metan, CNG	Otto	Konv.	0,957	0,909	1,000	0,149	0,129	1,045
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,957	0,909	1,000	0,182	0,159	1,281
	– ⌘	FC	Direkt	0,957	0,909	0,780	0,226	0,154	1,241
	– ⌘	FC	Hybrid	0,957	0,909	0,780	0,235	0,159	1,288
	Metan, LNG	Otto	Konv.	0,887	0,963	1,000	0,149	0,127	1,027
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,887	0,963	1,000	0,182	0,156	1,259
	– ⌘	FC	Direkt	0,887	0,963	0,780	0,226	0,151	1,220
	– ⌘	FC	Hybrid	0,887	0,963	0,780	0,235	0,157	1,266
	Vätgas, GH2	Otto	Konv.	0,770	0,794	1,000	0,149	0,091	0,735
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,770	0,794	1,000	0,182	0,111	0,901
	– ⌘	FC	Direkt	0,770	0,794	1,000	0,226	0,138	1,119
	– ⌘	FC	Hybrid	0,770	0,794	1,000	0,235	0,144	1,161
	Vätgas, LH2	Otto	Konv.	0,471	0,916	1,000	0,149	0,064	0,518
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,471	0,916	1,000	0,182	0,079	0,635
	– ⌘	FC	Direkt	0,471	0,916	1,000	0,226	0,098	0,789
	– ⌘	FC	Hybrid	0,471	0,916	1,000	0,235	0,101	0,819
	El, vätgas, GH2	Otto	Konv.	0,451	0,820	1,000	0,149	0,055	0,444
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,451	0,820	1,000	0,182	0,067	0,544
	– ⌘	FC	Direkt	0,451	0,820	1,000	0,226	0,084	0,676
	– ⌘	FC	Hybrid	0,451	0,820	1,000	0,235	0,087	0,702
	DME, GH2	Otto	Konv.	0,754	0,641	1,000	0,149	0,072	0,581
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,754	0,641	1,000	0,182	0,088	0,712
	– ⌘	FC	Direkt	0,754	0,641	1,000	0,226	0,109	0,884
	– ⌘	FC	Hybrid	0,754	0,641	1,000	0,235	0,114	0,917
	DME	Diesel	Konv.	0,725	0,967	1,000	0,176	0,123	0,997
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,725	0,967	1,000	0,212	0,149	1,202
	– ⌘	FC	Direkt	0,725	0,967	0,840	0,226	0,133	1,078
	– ⌘	FC	Hybrid	0,725	0,967	0,840	0,242	0,143	1,153

Av resultaten i **Tabell 6** för gasformiga bränslen från naturgas och för de konventionella drivmedlen bensin och dieselolja kan följande slutsatser dras:

- Elhybrider med motorer drivna med bensin- och dieselolja har generellt högre verkningsgrad än de konventionella drivsystemen. Samma generella slutsats gäller också för alla andra drivmedel i samma motorer. Den relativa fördelen med hybridisering är något större för ottomotorer än för dieselmotorer. Fördelen av hybridisering är inte lika stor för bränsleceller som för kolvmotorer.
- Bränslecellen är den energiomvandlare som har högst verkningsgrad och ger i kombination med ett hybriddrivsystem också den högsta verkningsgraden för hela drivsystemet. Bland energiomvandlarna följer därnäst dieselmotorer och sist ottomotorer. Det kan dock vara värt att notera att skillnaden i verkningsgrad för det bästa drivsystemet med en kolvmotor (dieselmotorhybrid) inte är speciellt mycket lägre än för en vätgasdriven bränslecell (21,2% jämfört med 23,5%). Den relativa skillnaden är därmed inte mer än 10% till bränslecellens fördel. Detta kan tyckas kontroversiellt men stämmer ganska väl med uppskattningarna från PNGV programmet ovan (**Figur 4**). De förbättringar med en faktor 2 – 3 som ofta brukat citeras för bränsleceller ter sig ganska osannolika i jämförelse med våra resultat och resultaten från PNGV programmet. En orsak till att skillnaderna blir förhållandevis små i vårt fall beror på att vi i detta fall jämför hybridsystem i båda fallen och att vi dessutom förutsatt att förbränningsmotorerna kommer att utvecklas vidare i framtiden. Eftersom bränsleceller ännu inte kommersialiserats i stor skala bör man göra jämförelsen i ett framtida perspektiv. Man kan också notera att medelverkningsgraden (i hela körcykeln) för energiomvandlaren är hela 43,3% för bränslecellen men ”endast” 29,6% för dieselmotorn och 26,1% för den bensindrivna ottomotorn (något högre för alkoholer). Genom att bränslecellen är en seriehybrid med väsentligt lägre verkningsgrad i eldrivsystemet i jämförelse med en parallellhybrid, samtidigt som vikten blir högre för fordonet med bränslecell, reduceras fördelen markant jämfört med kolvmotorerna.
- Den totala verkningsgraden är väsentligt högre för dieselolja än för bensin. Dels beroende på den högre verkningsgraden i motorn, dels beroende på en högre verkningsgrad i bränsleproduktionen. Den relativa skillnaden mellan motortyperna är för det konventionella drivsystemet 12,7% och för hybridsystemet 15,2% – i båda fallen givetvis till dieselmotorns fördel. Detta är väsentligt mindre än den skillnad på 18,1% för dagens jämförbara bensin- och dieslbilar (endast konventionella drivsystem) som en ny utvärdering (september 2000) av uppdaterat underlagsmaterial till den tidigare citerade rapporten [2] givit som resultat.
- Användning av metan som CNG har den högsta verkningsgraden av alla bränslen som baseras på naturgas. Systemverkningsgraden för CNG i en ottomotorhybrid och i en bränslecellhybrid är praktiskt taget densamma. Att inte bränslecellen blir bättre beror på förlusterna vid omvandlingen i reformern – en förlust som förbränningsmotorn inte har. Metan i form av LNG är inte mycket sämre än CNG. Orsaken till detta förhållande är att det stora kompressionsarbetet för CNG som i princip motsvarar förlusterna vid förvätskningen av naturgasen till LNG. Tankningen av LNG medför inte samma förluster som CNG.
- Vätgas från naturgas (GH_2) är ett betydligt sämre alternativ för ottomotorer än att använda naturgasen (som CNG) direkt i dessa. Bränsleceller ger ett bättre resultat men verkningsgraden blir dock lägre än för CNG och LNG i ottomotor. Trots det är vätgas

som används i bränsleceller det bästa av alternativen som använder vätgas från naturgas. Vätgas från el är det sämsta av vätgasalternativen och närmast följer vätgas i form av LH_2 och vätgas distribuerad som DME där reformeringen sker i anslutning till tankanläggningen.

- DME i dieselmotor är bättre än alla vätgasalternativen i ottomotor och därmed bättre än alla alternativ utom några av alternativen som direkt använder metan (CNG och LNG). Den högre verkningsgraden i en dieselmotor kompenserar alltså inte fullt ut förlusterna i omvandlingen av naturgas till DME. DME är marginellt bättre i en dieselmotor än i en bränslecell. Fördelen med DME jämfört med de övriga gasformiga bränslena är att distributionen är enklare. Exempelvis är distribution av vätgas i gasform (rörledning) knappast något som kan vara aktuellt för allmän användning.
- Naturgas som distribueras i form av LNG är ett bränsle som både har en hög verkningsgrad och som inte samtidigt är begränsat till en nisch genom att en distribution i stor skala inte är omöjlig. En storskalig utbyggnad av naturgasnätet i Sverige är knappast trolig men distribution av naturgas i form av LNG vore ett möjligt alternativ för en bredare användning. Tyvärr torde detta alternativ vara dyrt i förhållande till distribution av flytande drivmedel.

Råvara: biomassa

I **Tabell 7** visas systemverkningsgraden för gasformiga drivmedel där dessa framställts från biomassa. Resultaten för drivsystemen och för de konventionella drivmedlen är desamma så här beskrivs bara de specifika resultaten för de flytande drivmedlen. Följande slutsatser kan dras:

- I detta fall måste metan (biogas, eller CBG och SNG) framställas från biomassan genom omvandling, vilket inte var fallet för naturgas enligt ovan. Därigenom blir verkningsgraderna generellt betydligt lägre med biomassa som råvara och därför är metan inte ett av de bästa alternativen i detta fall. SNG är något sämre än biogas (CBG).
- Vätgas i bränslecell där vätgasen distribueras i gasform är det bästa vätgasalternativet och det näst bästa alternativet (efter DME i dieselmotor) av alla undersökta alternativ. Samtidigt måste man konstatera att en distribution av vätgas för allmän användning knappast är ett särskilt tilltalande alternativ. Samma relativa förhållanden som för alternativen för gasformig vätgas gäller också för vätgas som distribueras i flytande form (LH_2), liksom DME och distribution via el. Det sista alternativet (el) är det sämsta av alla alternativen med biomassa som råvara. Distributionen är dock inget större problem för detta alternativ till skillnad från de övriga alternativen att distribuera vätgas eller enkla vätebärare i gasform.
- DME i dieselmotor är det bästa av alla alternativen med DME som bränsle och samtidigt det bästa av alla alternativ för gasformiga bränslen med biomassa som råvara. Bränslecellen ger en lägre systemverkningsgrad än dieselmotorn på grund av nödvändigheten att omvandla DME till vätgas i fordonet.
- Generellt är systemverkningsgraderna lägre för drivmedlen med biomassa som råvara jämfört med drivmedel som producerats från naturgas eller råolja. Detta är naturligt eftersom omvandlingarna i det förra fallet är svårare (dvs. man får större förluster) beroende på råvarans karaktär.

Tabell 7. Systemverkningsgrader för gasformiga drivmedel från biomassa

	Bränsle	En omv.	Drivsyst.	Verkningsgrader					
				Prod	Distr.	Reform.	Drivsyst.	Totalt	Rel.
Olja	Bensin	Otto	Konv.	0,841	0,986	1,000	0,149	0,124	1,000
	– %	Otto	Hybrid	0,841	0,986	1,000	0,185	0,153	1,240
	– %	FC	Direkt	0,841	0,986	0,780	0,226	0,146	1,184
	– %	FC	Hybrid	0,841	0,986	0,780	0,235	0,152	1,228
	Diesel	Diesel	Konv.	0,888	0,990	1,000	0,176	0,155	1,250
	– %	Diesel	Hybrid	0,888	0,990	1,000	0,212	0,186	1,507
Gasformiga bränslen från biomassa	Metan, CBG	Otto	Konv.	0,527	0,917	1,000	0,149	0,072	0,581
	– %	Otto	Hybrid	0,527	0,917	1,000	0,182	0,088	0,712
	– %	FC	Direkt	0,527	0,917	0,780	0,226	0,085	0,690
	– %	FC	Hybrid	0,527	0,917	0,780	0,235	0,089	0,716
	Metan, SNG	Otto	Konv.	0,502	0,909	1,000	0,149	0,068	0,549
	– %	Otto	Hybrid	0,502	0,909	1,000	0,182	0,083	0,673
	– %	FC	Direkt	0,502	0,909	0,780	0,226	0,081	0,652
	– %	FC	Hybrid	0,502	0,909	0,780	0,235	0,084	0,676
	Vätgas, GH2	Otto	Konv.	0,598	0,800	1,000	0,149	0,071	0,575
	– %	Otto	Hybrid	0,598	0,800	1,000	0,182	0,087	0,705
	– %	FC	Direkt	0,598	0,800	1,000	0,226	0,108	0,876
	– %	FC	Hybrid	0,598	0,800	1,000	0,235	0,112	0,909
	Vätgas, LH2	Otto	Konv.	0,436	0,950	1,000	0,149	0,062	0,498
	– %	Otto	Hybrid	0,436	0,950	1,000	0,182	0,075	0,610
	– %	FC	Direkt	0,436	0,950	1,000	0,226	0,094	0,758
	– %	FC	Hybrid	0,436	0,950	1,000	0,235	0,097	0,786
	El, vätgas, GH2	Otto	Konv.	0,375	0,820	1,000	0,149	0,046	0,370
	– %	Otto	Hybrid	0,375	0,820	1,000	0,182	0,056	0,453
	– %	FC	Direkt	0,375	0,820	1,000	0,226	0,070	0,563
	– %	FC	Hybrid	0,375	0,820	1,000	0,235	0,072	0,584
	DME, GH2	Otto	Konv.	0,586	0,650	1,000	0,149	0,057	0,458
	– %	Otto	Hybrid	0,586	0,650	1,000	0,182	0,069	0,561
	– %	FC	Direkt	0,586	0,650	1,000	0,226	0,086	0,697
	– %	FC	Hybrid	0,586	0,650	1,000	0,235	0,090	0,724
	DME	Diesel	Konv.	0,550	0,980	1,000	0,176	0,095	0,767
	– %	Diesel	Hybrid	0,550	0,980	1,000	0,212	0,114	0,925
	– %	FC	Direkt	0,550	0,980	0,840	0,226	0,103	0,829
	– %	FC	Hybrid	0,550	0,980	0,840	0,242	0,110	0,887

4.7.2 Flytande drivmedel

Råvara: naturgas

I **Tabell 8** visas systemverkningsgraden för flytande drivmedel från fossil naturgas. Drivmedelsalternativen är i detta fall färre än i för de gasformiga bränslena ovan och baserar sig i båda fallen (syntetiskt bränsle och metanol) på produktionsvägen via syntesgas.

Tabell 8. Systemverkningsgrader för flytande drivmedel från fossil naturgas

				Verkningsgrader					
	Bränsle	En omv.	Drivsyst.	Prod	Distr.	Reform.	Drivsys.	Totalt	Rel.
Olja	Bensin	Otto	Konv.	0,841	0,986	1,000	0,149	0,124	1,000
	– ⚡	Otto	Hybrid	0,841	0,986	1,000	0,185	0,153	1,240
	– ⚡	FC	Direkt	0,841	0,986	0,780	0,226	0,146	1,184
	– ⚡	FC	Hybrid	0,841	0,986	0,780	0,235	0,152	1,228
	Diesel	Diesel	Konv.	0,888	0,990	1,000	0,176	0,155	1,250
	– ⚡	Diesel	Hybrid	0,888	0,990	1,000	0,212	0,186	1,507
Flytande bränslen från fossil naturgas	Syn bränsle	Diesel	Konv.	0,556	0,989	1,000	0,176	0,097	0,782
	– ⚡	Diesel	Hybrid	0,556	0,989	1,000	0,212	0,117	0,943
	– ⚡	FC	Direkt	0,556	0,989	0,780	0,226	0,097	0,785
	– ⚡	FC	Hybrid	0,556	0,989	0,780	0,235	0,101	0,815
	Metanol	Otto	Konv.	0,688	0,978	1,000	0,162	0,109	0,883
	– ⚡	Otto	Hybrid	0,688	0,978	1,000	0,201	0,135	1,095
	– ⚡	Diesel	Konv.	0,688	0,978	1,000	0,176	0,118	0,957
	– ⚡	Diesel	Hybrid	0,688	0,978	1,000	0,212	0,143	1,154
	– ⚡	FC	Direkt	0,688	0,978	0,860	0,230	0,133	1,075
	– ⚡	FC	Hybrid	0,688	0,978	0,860	0,242	0,140	1,132
	– ⚡	DMFC	Hybrid	0,688	0,978	1,000	0,172	0,116	0,938
	Metanol, GH2	Otto	Konv.	0,719	0,661	1,000	0,149	0,071	0,571
	– ⚡	Otto	Hybrid	0,719	0,661	1,000	0,182	0,087	0,700
	– ⚡	FC	Direkt	0,719	0,661	1,000	0,230	0,109	0,883
	– ⚡	FC	Hybrid	0,719	0,661	1,000	0,242	0,115	0,930

Följande slutsatser från **Tabell 8** kan dras:

- Skillnaden i verkningsgrad mellan otto- och dieselmotorer är mindre för alkoholerna än i fallet med bensin respektive dieselolja. Detta beror helt enkelt på att verkningsgraden i motorn är högre för alkoholerna än för bensin när en ottomotor används medan samma verkningsgrad har förutsatts för båda kategorierna av drivmedel i dieselmotorfallet.
- Metanol har generellt den högsta verkningsgraden av alla drivmedlen. Den bästa drivsystemkombinationen är en dieselhybrid men en bränslecell i ett hybridsystem är inte mycket sämre.
- Bränslecellen för direktreformering av metanol (DMFC) är sämre än de båda övriga bränslecellalternativen som körs på metanol men här råder en stor osäkerhet om hur

hög verkningsgrad som egentligen kan åstadkommas för ett praktiskt system med denna typ av bränslecell. Den relativt sett höga vikten för fordonet är en av orsakerna till det förhållandevis dåliga resultatet och frågan är i vilken omfattning vikten kan minskas i framtiden.

- Det syntetiska bränslet har generellt en lägre systemverkningsgrad än metanol beroende på en lägre verkningsgrad vid produktionen och en lägre verkningsgrad i reformern i bränslecellen i jämförelse med reformering av metanol.
- Vätgas från metanol där reformeringen sker i en separat tankanläggning, är sämre än att reformera metanolen ombord på fordonet. Detta kan verka förvånande men beror helt enkelt på att en reformer i ett fordon får en högre verkningsgrad eftersom den kan integreras i bränslecellsystemet och därmed använda spillenergi (värme) och gas från anoden som ej omsatts. En reformering i en tankanläggning har inte samma möjligheter till optimering av systemet som när reformern används i en bränslecell. Dock kan vissa möjligheter finnas till användning av spillenergi men detta har inte inkluderats i beräkningarna eftersom tankanläggningen förutsatts vara fristående.
- Ottomotorerna drivna med vätgas producerad från metanol i lokal reformering har den lägsta systemverkningsgraden av alla kombinationerna som använder flytande drivmedel från naturgas.

Råvara: biomassa

I **Tabell 9** visas systemverkningsgraden för flytande drivmedel från biomassa. Drivmedelsalternativen är i detta fall färre än i gasalternativet ovan och baserar sig i två av fallen på vägen via syntesgas (syntetiskt bränsle och metanol) och i ett fall på jäsning (etanol). Vissa av de generella slutsatserna om drivsystemen är desamma som för naturgas som råvara.

- Metanol är det drivmedel som har den högsta systemverkningsgraden av alla flytande drivmedel från biomassa. Verkningsgraden för dieselmotorhybrid är något högre än för bränslecell med detta bränsle. Vid direktdrift blir förhållandet det omvända, dvs. bränslecellen är bättre än dieselmotorn. Ottomotorn har som väntat lägre verkningsgrad än bränslecellen med hybridssystem i båda fallen men skillnaden (0,831 jfr. med 0,860) är inte påfallande stor och tycks vara ett fall där ottomotorn är acceptabel ur effektivitetssynpunkt. Direktmetanolcellen (DMFC) är sämre än bränslecellen med reformering och dessutom sämre än kolvmotorerna.
- Etanol i både dieselmotor och bränslecell har lägre systemverkningsgrad än metanol. I jämförelse med det syntetiska bränslet är dock etanolen något bättre (både med dieselmotor och bränslecell).
- Det syntetiska bränslet har generellt sett sämre systemverkningsgrad i jämförelse med metanol. Även i de fall man jämför dieselmotor för det syntetiska bränslet med ottomotor för metanol når inte det syntetiska bränslet samma verkningsgrad.
- Vätgas i ottomotor där vätgasen genererats genom reformering från metanol vid tankstället har den sämsta systemverkningsgraden av alla alternativ som distribueras som flytande bränslen (vätgas från el är i och för sig ännu sämre, se ovan). Detta är inte speciellt förvånande eftersom detta alternativ knappast är aktuellt av praktiska skäl. I bränslecell förbättras dock systemverkningsgraden och den är faktiskt högre än för alternativ som etanol och syntetiskt bränsle i bränslecell.

Tabell 9. Systemverkningsgrader för flytande drivmedel från biomassa

				Verkningsgrader					
	Bränsle	En omv.	Drivsyst.	Prod	Distr.	Reform.	Drivsyst.	Totalt	Rel.
Olja	Bensin	Otto	Konv.	0,841	0,986	1,000	0,149	0,124	1,000
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,841	0,986	1,000	0,185	0,153	1,240
	– ⌘	FC	Direkt	0,841	0,986	0,780	0,226	0,146	1,184
	– ⌘	FC	Hybrid	0,841	0,986	0,780	0,235	0,152	1,228
	Diesel	Diesel	Konv.	0,888	0,990	1,000	0,176	0,155	1,250
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,888	0,990	1,000	0,212	0,186	1,507
Flytande bränslen från biomassa	Syn bränsle	Diesel	Konv.	0,433	0,990	1,000	0,176	0,075	0,610
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,433	0,990	1,000	0,212	0,091	0,735
	– ⌘	FC	Direkt	0,433	0,990	0,780	0,230	0,077	0,621
	– ⌘	FC	Hybrid	0,433	0,990	0,780	0,242	0,081	0,654
	Metanol	Otto	Konv.	0,522	0,980	1,000	0,162	0,083	0,670
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,522	0,980	1,000	0,201	0,103	0,831
	– ⌘	Diesel	Konv.	0,522	0,980	1,000	0,176	0,090	0,727
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,522	0,980	1,000	0,212	0,108	0,877
	– ⌘	FC	Direkt	0,522	0,980	0,860	0,230	0,101	0,816
	– ⌘	FC	Hybrid	0,522	0,980	0,860	0,242	0,106	0,860
	– ⌘	DMFC	Hybrid	0,522	0,980	1,000	0,172	0,088	0,712
	Metanol, GH2	Otto	Konv.	0,562	0,662	1,000	0,149	0,055	0,447
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,562	0,662	1,000	0,182	0,068	0,548
	– ⌘	FC	Direkt	0,562	0,662	1,000	0,230	0,085	0,691
	– ⌘	FC	Hybrid	0,562	0,662	1,000	0,242	0,090	0,728
	Etanol	Otto	Konv.	0,449	0,988	1,000	0,159	0,070	0,570
	– ⌘	Otto	Hybrid	0,449	0,988	1,000	0,197	0,087	0,707
	– ⌘	Diesel	Konv.	0,449	0,988	1,000	0,176	0,078	0,631
	– ⌘	Diesel	Hybrid	0,449	0,988	1,000	0,212	0,094	0,761
	– ⌘	FC	Direkt	0,449	0,988	0,820	0,230	0,084	0,676
	– ⌘	FC	Hybrid	0,449	0,988	0,820	0,242	0,088	0,712

För att erhålla en lite mer överskådlig sammanställning av resultaten i de olika tabellerna ovan visas i två tabeller nedan matriser med data för den relativa energianvändningen (kolumnen längst till höger i tabellerna ovan). Raderna har ordnats efter bästa drivsystem i fallande ordning. Denna rangordning är i och för sig inte helt entydig eftersom verkningsgraden i ottomotorhybrid för de bränslen som är speciellt väl lämpade för ottomotorer faktiskt är högre än för en bränslecell med direktdrift. Resultaten enligt ovan visas i **Tabell 10** (råolja och fossilgas) och **Tabell 11** (biomassa).

Tabell 10. Systemverkningsgrad för system baserade på råolja och fossilgas

DRIVMEDEL, tankat	Bensin	Dieselloolja	DME	Metanol	Etanol	FT-brän	CNG	CNG	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂
DISTRIBUERAT som	Bensin	Dieselloolja	DME	Metanol	Etanol	FT-brän	CNG	LNG	GH ₂	GH ₂	LH	DME	Metanol	EI
Drivsystem	Systemverkningsgrad för råolje-/fossilgasbaserade system relativt den för konventionell bil med bensindriven ottomotor (=100)													
Dieselmotor - hybrid		150,7	120,2	115,4		94,3								
Bränslecell - hybrid			115,3	113,2		81,5	128,8	126,6	116,1	81,9		91,7	93,0	70,2
Bränslecell - direkt			107,8	107,5		78,5	124,1	122,0	111,9	78,9		88,4	88,3	67,6
Ottomotor - hybrid	124,0			109,5			128,1	125,9	90,1	63,5		71,2	70,0	54,4
Dieselmotor – konv.		125,0	99,7	95,7		78,2								
DMFC - hybrid				93,8										
Ottomotor – konv.	100			88,3			104,5	102,7	73,5	51,8		58,1	57,1	44,4

Tabell 11. Systemverkningsgrad för biomassabaserade system

DRIVMEDEL, tankat	Bensin	Dieselloolja	DME	Metanol	Etanol	FT-brän	CBG	SNG	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂	GH ₂
DISTRIBUERAT som	Bensin	Dieselloolja	DME	Metanol	Etanol	FT-brän	CBG	SNG	GH ₂	GH ₂	LH	DME	Metanol	EI
Drivsystem	Systemverkningsgrad för biomassabaserade system relativt den för konventionell bil med bensindriven ottomotor (=100)													
Dieselmotor - hybrid			92,5	87,7	76,1	73,5								
Bränslecell - hybrid			88,7	86,0	71,2	65,4	71,6	67,6	90,9	78,6		72,4	72,8	58,4
Bränslecell - direkt			82,9	81,6	67,6	62,1	69,0	65,2	87,6	75,8		69,7	69,1	56,3
Ottomotor - hybrid				83,1	70,7		71,2	67,3	70,5	61,0		56,1	54,8	45,3
Dieselmotor – konv.			76,7	72,7	63,1	61,0								
DMFC - hybrid				71,2										
Ottomotor – konv.				67,0	57,0		58,1	54,9	57,5	49,8		45,8	44,7	37,0

4.7.3 Högst systemverkningsgrad

Det finns naturligtvis en mängd andra sätt att redovisa resultaten än det sätt som använts ovan. En indelning som kan vara av intresse är att dela in bränslena i nisch- och huvudbränslen. Nischbränslen är enligt vårt kriterium bränslen som inte kan nå mer än 10% av användningen. Vår definition av huvudbränslen är att detta är bränslen som kan komma till bred allmän användning. Sådana bränslen är bränslen som har en bred råvarubas, kan distribueras i flytande form men inte nödvändigtvis användas i flytande form vid slutanvändningen. Som exempel på den sistnämnda varianten kan t.ex. LNG nämnas, vilket distribueras i flytande form men som kan användas som CNG i lätta fordon (och med fördel också som LNG i tunga fordon).

En annan nomenklatur som används är en differentiering mellan bränslen som kan vara "bränsleflexibla" i någon mening. Sådana är bränslen som kan användas i FFV bilar (t.ex. metanol) eller i tvåbränslefordon (t.ex. biogas och bensin i dual-fuel). En annan variant som också inkluderats bland de bränsleflexibla bränslena är syntetiskt kolväte som är blandningsbart med dieselolja i vilka proportioner som helst. Även om egenskaperna för detta bränsle avviker något från dieselolja torde det inte vara omöjligt att utveckla motor och styrsystem för att ta hänsyn till denna skillnad¹². Bränslet kan också användas för låginblandning på liknande sätt som alkoholer i bensin. I brist på bättre benämning har "FFV" använts för alla de ovannämnda varianterna även om man kan notera att dubbla bränslesystem ombord behövs för dual-fuel alternativen. Under en introduktionsfas kan bränsleflexibiliteten vara en viktig egenskap och det är därför av intresse att speciellt redovisa sådana egenskaper.

En indelning i råvara från naturgas och från biomassa har gjorts. För att minska antalet alternativ visas bara de tio bästa kombinationerna av drivmedel, energiomvandlare och drivmedel.

Råvara: naturgas

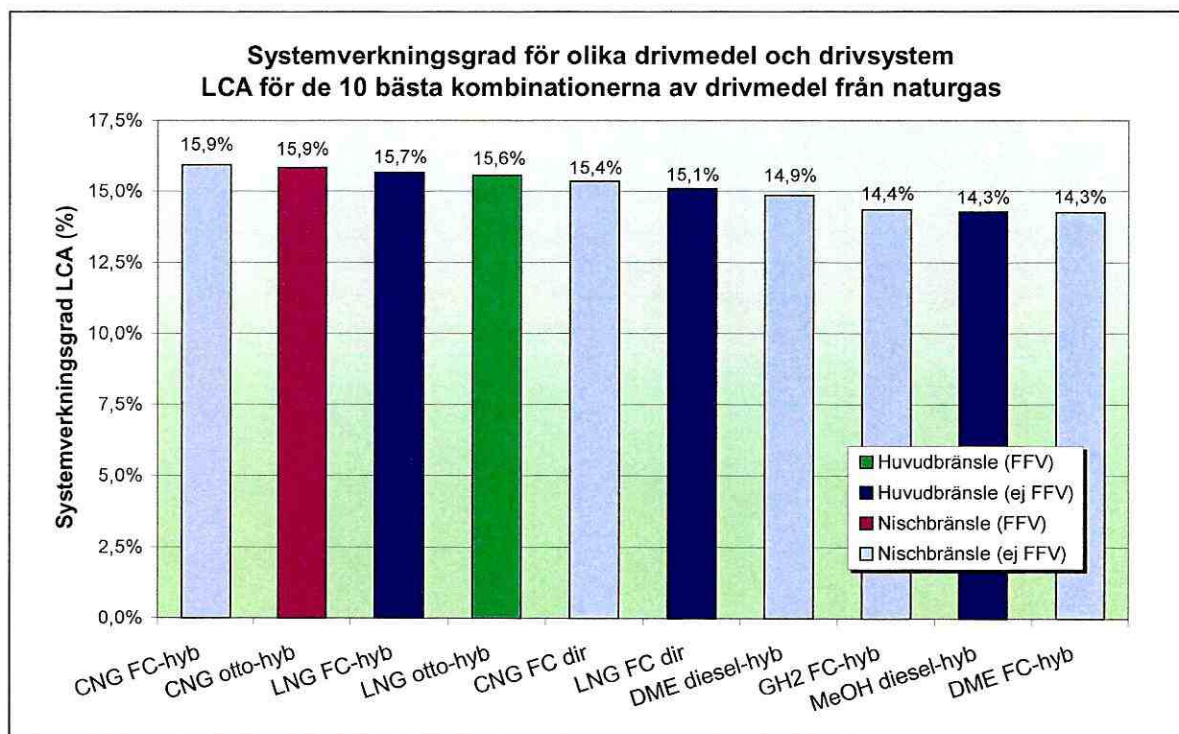
I **Figur 7** visas systemverkningsgraden för de 10 bästa kombinationerna av drivmedel, energiomvandlare och drivsystem för drivmedel från naturgas.

DME i dieselmotor (hybrid och konventionell), vätgas i bränslecellhybrid och metanol i dieselhybrid är också alternativ som finns med på listan över de tio bästa kombinationerna. DME är för övrigt det drivmedel som har högst verkningsgrad av de drivmedel som har ett steg med omvandling i produktionen. Metanol är det enda av dessa drivmedel som är flytande vid normal temperatur och normalt tryck.

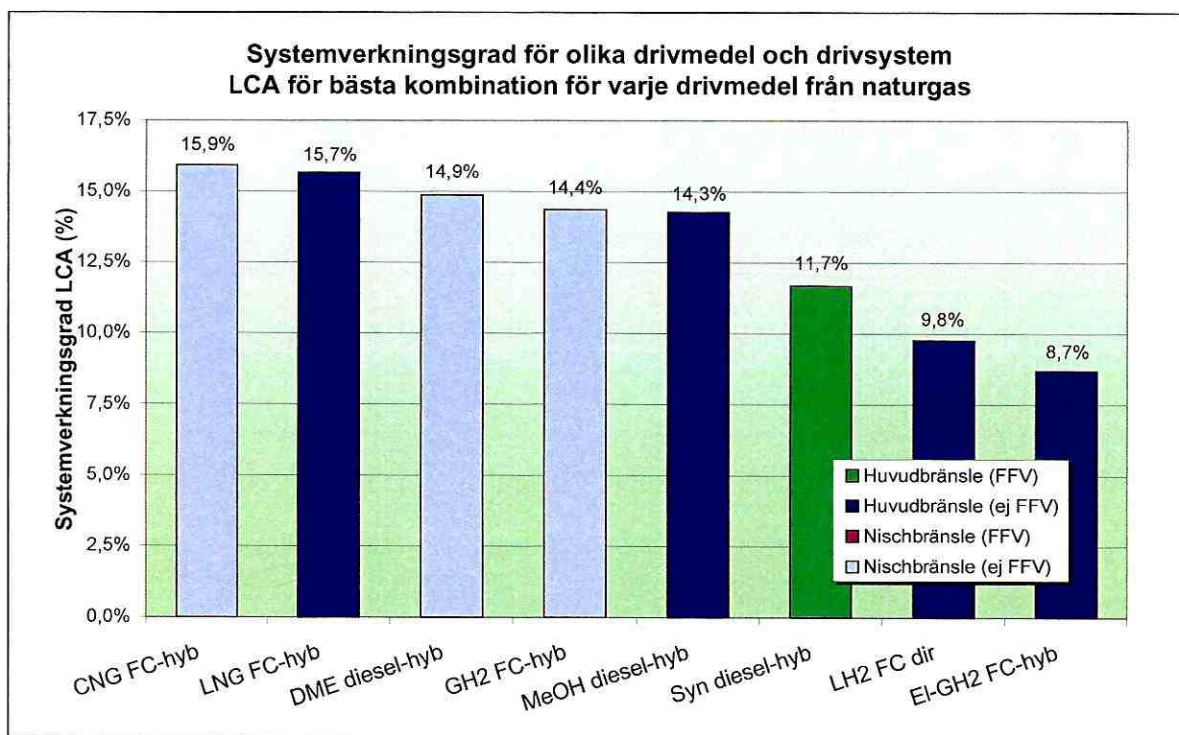
Ytterligare en intressant redovisning är att visa den bästa kombinationen (energiomvandlare och drivsystem) för respektive drivmedel. I **Figur 8** visas en jämförelse mellan dessa alternativ som innefattar 8 st. olika drivmedel för de drivmedel som produceras från naturgas.

Som synes i **Figur 8** är CNG, LNG, DME, GH₂ och metanol de bästa alternativen. Skillnaden mellan dessa drivmedel är inte dramatiskt stor medan syntetiskt bränsle, LH₂ och el har en väsentligt lägre systemverkningsgrad än de först uppräknade drivmedlen.

¹² Sedan detta skrevs har Scania presenterat en motor för tunga fordon vars insprutningssystem (Scania HPI) kan ta hänsyn till mindre skillnader i drivmedlens densitet. Motorn är alltså till viss del bränsleflexibel. Tekniken kan sannolikt appliceras också på andra typer av dieselmotorer.



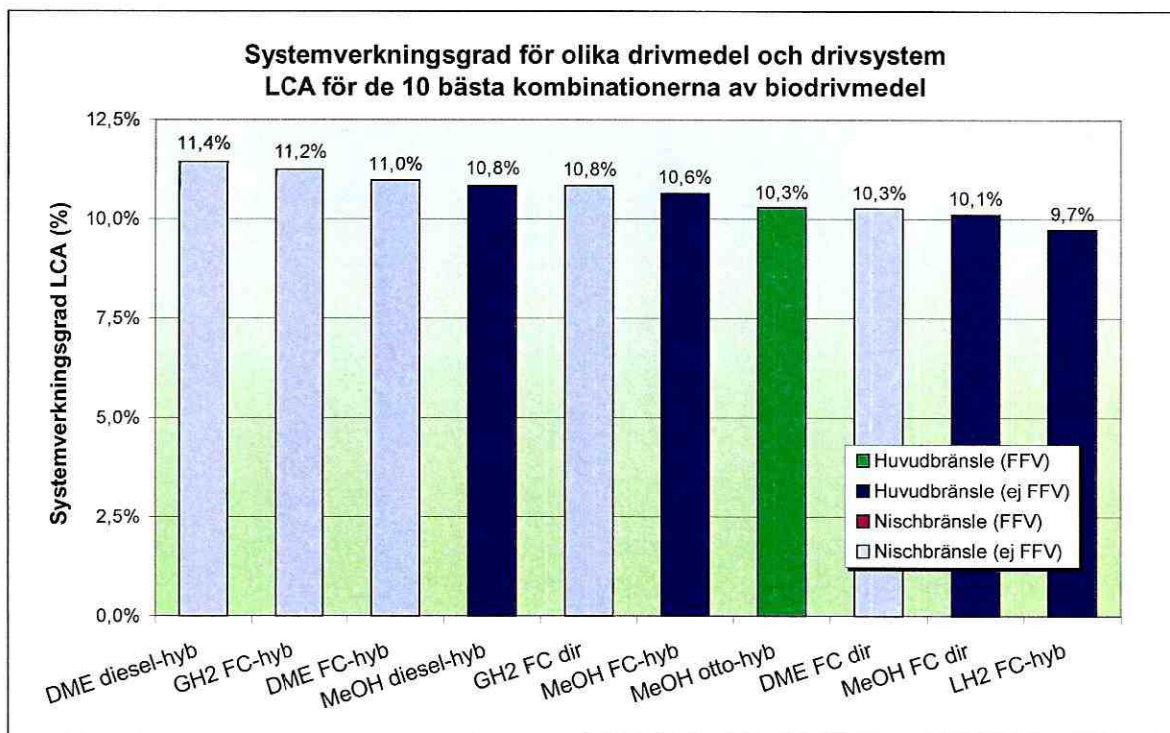
Figur 7. Systemverkningsgrad för de 10 bästa kombinationerna från naturgas



Figur 8. Systemverkningsgrad för den bästa kombination för respektive drivmedel.
Drivmedel med naturgas som råvara

Råvara: biomassa

I **Figur 9** visas systemverkningsgraden för de 10 bästa kombinationerna av drivmedel, energiomvandlare och drivsystem där råvaran för drivmedlen kommer från biomassa. Genom att inte fler än de 10 bästa kombinationerna visas i figuren finns inte alla 4 varianterna enligt ovan med, utan "Nischbränsle (FFV)" saknas.

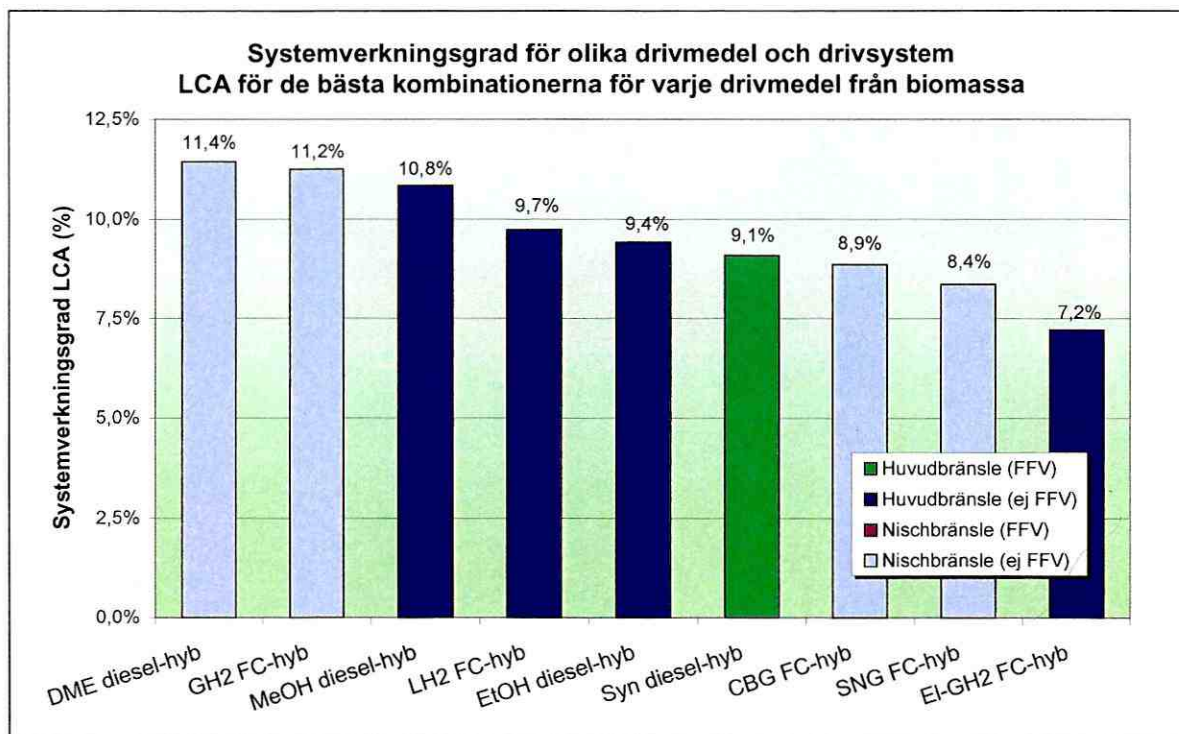


Figur 9. Systemverkningsgrad för de 10 bästa kombinationerna från biomassa

Det kan vara intressant att konstatera att metan som bränsle (biogas och SNG) inte finns med bland de tio bästa kombinationerna där råvaran kommer från biomassa (**Figur 9**). Metan gav ju med fossil naturgas som råvara den högsta systemverkningsgraden. Istället är DME, vätgas och metanol de drivmedel som nu ligger i topp. Återigen kan det vara intressant att konstatera att metanol är det enda av dessa drivmedel som är flytande.

På samma sätt som ovan för drivmedel från naturgas visas i **Figur 10** en jämförelse mellan de bästa alternativen för drivmedel från biomassa. I detta fall är det fråga om 9 olika kombinationer.

Av **Figur 10** framgår att ordningen mellan drivmedlen inte är densamma som för de drivmedel som produceras från fossil naturgas. Exempelvis ligger nu metan i form av CBG och SNG bland de sämsta alternativen – endast el som distributionsform för vätgas är ett sämre alternativ. Grovt indelat kan man hävda att det finns tre olika grupper av drivmedel. Den första innefattar DME, GH₂ och metanol; den andra LH₂, etanol, syntetiskt bränsle biogas och SNG; medan el hamnar i den sista kategorin.



Figur 10. Systemverkningsgrad för den bästa kombination för respektive drivmedel.
Drivmedel med biomassa som råvara

En viktig aspekt som kan avgöra vilket drivmedel som har förutsättningar att bli ett huvudbränsle i framtiden och som samtidigt kan möjliggöra en övergång till biodrivmedel på längre sikt är de drivmedel som har hög systemverkningsgrad *både* med bioråvara och med naturgas som råvara. Av de drivmedel som har den högsta systemverkningsgraden finns DME, GH₂ och metanol bland de 5 bästa på respektive lista (**Figur 8** respektive **Figur 10**). Om man gör ett försök att sammanfatta resultaten borde dessa drivmedel prioriteras högst utifrån kriteriet för en hög systemverkningsgrad med båda typerna av råvara.

I en något vidare tolkning av resultaten, dvs. om de 6 bästa drivmedlen för varje råvara inkluderas, kommer syntetiskt bränsle med bland de 4 högst prioriterade. Det är också intressant att notera att alla dessa drivmedel (3 eller 4, beroende på vilket kriterium som används) baseras på en process som använder förgasning av biomassan i det fall biomassa används som råvara. Processen för framställning av DME och metanol är för övrigt snarlika och dessa drivmedel skulle t.o.m. kunna produceras i en och samma anläggning med en viss merinvestering. Denna strategi kan vara att föredra för en (kommersiell) prototyp- eller demoanläggning eftersom produktion av båda alternativen då skulle kunna undersökas, om än inte simultant.

Det är också viktigt att i en fortsättning på denna utredning komplettera med en analys av kostnaderna för produktion, distribution och användning. Det är möjligt att detta kriterium kan leda till att några alternativ kan strykas eftersom kostnaderna blir orimligt höga för dessa.

En annan viktig aspekt att notera är att alternativ som använder ottomotor som energiomvandlare inte kommer med som "bästa" alternativ för något bränsle. Som beskrivits ovan är ottomotorn den enda energiomvandlaren som på ett tämligen enkelt sätt kan göras bränsleflexibel. Visserligen har det hävdats att en bränslereformer kan göras bränsleflexibel men

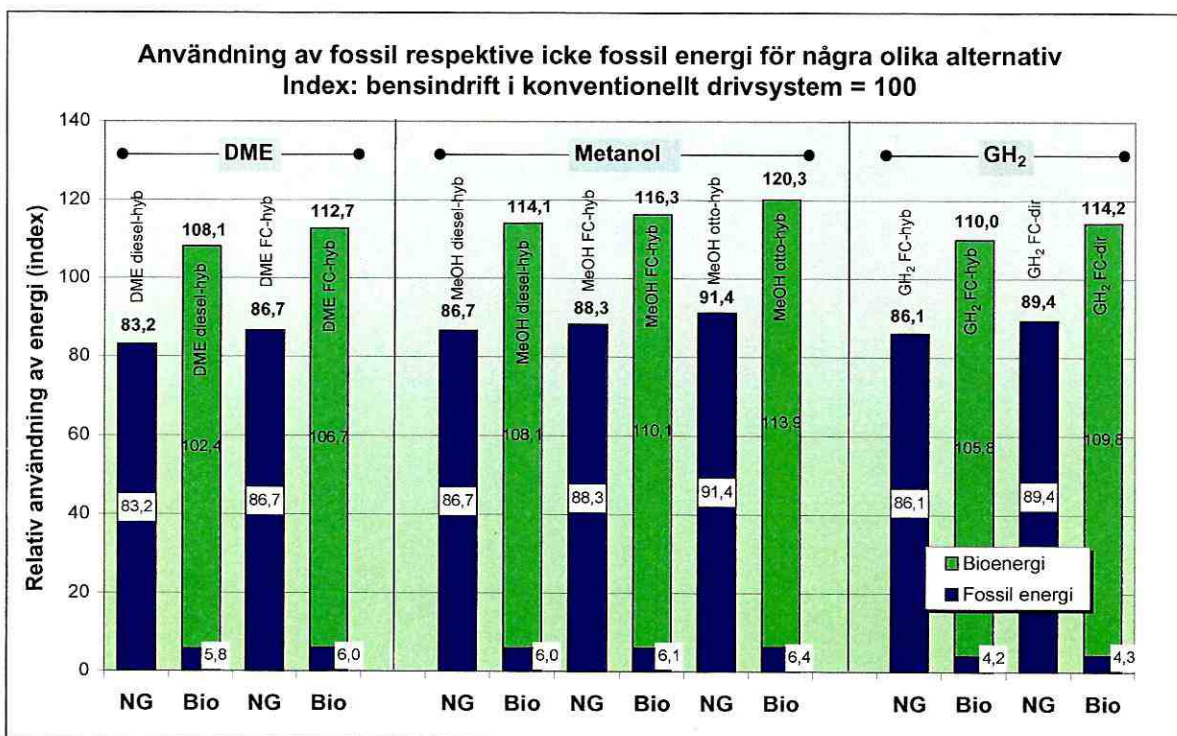
det skulle innebära en väsentlig fördyring att använda en reformer som måste klara så pass komplicerade bränslen som syntetiskt bränsle och/eller bensin även till bränslen som är enklare att reformera, som t.ex. metanol och DME. Det är ännu för tidigt att avgöra ifall ett drivsystem med bränslecell kan göras bränsleflexibelt på ett enkelt och kostnadseffektivt sätt. För en dieselmotor är detta närmast en omöjlighet utom i det speciella fall då syntetiskt bränsle används.

I det fall dieselmotorn skulle få ett betydligt större genomslag på marknaden på grund av den högre verkningsgraden jämfört med en ottomotor kvarstår problemet att väsentligt minska avgasemissionerna. Visserligen har de bränslealternativ som här diskuteras (DME, alkoholer och syntetiskt bränsle) bättre förutsättningar till låga emissioner än dieselolja men en hel del utveckling är ändå nödvändig för att nå de låga nivåer för NO_x som demonstrerats kommersiellt för de bästa ottomotorerna. Ett sådant exempel är bensinbilar som klarar Kaliforniens så kallade SULEV gräns. En NO_x reducerande katalysator är en *nödvändighet* för att dieselmotorer (avsedda för vilket bränsle som helst) skall klara denna emissionsnivå, såvida inte en revolutionerande ny förbränningsteknik (HCCI) som f.n. befinner sig på forskningsstadiet kan utvecklas till kommersiell användning. Partikelemissionerna kan vid behov (ej helt säkert att detta är nödvändigt för de alternativa drivmedlen) klaras med partikelfilter och i detta fall har utvecklingen nått längre än för NO_x rening.

Under en övergångsfas är sannolikt en viss bränsleflexibilitet nödvändig för de fordon som skall komma till allmän användning. Det är därför troligt att ottomotorer kommer att spela en stor roll under denna fas. Dels för att bränslecellerna knappast kommer att få något stort genomslag under de närmaste 10 åren och för att de inte på enkelt sätt kan klara kravet på bränsleflexibilitet, dels för att dieselmotorerna knappast klarar kravet på bränsleflexibilitet heller och dessutom ännu inte nått tillräckligt låga NO_x nivåer. Som summering av ovanstående resonemang kommer alltså ottomotorn att spela en fortsatt stor roll även som energiomvandlare för alternativa drivmedel under överskådlig framtid. Dess nackdel är en lägre verkningsgrad än de två övriga beskrivna energiomvandlarna men de övriga fördelarna är uppenbara under en övergångsfas.

4.7.4 Användning av fossil respektive icke fossil energi

I rapporten har hittills systemverkningsgrad och energianvändning utan direkt hänsyn till om energin är fossil eller biobaserad. Ett diagram som uttrycker energianvändningen i relativa termer för de tre bästa drivmedlen (DME, Metanol och vätgas) och de bästa drivsystemen (bränslecell och diesel) visas i **Figur 11**. Liksom tidigare har ett index på 100 använts för den konventionella bensindrivna ottomotorn (referensfallet).



Figur 11. Fossil respektive icke fossil energi

Såväl naturgas som bioråvara visas i **Figur 11** och i det senare fallet särskiljs energianvändning i form av fossila bränslen respektive biomassa. För att komplettera framställningen har också ottomotorhybrider tagits med för metanol då denna kombination har nästan lika hög systemverkningsgrad som bränslecellhybriden.

Som framgår av **Figur 11**, och som redan tidigare påpekats, är det inte möjligt att erhålla lika hög systemverkningsgrad för de bränslen som framställs från biomassa som för de fossila bränslena. Detta är naturligt eftersom konverteringen till ett drivmedel är mer komplicerad (och energikrävande) för de bränslen som framställs från biomassa. Däremot är det uppenbart att en väsentlig minskning av den fossila energianvändningen kan åstadkommas för de biomassabaserade bränslena. Användningen av fossil energi kan minskas påtagligt jämfört med de bränslen som baseras på fossil råvara. Användningen av fossila bränslen skiljer sig inte speciellt mycket mellan de olika alternativen emedan variationen är mellan 4,2 och 6,0%. Detta innebär att ca 95% (93,6% – 96,2%) av den fossila energin kan ersättas med bioenergi i jämförelse med referensfallet.

Ecotraffics sammanfattning

Som sammanfattning av resultaten från denna studie kan man säga att det inte är trivialt att hitta någon definitiv "vinnare" bland de 3 – 5 främsta kandidaterna. Däremot är det lättare att utesluta några av alternativen där systemverkningsgraden är förhållandevis låg. Vätgas från el är ett sådant fall.

Bränsleceller och dieselmotorer ger den högsta verkningsgraden bland de olika energiomvandlarna och i båda fallen förutsätts att hybridssystem används. Skillnaderna i eldrivsystemet mellan dessa alternativ är dock stora eftersom bränslecellen använder ett seriehybridsystem (enda möjligheten) och dieselmotorn (liksom ottomotorn) förutsätts använda ett parallellhybridsystem.

Den inbördes ordningen mellan drivmedlen för de bästa kombinationerna av alla drivmedel varierar beroende på om råvaran är fossil naturgas eller biomassa. Tre drivmedel, DME, GH_2 och metanol (varav två är gasformiga och ett är flytande), har identifierats som drivmedel som har hög systemverkningsgrad då både fossil naturgas och biomassa används som råvara. Råvara och produktionssystem för DME och metanol är desamma.

Användningen av fossil energi kan minskas väsentligt för de bästa alternativen. En minskning med ca 95% verkar vara möjlig jämfört med en bensindriven konventionell ottomotor.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Av resultaten av gjorda beräkningar av olika systems energiverkningsgrader har slutresultaten sammanställts i **Tabell 6** till **Tabell 9**, samt i **Figur 7** till **Figur 10**. Det bör påpekas att energiverkningsgraden inte är den enda avgörande faktorn utan systemens möjlighet till framtida stort genomslag på marknaden (allmän användning överallt), kostnader och påverkan på växthuseffekten måste tas med vid slutbedömningen.

För bilar med olika drivsystem kan utläsas

- att endast 12 – 15% av råoljeresursens energiinnehåll (LHV) erhålls som utfört transportarbete med dagens koncept, utvecklade fram till 2012, drivna av kolvmotorer av otto- eller dieseltyp med bensin resp. dieselolja som drivmedel,
- att bilar med dieseloljedriven dieselmotor visar högre systemeffektivitet än med bensindriven ottomotor,
- att förbättring med nära 25%, d.v.s. till drygt 15 resp. nära 19%, är möjliga för båda drivsystemen med kolvmotorer genom användande av hybridssystem i kombination med en mindre förbränningsmotor och elmotordrift med ett mindre batteri som effektbuffert,
- att hybrid med bränslecell/elmotor med bästa bränsle har systemverkningsgrad på ca 16%, vilket inte är högre än för hybridssystem med motor av dieseltyp men något högre än för hybrider med ottomotor,
- att rangordningen mellan olika drivsystem är (med ett undantag) densamma oberoende av bränsletyp, nämligen:
 - ◆ hybrid med dieselmotor
 - ◆ hybrid med bränslecell
 - ◆ direktdrift med bränslecell
 - ◆ hybrid med ottomotor
 - ◆ konventionell dieselmotor
 - ◆ (hybrid med direkt-metanol bränslecell)
 - ◆ konventionell ottomotor.

(undantaget är hybrid med ottomotor, som med för denna särskilt lämpade drivmedel (alkoholer) får högre verkningsgrad än för direktdrift med bränslecell)

För bedömning av uthållighet måste man börja med de biomassabaserade systemen och därefter se om gjort val av drivmedel passar även på fossilgasbas under en lång övergångsfas. Ur tabellerna kan utläsas

- att DME använd i dieselmotor har högsta systemverkningsgraden med metanol på andra plats, samt att systemverkningsgraden för dessa system är mycket högre än för alternativet med t.ex. syntetiska kolväten (FT-bränsle),

- att gasformigt väte med bränslecell också har hög verkningsgrad men då det knappast kan göras allmänt tillgängligt utan i så fall måste distribueras som kryogen vätska reduceras verkningsgraden avsevärt,
- att distribution av lätthanterliga vätebärare och konvertering vid tankstället leder till ytterligare minskad verkningsgrad och lägst är den för el och lokal elektrolys,
- att konvertering (reforming) av vätebärare ombord på fordonet integrerat med bränslecelldriften är effektivare än separat konvertering vid tankstället,
- att med fossilgasbaserade drivmedel CNG har högst systemverkningsgrad även om den måste distribueras som LNG för att kunna vara allmänt tillgänglig,
- att biomassabaserad metan, SNG eller CBG, inte är bästa alternativ utan står tillbaka för DME, vätgas (GH_2) och metanol,
- att förgasning av vid biomassa ger möjligheter till produktion av drivmedel som DME, vätgas (GH_2), metanol och syntetiskt bränsle i tämligen snarlika processer/produktionsanläggningar och dessa tre bränslen ligger i topp även med naturgas som råvara,
- att av huvudbränslena kan bara DME och metanol framställas från båda typerna av råvara (fossil naturgas och biomassa),
- att bränsleflexibilitet (FFV-fordon), som är en stor fördel under en introduktionsfas av ett nytt drivmedel, är möjligt endast för metanol av de bästa drivmedlen,
- att endast metanol är användbar i samtliga drivsystemkoncept.
- att användningen av fossil energi kan minskas med ca 95% för de bästa alternativen jämfört med en bensindriven konventionell ottomotor.

Förlusterna vid konverteringar kan till en del återvinnas som lågvärdig värme för t.ex. lokaluppvärmning (fjärrvärme) men detta redovisas inte i systemen ovan.

6 REFERENSER

- 1 Johansson A, Brandberg Å, and Roth A. (Ecotrafic): "The Life of Fuels – *Motor fuels from source to end use*.", Ecotrafic, (www.ecotrafic.se), 1992.
- 2 Ahlvik P. och Brandberg Å. (Ecotrafic): "Avgasemissioner från lätta fordon drivna med olika drivmedel – *Effekter på hälsa, miljö och energianvändning*.", KFB-Rapport 1999:38, 1999.
- 3 Ahlvik P. och Brandberg Å. (Ecotrafic): "Emissioner från alternativa drivmedel – I ett livscykelperspektiv.", Underlagsrapport för Naturvårdsverket (ej publicerad), 1998.
- 4 Ahlvik P. (Ecotrafic): "Characterization of emissions from cars with lean-burn and direct injection gasoline engines.", MTC Report MTC 9704, 1998.
- 5 Ahlvik P. (Ecotrafic), and De Serves C. (MTC): "Characterization of particulate emissions from 11 gasoline and 5 diesel-fueled cars." MTC Report MTC 9708B, 1999.
- 6 Wang M. Q. and Huang H.-S. (ANL): "A Full Fuel-Cycle Analysis of Energy and Emissions Impacts of Transportation Fuels Produced from Natural Gas.", ANL/ESD-40, available electronically at: <http://www.doe.gov/bridge>, 1999.
- 7 (S&T)² Consultants: "Assessment of Emissions of Greenhouse Gases from Fuel Cell Vehicles.", prepared for Methanex Co., available electronically at the Internet site of Methanex: www.methanex.com, 2000.
- 8 Wooley R. (NREL), Ruth M. (NREL), Sheehan J. (NREL), Ibsen K. (NREL), Madeski H. (Delta-T) and Galvez A. (Delta-T): "Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios.", NREL/TP-580-26157, 1999.
- 9 Sasols Internet hemsida: www.sasol.com, 2000.
- 10 Syntroleums Internet hemsida: www.syntroleum.com, 2000.
- 11 Rentechs Internet hemsida: www.rentechinc.com, 2000
- 12 "Fischer-Tropsch Technology", Howard, Weil, Labouisse, Friedrichs Inc., 1998.
- 13 Schaberg P. W. (Sasol), Myburg I. S. (Sasol), Botha J. J. (Sasol) and Khalek I. A. (SwRI): "Comparative Emissions Performance of Sasol Fischer-Tropsch Diesel Fuel in Current and Older Technology Heavy-Duty Engines.", SAE Paper 2000-01-1912, 2000.
- 14 Suppes G. J. (Univ. of Kansas), Fox, T. J. (Univ. of Kansas), Jin H. (Univ. of Kansas), Burkhart M. L. (Univ. of Kansas) and Koert D. N. (Wichita State Univ.): "Cold Flow and Ignition Properties of Fischer-Tropsch Fuels.", SAE Paper 2000-01-2014, 2000.
- 15 NRC: "Review of the Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) – Fourth Report.", National Academy Press, Washington D.C., 1998.
- 16 Diez, S.: "A2 – Ein Meilenstein der Fahrzeugaerodynamik.", Der Neue Audi A2, ATZ/MTZ Special, 2000, in German.

- 17 Stan C., Tröger R., and Stanciu A. (Uni. of Zwickau): "Direct Injection of Variable Gasoline/Methanol Mixtures: A Future Potential of SI Engines.", SAE Paper 2000-01-2904, 2000.
- 18 Egeback K.-E. (Autoemission K-E E Consultant): "Uppföljning av emissionsprestanda hos gasdrivna bilar.", KFB-Rapport 2000:62, 2000.

Övriga referenser

Förutom de referenser som inte direkt citerats i rapporten har också en hel del övriga referenser använts som underlag. Några exempel på dessa visas på listan nedan.

1. Edited by Ecotrafic R&D AB and Nykomb Synergetics AB: "Altener "BAL-Fuel Project – *Feasibility phase project for biomass-derived Alcohols for automotive and industrial uses – Final Report*", EU Contract No. XVII/4, 1030/Z/95-124, 1031/Z/95-124, available for download at the Internet site of Ecotrafic: www.ecotrafic.se
2. Brandberg Å., Hjortsberg H., and Sävbarck B. (Ecotrafic), "BioMeeT, Planning of Biomass based Methanol energy combine – Trollhättan region, *Final report*.", Ecotrafic R&D AB, available for download at the Internet site of Ecotrafic: www.ecotrafic.se.
3. Cole R.L., Poola R. B., and Sekar R. (ANL): "Emissions and Fuel Economy of a Vehicle with a Spark-Ignition, Direct-Injection Engine: Mitsubishi Legnum GDI™, ANL/ESD/TM-149, Argonne National Laboratory, 1999.
4. Johansson B. och Åhman M. (LTH): "Koldioxidneutrala transportsystem – *En studie av energieffektiva fordon och förnybar energi*", KFB-Rapport 2000:28, 2000.
5. Åhman M. (LTH): "Teknik för energieffektiva personbilar", KFB-Meddelande 1999:22, 1999.
6. Azar C., Lindgren K. and Andersson B. A. (CTH): "Hydrogen or methanol in the transportation sector?", KFB-Report 2000:35, 2000.
7. Pettersson J. and Hjortsberg O.: "Hydrogen storage alternatives – a technological and economic assessment.", KFB-Report 1999:27, 1999.
8. St-Pierre C. (Hydro-Québec), Rouillard R. (Hydro-Québec), Bélanger A. (Hydro-Québec), Kapfer B. (Hydro-Québec), Simoneau M. (Hydro-Québec), Choquette Y., Gastronguay L. (Hydro-Québec), Heiti R. (Minnesota Mining), Behun C. (Minnesota Mining): "Lithium Polymer Battery for Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicle Applications.", 16th International Electric Vehicle Symposium, 1999.
9. The Internet home page of Advisor® at: <http://www.ctts.nrel.gov/analysis>, 2000.
10. Wipke K. B. and Cuddy M. R.: "Using an Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) to Guide Hybrid Vehicle Propulsion System Development.", NESEA Sustainable Transportation Conference, 9/16/1996.
11. Edited by J D. Murrell & Associates: "Emission Simulations: GM Lumina, Ford Taurus, GM Impact and Chrysler TEVan.", Midwest Research Institute, 2000.
12. Senger R. D., Merkele M. A. and Nelson D. J. (Virginia Polytechnic Inst. and State Univ.): "Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle." SAE Paper 981133, 1998.

-
13. Rahman Z., Butler K. L. and Ehsani M (Texas A&M Univ.): "A Comparison Study Between Two Parallel Hybrid Control Concepts.", SAE Paper 2000-01-0994, 2000.
 14. Johnson V. H., Wipke K. B. and Rausen D. J. (NREL): "HEV Control Strategy for Real-time Optimization of Fuel Economy and Emissions." SAE Paper 2000-01-1543, 2000.
 15. Ogburn M. J. (Virginia Tech.), Nelson D. J. (Virginia Tech.), Wipke K. (NREL) and Markel T. (NREL): "Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Vehicle." SAE Paper 2000-01-1566, 2000.

Internationella källor till SAE:s databas GMD

GMD databasen innehåller källor från många organisationer i ett flertal länder. Nedan visas en lista på de organisationer som bidrar med sina publikationer till GMD.

AAAM	Association for the Advancement of Automotive Medicine (USA)
AECMA	Association Europeenne des Constructeurs de Material Aerospatial (Frankrike)
AMET-Ag	Association of Mechanical Engineers and Technicians (Slovenien)
ANSI	American National Standards Institute (USA)
ASTM	American Society for Testing and Materials (USA)
ATA	Associazione Tecnica Dell'Automobile (Italien)
CASI	Canadian Aeronautical and Space Institute (Kanada)
CEC	Coordinating European Council (Storbritannien)
CRC	Coordinating Research Council (USA)
CTEA	Convergence Transportation Electronics Association (USA)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V. (Tyskland)
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
HFES	Human Factors and Ergonomics Society (USA)
IAATM	International Association for Accident and Traffic Medicine (Sverige)
IAE	Institution of Automobile Engineers (Indien)
IATO	Ikatan Ahli Teknik Otomotif SAE (Indonesien) • endast FISITA Conference papers
IMechE	Institution of Mechanical Engineers (Storbritannien)
IRCOBI	International Research Council on the Biokinetics of Impact (Frankrike)
ISO	International Organization for Standardization (Schweiz)
ITS	Intelligent Transportation Systems of America (USA)
JSAE	Society of Automotive Engineers of Japan (Japan)
JUMV	Jugoslovensko Drustvo za Motore I Volila (Jugoslavien) • endast FISITA Conference papers
KSAE	Society of Automotive Engineers of Korea (Korea)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (USA)
OMKDK	Technoinform (Ungern) • endast FISITA Conference papers
RAS	Royal Aeronautical Society (Storbritannien)
SAE	Society of Automotive Engineers, Inc. (USA)
SAEA	Society of Automotive Engineers Australasia (Australien)
SAEC	Society of Automotive Engineers of China (Kina) • endast FISITA Conference papers
SIA	Societe des Ingenieurs de l'Automobile (Frankrike)
SIAE	Singapore Institute of Aircraft Engineers (Singapore)
STLE	Society of Tribologists and Lubrication Engineers (USA)

UMIN	University of Minnesota (USA) • endast Stapp Car Crash Conference papers
VDI	Verlag Des Verein Deutscher Ingenieure GmbH (Tyskland)
WSU	Wayne State University (USA) • endast Stapp Car Crash Conference papers

Resultat i tabellform

För att göra resultaten lite mer överskådliga visas nedan en sammanställning i tabellform över produktionen av drivmedel. Av utrymmesskäl och för att inte vara tvungen att använda alltför litet typsnitt har inte energianvändningen i fordonet tagits med. Verkningsgraderna för produktion och fordon finns ju ändå med i tabellerna 5-8 i huvudrapporten.

Resultaten i tabellerna nedan visar energianvändningen uppdelad i bioenergi, fossil energi och totalt. Energin uttrycks som antal MJ energi (för respektive delsteg) som används per MJ energi i tanken på fordonet men även som en verkningsgrad för drivmedelsproduktionen (fram till tanken i fordonet). Som exempel kan nämnas att om den totala energianvändningen för bränsleproduktionen är 1,0 MJ, betyder detta att det för varje MJ energi som förbrukas i fordonet används ytterligare 1,0 MJ i bränsleproduktionen. Detta kan också ses som att energianvändningen totalt är en faktor 2 högre än vad den är i fordonet. Delverkningsgraden för produktionsledet är då 50%.

Tabell 1. *Produktion av gasformiga drivmedel från fossil naturgas*

Energianvändning i olika led i bränsleproduktionen (MJ _p /MJ _p) och verkningsgrad (dim. lös)																							
Råvaruproduktion				Råvarutransport				Produktion				Distribution				Tankn. & lok. prod				Summa produktion			
Bränsle, dist.		Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	η _{tot}
Olja	Bensin	0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,155	0	0,155	0,014	0	0,014	0	0	0	0,206	0	0,206	0	0,206	0,829	
	Diesel	0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,090	0	0,090	0,010	0	0,010	0	0	0	0,137	0	0,137	0	0,137	0,880	
	Metan, CNG	0,030	0	0,030	0,000	0	0,000	0,020	0	0,020	0,020	0	0,020	0,080	0	0,080	0,150	0	0,150	0	0,150	0,870	
	Metan, LNG	0,030	0	0,030	0,000	0	0,000	0,102	0	0,102	0,035	0	0,035	0,004	0	0,004	0,170	0	0,170	0	0,170	0,855	
	Vätgas, GH2	0,040	0	0,040	0,000	0	0,000	0,336	0	0,336	0,040	0	0,040	0,219	0	0,219	0,636	0	0,636	0	0,636	0,611	
Gasbräns, foss.	Vätgas, LH2	0,068	0	0,068	0,000	0	0,000	1,160	0	1,160	0,092	0	0,092	0,000	0	0,000	1,320	0	1,320	0	1,320	0,431	
	El, vätgas, GH2	0,020	0	0,020	0,000	0	0,000	1,466	0	1,466	0,000	0	0,000	0,219	0	0,219	1,706	0	1,706	0	1,706	0,370	
	DME, GH2	0,053	0	0,053	0,000	0	0,000	0,456	0	0,456	0,043	0	0,043	0,518	0	0,518	1,070	0	1,070	0	1,070	0,483	
	DME	0,041	0	0,041	0,000	0	0,000	0,351	0	0,351	0,034	0	0,034	0,000	0	0,000	0,426	0	0,426	0	0,426	0,701	

Tabell 2. Produktion av gasformiga drivmedel från biomassa

Olja		Energianvändning i olika led i bränsleproduktionen (MJ _p /MJ _p) och verkningsgrad (dim. lös)																							
		Råvaruproduktion				Råvarutransport				Produktion				Distribution				Tankn. & lok. prod				Summa produktion			
		Tot	Bio	Foss		Tot	Bio	Foss		Tot	Bio	Foss		Tot	Bio	Foss		Tot	Bio	Foss		Tot	Bio	Foss	η _{tot}
Bränsle, dist.		0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,155	0	0,155	0	0,014	0	0,014	0	0	0	0,206	0	0,206	0	0,137	0	0,137	0,829
Bensin		0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,090	0	0,090	0	0,010	0	0,010	0	0	0	0,137	0	0,137	0	0,137	0	0,137	0,880
Diesel		0,054	0	0,054	0,074	0	0,074	0,850	0,850	0,000	0,010	0,000	0,010	0,080	0,080	0,000	0,000	1,068	0,930	0,138	0,484	0,457	0,457	0,479	0,479
Metan, CBG		0,060	0	0,060	0,030	0	0,030	1,000	1,000	0,000	0,020	0,020	0,000	0,080	0,080	0,000	0,000	1,190	1,100	0,090	0,457	0,457	0,457	0,479	0,479
Metan, SNG		0,053	0	0,053	0,026	0	0,026	0,761	0,761	0,000	0,030	0,030	0,000	0,219	0,219	0,000	0,000	1,089	1,010	0,079	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479
Vätgas, GH2		0,068	0	0,068	0,034	0	0,034	1,261	1,261	0,000	0,052	0,000	0,052	0,000	0,000	0,000	0,000	1,415	1,261	0,154	0,414	0,414	0,414	0,414	0,414
Vätgas, LH2		0,087	0	0,087	0,044	0	0,044	1,902	1,902	0,000	0,000	0,000	0,000	0,219	0,219	0,000	0,000	2,251	2,121	0,131	0,308	0,308	0,308	0,308	0,308
El, vätgas, GH2		0,077	0	0,077	0,030	0	0,030	0,980	0,980	0,000	0,020	0,000	0,020	0,518	0,518	0,000	0,000	1,624	1,498	0,127	0,381	0,381	0,381	0,381	0,381
DME, GH2		0,053	0	0,053	0,026	0	0,026	0,754	0,754	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,853	0,754	0,099	0,540	0,540	0,540	0,540	0,540
DME		0,053	0	0,053	0,026	0	0,026	0,754	0,754	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,853	0,754	0,099	0,540	0,540	0,540	0,540	0,540

Tabell 3. Produktion av flytande drivmedel från fossil naturgas (foss.) och från biomassa (bio)

		Energiانvändning i olika led i bränsleproduktionen (MJ _p /MJ _p) och verkningsgrad (dim. lös)																		
		Råvaruproduktion			Råvarutransport			Produktion			Distribution			Tankn. & lok. prod			Summa produktion			
		Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	Tot	Bio	Foss	η _{tot}
Olja	Bränsle, dist.	0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,155	0	0,155	0,014	0	0,014	0	0	0	0,206	0	0,206	0,829
	Bensin	0,030	0	0,030	0,007	0	0,007	0,090	0	0,090	0,010	0	0,010	0	0	0	0,137	0	0,137	0,880
Foss	Diesel	0,053	0	0,053	0,000	0	0,000	0,754	0	0,754	0,011	0	0,011	0,000	0	0,000	0,818	0	0,818	0,550
	Syntetiskt bränsle	0,043	0	0,043	0,000	0	0,000	0,420	0	0,420	0,022	0	0,022	0,000	0	0,000	0,485	0	0,485	0,673
	Metanol	0,058	0	0,058	0,000	0	0,000	0,532	0	0,532	0,028	0	0,028	0,485	0	0,485	1,103	0	1,103	0,475
	Metanol, GH2	0,067	0	0,067	0,033	0	0,033	1,222	1,222	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0	0,000	1,332	1,222	0,110	0,429
Bio	Syntetiskt bränsle	0,056	0	0,056	0,028	0	0,028	0,852	0,852	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,955	0,852	0,103	0,511
	Metanol	0,079	0	0,079	0,019	0	0,019	1,078	1,078	0,000	0,025	0,000	0,025	0,485	0,485	0,000	1,687	1,563	0,123	0,372
	Metanol, GH2	0,060	0	0,060	0,030	0	0,030	1,150	1,150	0,000	0,012	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	1,252	1,150	0,102	0,444
	Etanol																			