

NOODZAKEN EN BEPERKINGEN VAN DE EVOLUTIE VAN HET TRANSPORT IN EUROPA EN IN BELGIË IN HET EERSTE KWART VAN DE 21^E EEUW

G. Maggetto – J. Van Mierlo

Enkele feiten met betrekking tot het personen- en goederen vervoer

Als startpunt voor deze reis in de toekomst van het transport is het nodig enkele feiten met betrekking tot het personen en goederen transport te verduidelijken.

Werkgelegenheid – Economie

De Europese transport industrie is een belangrijke economische sector. Ze is één van de drie belangrijkste werkgevers. Er wordt 14 miljoen mensen of 10% van de actieve bevolking tewerkgesteld door deze sector, waarvan 6 miljoen in activiteiten verbonden aan transportdiensten, 2 miljoen in de sector van transportuitrusting en meer dan 6 miljoen bij activiteiten verbonden met transport. 14% van de huishoudelijke inkomsten worden besteed aan transport. De modale opsplitsing van personenvervoer uitgedrukt in aantal passagiers maal kilometer (p.km) is als volgt: 79% met de auto, 8% met de autobus, 7% met het vliegtuig, 6% per trein en minder dan 1% met de tram of metro. Voor het goederenvervoer heeft men volgende modale opsplitsing (uitgedrukt in ton.km): 43% langs de weg, 41% over de zee, 9% via het spoor, 4% langs de binnenvaart en 3% via pijpleidingen.

Toename

De voorziene toename van nu tot in 2010 van het Europees personenvervoer bedraagt 19%, waarvan een toename van 16% in het wegvervoer en 90% toename in het luchtvervoer. Voor het goederenvervoer wordt een globale toename van 38% verwacht, waarvan een toename van 50% in het vervoer via de weg en 34% in het maritiem transport.

Voor België betekend deze groei een toename van 4,56 miljoen wagens in 2000 tot 5,22 miljoen in 2010 en 5,53 miljoen in 2020. Het gemiddeld aantal afgelegde kilometers per jaar per voertuig blijft bijna onveranderd, waardoor men dus een lineaire toename observeert van het totaal aantal gereden kilometers. Ten gevolge van de verbetering van het energetisch rendement, stelt men een minder snelle, maar toch zekere toename van het brandstofverbruik vast.

Meer zorgwekkend is de mondiale toename van het aantal voertuigen. Tegen 2030 zullen er evenveel wagens zijn in de OESO landen als in de rest van de wereld (800 miljoen), hetgeen een toename van 100% (vedubbeling) betekend ten opzichte van de huidige situatie, waarvan 65% in de OESO zone. In de OESO zone behoudt men dus nog een lange tijd de jaarlijkse voorziene procentuele toename van 2%.

Energie

Het energetisch rendement van de verschillende transport middelen varieert sterk. Dit is het gevolg van de thermodynamische wetten, maar ook van de technologie van de gebruikte aandrijfsystemen en van het vermogenniveau waar men zich bevindt. Het toenemende notie van duurzaamheid maakt het huidige reusachtige verbruik van energie van de transportsector duidelijk.

Het laat velen onverschillig (zelfs vandaag nog) dat het energetisch rendement van een voertuig lager is dan 15% in een stedelijke omgeving (80% van de voertuigen verplaatsen zich voornamelijk in de stad). Nochtans wil dit zeggen dat van de 50 liter

brandstof er minder dan 7,5 liter gebruikt wordt om te rijden de overige 42,5 liter worden omgezet in warmte. In de lijst van huidige brandstoffen scoort diesel het beste gevolgd door benzine en de gasvormige brandstoffen (aardgas en LPG).

Bij de evaluatie van het energieverbruik dient men voorzichtig te zijn: een leeg transportmiddel is volledig nutteloos; zodoende dient met zijn doeltreffendheid te evalueren in verhouding tot de functie die het vervult namelijk het verplaatsen van goederen of personen.

Het voertuig met 15% rendement zal veel nuttiger zijn bij het transporteren van vier personen in plaats van één. Dit lijkt evident, maar de notie van individueel vervoer, die op dit ogenblik de overhand heeft, druist in tegen een gezond beheer van de energiebronnen.

De vergelijking van transportsystemen dient dus te gebeuren op basis van de bezettingsgraad uitgedrukt in aantal personen of lading, massa of volume van goederen. Een stadsbus die 4 personen vervoert verbruikt vijf keer meer energie per persoon dan een gemiddelde personenwagen met evenveel personen.

Met een gemiddelde bezettingsgraad van 35% voor de wagen (1,4 personen), 40% tot 70% voor de trein, 60% voor interstedelijke bussen en eveneens 60% voor binnenlandse vluchten, bekomt men volgend resultaat:

- de trein heeft een primair energieverbruik per persoon van 15 tot 50% ten opzichte van de wagen
- de interstedelijke bus, relatief gezien lichter dan de trein, kan zich situeren op 70% van het energieverbruik van deze laatste en 42% van die van de wagen
- het vliegtuig situeert zich op 60% van de wagen, maar op 300% t.o.v. van de sneltrein (maar niet aan grote snelheid); maar hier speelt de factor "tijd" een belangrijke rol
- in de stad situeert de metro zich gemakkelijk onder de 50% ten opzichte van de wagen

Voor het goederenvervoer spelen massa en volume:

- voor binnenlands transport kan de boot zich situeren op het dubbele van de spoorweg tengevolge van zijn dieselaandrijving
- de spoorweg kan zich op 40 a 55% situeren ten opzichte van het transport via de weg

Onafhankelijk van het beschouwde voorbeeld moet men steeds het energieverbruik beschouwen van het geheel aan transportmiddelen die gebruikt werden tussen de oorsprong en de uiteindelijke bestemming.

Bij de economische appreciatie van het traject is de duur natuurlijk ook een belangrijke factor.

De geciteerde cijfers zijn indicatief daar ze gebonden zijn aan een geheel van typische trajecten. Ze tonen voornamelijk de noodzaak om verplaatsingen te analyseren per categorie en het mogelijk energetisch voordeel van de verschillende transportmodi.

Het voordeel van het spoor (tram en metro) is geen toeval. Het is het resultaat van de combinatie van twee factoren: de transportcapaciteit en het gebruik van elektrische energie.

Het transport over zeer lange afstanden (meer dan 2000km?) dient op een andere manier te worden geanalyseerd daar de middelen die gebruikt worden afhankelijk van het getransporteerde object. Van de handel buiten de EU neemt het maritiemvervoer 90% van goederen (in volume) voor haar rekening en 40% van het intern transport.

Om te besluiten is het gemakkelijk te bevestigen dat het gebruik van energie in het huidige transportsector niet in overeenstemming is met de notie van rationeel energie gebruik (REG).

Emissies

De evolutie van de kennis en het bewustzijn gedurende de laatste vijf jaar maakt het noodzakelijk bepaalde aspecten van het verslag “Energie in het België van morgen” (BACAS 1995) te herzien, vooral wat betreft de CO₂, het broeikaseffect en het energietekort.

Het rapport stelt op blz. 41 (franse versie):

“De stijging van de temperatuur op aarde van 0,3 tot 0,6 °C vanaf 1860 valt binnen de foutenmarge van de berekeningen ($\pm 0,7$ °C, rekening houdend met de methodologie en de frequentie van de staalnemingen in de 19^{de} eeuw, vooral in het marine milieu).

Het is nochtans deze onderstelling die onrust wekt... net zoals dit in mindere mate het geval was met een wetenschappelijke theorie 30 jaar geleden, die een algemene afkoeling van het klimaat voorspelde... De voorzitter van het comité van 400 experts van de Verenigde Naties (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erkent trouwens dat de wetenschappers helemaal niet zeker zijn dat de opwarming van het klimaat reeds merkbaar zou zijn.” (einde citaat)

De twijfel die hier wordt uitgedrukt is onderhouden en tegengesproken in de rest van het verslag.

Gedurende de laatste vijf jaar werden er veel waarnemingen verricht en gepubliceerd die helaas slechts bevestigen wat reeds zichtbaar was: de snelle inkrimping van de gletsjers, de grootschalige afsmelting van de poolkappen zijn geen voorbijgaande fenomenen. Vooral de tijdschaal van deze gebeurtenissen, die slechts microscopisch is vergeleken met de geologische tijdschaal, baart zorgen. Meer verfijnde wiskundige modellen en meer precieze correlaties wijzen op een stijging van de gemiddelde temperatuur die veel groter is dan de ruis of de onzekerheidsmarge:

- 2,5 °C in 25 jaar op Antarctica
- 1,4 °C tot 5,8 °C van nu tot 2100 beweert het IPCC nu, dit is 50% meer dan de voorspelling van vijf jaar geleden; hetzelfde IPCC stelt nu dat de neiging tot opwarming niet meer ontkend kan worden.

De correlatie met de toename van de CO₂ concentratie in de atmosfeer is eveneens vastgesteld.

De jaren '90 waren de warmste van de eeuw, en diverse diersoorten emigreren naar koelere zones, zonder zich te bekommeren om wiskundige modellen maar door toepassing van hun voorzorgsprincipe.

Alles kan evenwel gecontesteerd worden, terecht of ten onrechte, en men moet vaststellen dat het voorzorgsprincipe nog niet voldoende weerstaat aan de onmiddellijke economische belangen verbonden aan de liberalisering van de wereldeconomie.

Men kan natuurlijk beroep willen doen op de “catastrofetheorie”, waarbij een verkeerslicht slechts wordt geplaatst nadat er op een kruispunt een zeker aantal doden zijn gevallen. Het is echter goed te herhalen dat wij in een microscopische tijdschaal ageren, maar dat de reacties en de correcties zich op een macroscopische schaal dreigen uit te breiden.

Alle lokale emissies samen bepalen uiteindelijk de milieutoestand van de planeet. Sommige hiervan (vervoer, energieproductie, nijverheid,...) kunnen beheerst worden, andere (vulkanen, zonnestraling,...) helemaal niet. De beperking van de bijdrage van het vervoer aan de luchtvervuiling kan slechts gebeuren door middel van lokale en regionale acties, waarvan het succes zal afhangen van de sensibilisatie van de betrokken bevolkingsgroepen.

De geleidelijke invoering van de emissierichtlijnen Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV (2004) en Euro V (zware voertuigen 2005) laat de beheersing toe van CO₂-, NO_x-, koolwaterstof- en stofemissies. Niettegenstaande de voorziene toename van het aantal auto's zullen deze emissies in hun geheel gevoelig dalen. Dit geldt voor België, de EU en het geheel van de OESO landen. Voor de rest van de wereld is er een gevoelige groei voorzien, zodat de globale emissies met 45 tot 55% zullen stijgen. Een gelijkaardige emissiebeheersing is te voorzien en te verwezenlijken voor de elektriciteitsproductie, die eveneens een rol speelt in het vervoer (treinen, trams, metro, trolleybus).

Voor CO₂ is de toestand helemaal anders: de CO₂ emissie is immers rechtstreeks afhankelijk van de totale hoeveelheid reizigerskilometer voor het personenvervoer en tonkilometer voor het goederenvervoer. Het rendement van de thermische motoren zal nog enigszins verbeteren gedurende de komende tien jaar, maar het is inherent beperkt door de wetten van de fysica en zal een asymptotische waarde benaderen. Enige winsten kunnen eveneens gemaakt worden door de gewichtsvermindering en de vormgeving van de voertuigen, maar daar zijn de limieten ook bijna bereikt.

Wat er ook van zij, het is opvallend vast te stellen dat een gemiddelde auto per jaar 4 tot 5 ton CO₂ uitstoot, hetzij vier tot vijfmaal zijn eigen gewicht!

In België is een jaarlijkse groei van de CO₂ uitstoot van 6 tot 10% te voorzien tegen 2020, rekening houdend met verbeterde prestaties van de voertuigen zowel als met het groeiend aantal gereden kilometers. Voor de OESO is zelfs een stijging van 37% te voorzien.

In de EU komen 28% van de emissies voor rekening van het vervoer, dat 90% zal bijdragen tot de voorziene groei van emissies.

Voor de OESO en de andere landen samen, is de voorziene toename van CO₂ emissies dramatisch: 110 tot 120% !

Andere broeikasgassen zoals methaan komen eveneens voor rekening van het vervoer. Voor wat betreft het luchtvervoer draagt de emissie van gassen op 10 tot 11 km hoogte twee tot driemaal meer bij tot het broeikaseffect, door de vorming van ozon vanaf NO_x, dan de vorming van CO₂ door de verbranding van de brandstof. Het luchtvervoer voorziet in 10% van de totale reizigerskilometer, en in minder dan 1% van het goederenvervoer. De emissies op grote hoogte kunnen een kwart van de totale bijdrage van het vervoer tot het broeikaseffect bedragen. Luchtvervoer neemt bovendien snel toe, tegen 2030 kan zijn bijdrage tot het broeikaseffect met 50% die van de zware en de lichte voertuigen (die ongeveer gelijk zijn) overtreffen.

Evolutie van de energievoorziening

Tegen 2010 kan het personenvervoer met 19% toenemen, verdeeld over 16% stijging van de mobiliteit over de weg en met 90% voor het luchtvervoer.

Goederenvervoer kan met 38 stijgen, verdeeld over 50% voor de weg en 34% voor het vervoer te water.

Gedurende de komende tien jaar wordt globaal een jaarlijkse groei met 2% verwacht.

De uitbreiding van de EU zal deze zaak nog doen toenemen.

De automobielnijverheid (ACEA groep) heeft zich verbonden tegenover de EU om de CO₂ emissies terug te brengen van 190 g/km in 1995 tot 120 g/km in 2012 teneinde de toename van de reizigerskilometer te compenseren.

De afhankelijkheid van externe energiebronnen in de EU is teruggelopen van 60% in 1973 tot 50% in 1999, maar binnen 20 à 30 jaar kan deze afhankelijkheid 70% bedragen, meer in het bijzonder 90% voor aardolie, 70% voor aardgas en 100% voor steenkool. De uitbreiding van de EU zal deze cijfers eens te meer doen toenemen.

Volgens het rapport “Energie in het België van morgen”: *“Er is geen energietekort te voorzien tegen 2020. Voluntaristische scenario's laten toe deze verklaring uit te breiden tot 2050.”*

Dit eerder optimistische scenario zegt echter niet tegen welke prijs deze energie zal beschikbaar zijn, en houdt geen rekening met het toenemend verschil tussen de toenemende vraag naar aardolie en de productiecapaciteit die afneemt vanaf 2010-2015.

De continuïteit van de beschikbaarheid van “conventionele” (goedkope) olie wordt duidelijk terug in vraag gesteld. Volgens het Internationaal Energie Agentschap (IEA) zal er binnen 15 jaar een maximale aardolieproductie worden bereikt, onvermijdelijk gevolgd door een teruggang. Andere voorspellingen spreken zelfs van een nog kortere termijn. Zonder bijzondere maatregelen zal de vraag naar conventionele olie nog stijgen, leidend tot een stijging van de prijzen en een toename van de productie van “niet-conventionele” olie afkomstig van minder toegankelijke of kwalitatief mindere reserves.

Dit is te verklaren doordat de ontdekte aardoliereserves hun hoogtepunt hebben bereikt rond het begin van de jaren '60 en dat hun volume sindsdien enkel is afgenomen.

Zelfs wanneer men rekening houdt met de verschuiving in de tijd door de exploitatie van de niet-conventionele reserves, zal de situatie nauwelijks verbeteren, en de termijnen zullen zeer kort blijven.

Voor aardgas is een gelijkaardige situatie te voorzien, met een verschuiving van 10 à 20 jaar.

De voorziene spanningen die op korte termijn zullen voortvloeien uit de uitputting van de oliereserves onderlijnen op dramatische wijze het probleem van een fundamentele herziening van mobiliteit en vervoer.

Lawaai

Het vervoer, en meer in het bijzonder het wegvervoer, vormt de grootste bron van lawaaihinder in het stedelijk milieu. De effecten van lawaai gaan van verminderd comfort (55-60 dB(A)) en fysieke agressie (meer dan 65-70 dB(A)), leiden tot slaapstoornissen of cardio-vasculaire problemen. 30% van de bevolking van de EU heeft te maken met verkeerslawaai boven 55 dB(A), en 13% ondergaat meer dan 65 dB(A).

Vliegtuiglawaai stoort 10% van de bevolking van de EU.

Externe kosten

Emissies, lawaai, verkeersopstoppingen, veiligheid, en het gebruik van de grond creëren supplementaire kosten toe te schrijven aan de mobiliteit, van de orde van 250 miljard €, hetzij 4% van het BBP volgens de DG TREN. Dit is te vergelijken met de toegevoegde waarde gecreëerd door de mobiliteit die 290 miljard € bedraagt.

Anders gezegd, voor elke euro toegevoegde waarde van de mobiliteit, wordt ongeveer één euro aan externe kosten veroorzaakt, die tot op heden weliswaar niet verrekend worden.

Technische evolutie van de transportmiddelen

Twee factoren, die toelaten nieuwe technologieën te gebruiken voor de transportmiddelen en systemen, leiden tot grote evoluties:

- toegang tot de energie
- de toestand van het milieu

Gekoppeld aan de economie zijn deze twee factoren verbonden aan de notie van een duurzame ontwikkeling.

De evolutie in het luchttransport zal voornamelijk beïnvloed worden door het in gebruik nemen van nieuwe brandstoffen, waarvan waterstof een belangrijke rol kan spelen.

Voor landelijk en maritiem transport zullen twee families van aandrijf systemen de taken verdelen voor de verplaatsingen van goederen en personen:

- de thermische motor
- de elektrische motor

Deze verdeling van taken bestaat reeds op dit ogenblik; denk maar aan het transport over het spoor dat voornamelijk elektrisch is en het wegtransport voornamelijk thermisch. Maar ze is genoodzaakt tot een verscheidenheid en een belangrijkere integratie van het in dienst nemen van diverse energiebronnen. Deze integratie leidt tot hybride technologieën.

Korte analyse van de aandrijftechnieken

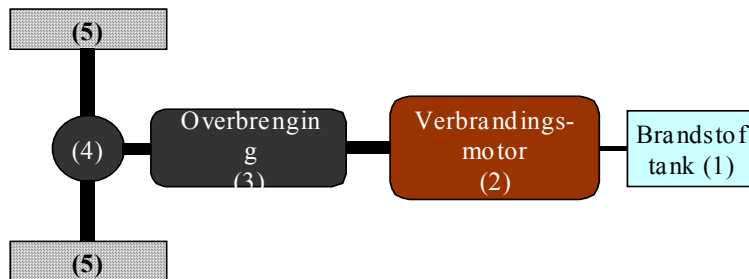
Twee aandrijfsystemen voor landelijk vervoer verdelen zich op dit ogenblik op een dominante manier in België, in de EU en de landen van OESO:

- de thermische motorisatie, diesel, benzine of gas, voor het zwaar en licht wegtransport
- de elektrische motorisatie voor het transport per trein of in de steden.

Voor het wegtransport zal de, waarschijnlijk sterk toenemende, inbreng van de elektriciteit leiden tot een geheel van aandrijfsystemen, die klaarblijkelijk verdwijnen, maar een precieze analyse toont de continuïteit ervan aan.

Structuren met een verbrandingsmotoren

De structuur met een verbrandingsmotor (Figuur 1) bestaat uit volgende energetische keten: brandstoftank **1** (benzine, diesel of gas), verbrandingsmotor **2**, overbrenging **3**, differentieel **4**, wielen **5**.



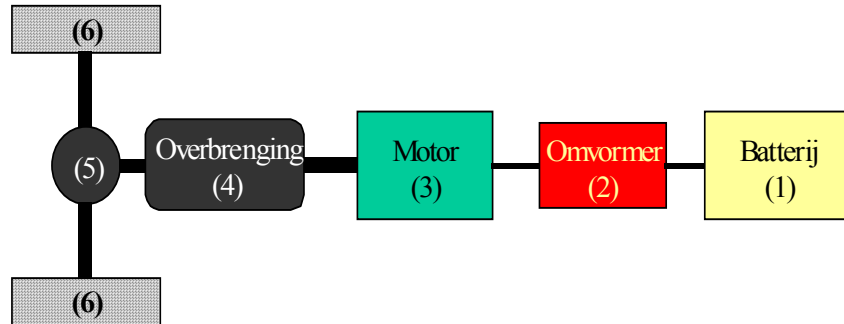
Figuur 1: Aandrijfsysteem met verbrandingsmotor

Twee of vier wielen kunnen aangedreven worden, maar slechts 1 motor wordt gebruikt. Er wordt één enkele aandrijfjas gebruikt, waardoor men dit systeem een eerste orde systeem noemt. Het stoppen van het voertuig vereist het gebruik van een

ontkoppeling om te vermijden dat de verbrandingsmotor stil valt alsook om een voldoende groot startkoppel te kunnen ontwikkelen.

Elektrische structuren

Elektrische voertuigen vertonen een vergelijkbare structuur (Figuur 2): energieopslagplaats (batterij) 1, elektronische omvormer 2, elektrische motor 3, overbrenging 4, differentieel 5 en wielen 6. Ook dit is een eerste orde systeem.

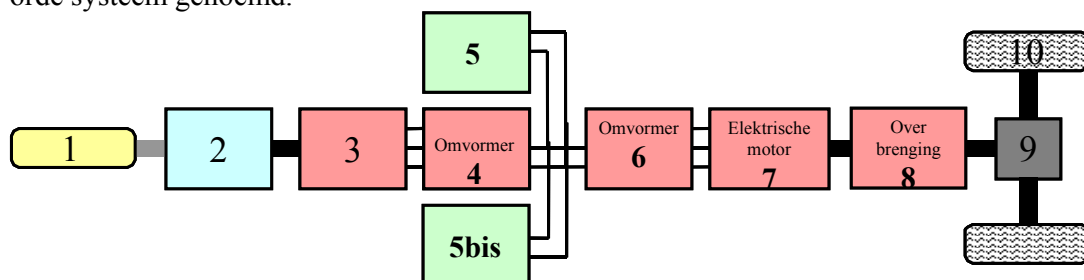


Figuur 2: Elektrische aandrijving

Haar structuur lijkt complexer maar is gekenmerkt door een mechanische verbinding die geen ontkoppeling vereist tussen de motor en de wielen. Men heeft zelfs de mogelijkheid de motor te integreren in de wielen (zowel voor een twee- of vierwielaandrijving). Vanuit stilstand kan de elektrische motor zijn maximaal koppel ontwikkelen.

Hybride structuren

Door elektrische en thermische machines samen te brengen krijgt men hybride structuren, waarvan wij ons beperken tot de presentatie van vier mogelijke groepen. De serie hybride structuur (Figuur 3) is samengesteld uit een volledig elektrische aandrijving bestaande uit een omvormer 6, een elektrische motor 7, een overbrenging 8, een differentieel 9 en de wielen 10. Deze aandrijving wordt elektrisch gevoed door één, twee of drie energiebronnen 4, 5 en 5bis die parallel met elkaar verbonden zijn. Er bestaan twee onafhankelijke mechanische assen. Dit systeem wordt een tweede orde systeem genoemd.



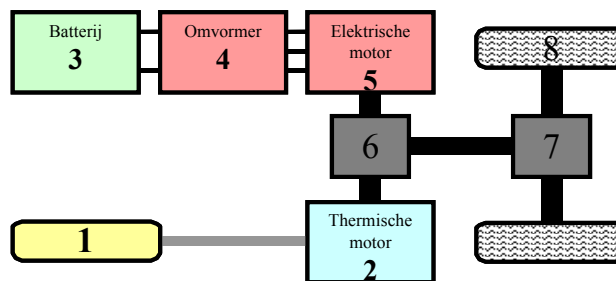
Figuur 3: Serie hybride aandrijving

In een thermisch hybride structuur bestaat de groep 1, 2, 3 en 4 uit een brandstoftank 1 (diesel, benzine, gas), een thermische motor 2 (of gasturbine), een generator 3 en een elektronische omvormer 4 (gelijkrichter - lader). Aan de uitgang van groep 4 kan men in parallel een batterij 5 en/of een eenheid 5bis die gedurende een korte tijd (enkele seconden) piekvermogens kan leveren. De componenten 5 en

5bis kunnen elk afzonderlijk aanwezig zijn, te samen of helemaal niet aanwezig zijn. In dit laatste geval bekomt men de aandrijving die gewoonlijk het “diesel-elektrisch” systeem wordt genoemd.

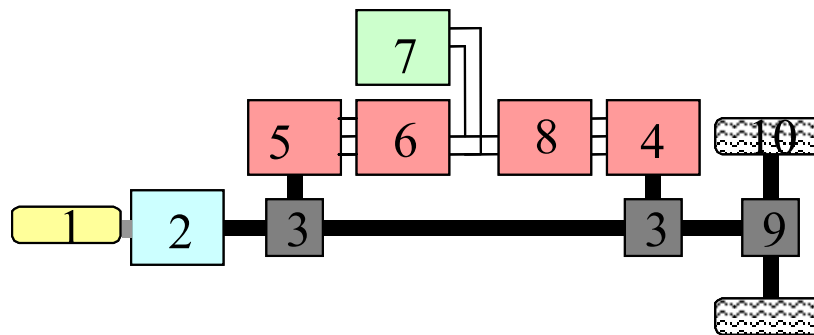
In het geval van een systeem met een brandstofcel bevat de eenheid **1, 2 en 3** een brandstofcel **3** gevoed met waterstof ofwel afkomstig van een opslagtank **1** ofwel van eenheid bestaande uit een brandstoftank **1** en een ‘reformer’ **2**, die de brandstof omzet in waterstof.

De parallel hybride structuur (Figuur 4) bestaat uit een aandrijving met een elektrische motor en een aandrijving met een thermische motor. Het is een tweede orde systeem. Men vindt er dus het koppel brandstoftank **1** – thermische motor **2** die zijn mechanische energie toevoegt aan die afkomstig van de eenheid batterij **3** – elektronische omvormer **4** – elektrische motor **5** ter hoogte van de transmissie **6** om zodoende de wielen **8** aan te drijven via de differentieel **7**.



Figuur 4: Parallel hybride aandrijving

De combinatie van een serie hybride structuur en een parallel hybride structuur wordt een “complexe” of “serie - parallelle” structuur genoemd (Figuur 5).



Figuur 5: Complexe hybride aandrijving

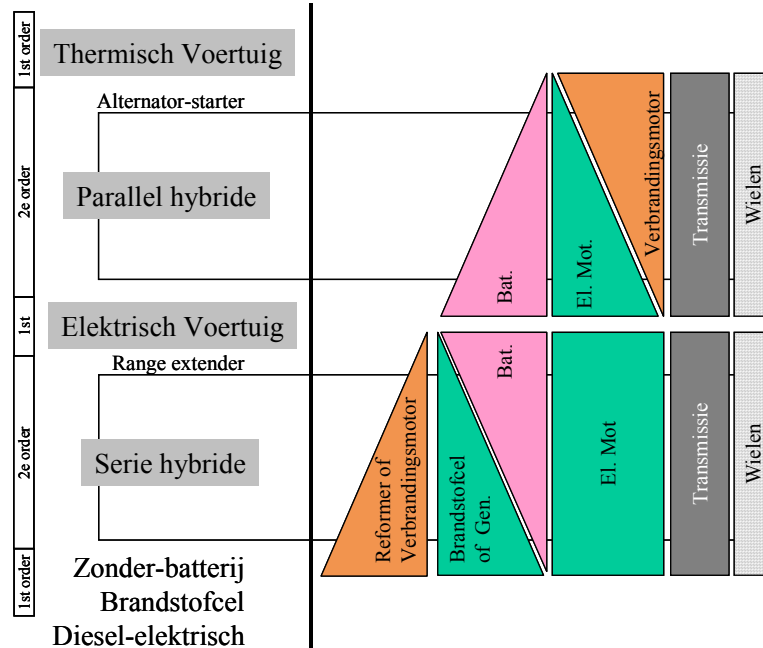
Het bestaat uit drie mechanische assen en twee elektrische machines. Het is een structuur van de derde orde.

De parallelle weg bestaat uit de volgende elementen: brandstoftank **1**, thermische motor **2**, overbrenging **3**, elektrische motor **4**. De serie structuur is terug te vinden in: de brandstof tank **1**, de thermische motor **2**, de overbrenging **3**, de elektrische generator **5**, de lader **6**, de batterij **7** en de elektronische omvormer **8**. Het differentieel **9** is natuurlijk gemeenschappelijk voor beide paden.

Classificatie

Het geheel van de hierboven beschreven eerste en tweede orde referentie structuren (thermisch, elektrische, serie hybride, parallel hybride, brandstofcel voertuig) kan

schematisch weergegeven worden door onderstaand diagram (Figuur 6), die de continuïteit toont tussen deze technologieën in functie van de hybridisatiegraad.



Figuur 6: Classificatie van aandrijfsystemen

Indien we deze figuur overlopen van boven naar beneden komt men eerst het thermisch voertuig tegen gevolgd door de parallel hybride groep, het elektrisch voertuig, de serie hybride groep die zich vermengd met de hybride groep met brandstofcellen om zodoende te komen tot de diesel-elektrische structuur of de structuur met brandstofcel zonder batterij.

terugkerend naar de bovenkant van het diagramma stelt men vast dat bij het vertrekpunt de motorisatie 100% thermisch is zonder batterij (de hulpbatterij voor het straten en de hulptoestellen wordt hier niet beschouwd).

De eerste stap naar hybridisatie komt men tegen in de parallel hybride groep en wordt de “alternator-starter” genoemd. Bij deze oplossing wordt de alternator om de hulpbatterij op te laden, de startmotor en het vliegwiel in één elektrische machine geïntegreerd. De toename in vermogen en in energie van de hulpbatterij maakt het mogelijk de kinetische energie tijdens het remmen te recupereren. Bovendien laat deze oplossing toe om, tijdens het stilstaan van de wagen voor een verkeerslicht of in de file, de thermische motor af te schakelen. De hulpbatterij verschijnt dus onder de vorm van een hybride samenstelling. Het is waarschijnlijk de 42V-norm, voorzien voor de nabije toekomst, die de fysisch vorm zal voorstellen.

Verder afzakkend in de parallel hybride groep observeert men een toename van het vermogen van de batterij alsook van de elektrische motor. Daarentegen neemt het vermogen van de thermische machine af, maar het totaal geïnstalleerd vermogen blijft constant. De aanwezigheid van de batterij met een voldoende grote energie-inhoud en dus ook een voldoende gewicht, laat aan het voertuig toe een bepaalde afstand af te leggen in zuiver elektrische mode.

Onderaan de parallel hybride groep verdwijnt de thermische motor volledig en zodoende bekomt men een zuiver elektrisch voertuig. Het elektrisch voertuig verschijnt dus als het scharnierpunt tussen de parallel hybride en de serie hybride aandrijving.

De daaropvolgende serie hybride groep bevat dus enkel een elektrische aandrijving. In het begin van deze groep komt men de “range-extender” tegen. Een kleine thermische-generator-groep levert een aanvullende energie aan de batterij (of aan het aandrijfsysteem), waardoor de autonomie van het voertuig gevoelig vergroot wordt. Volgend op deze minimale serie hybride structuur stelt men vast dat de verhouding van het thermisch vermogen tot het elektrisch vermogen (van de batterij) toeneemt tot het moment dat de batterij volledig verdwijnt uit de structuur. Zodoende bekomt men de klassieke “diesel-elektrische” aandrijving.

De familie van hybride brandstofcel aandrijvingen verschijnt in de serie hybride groep. De verdeling van het vermogen gebeurt deze keer tussen de brandstofcel en de batterij. Indien er geen batterij aanwezig meer is bekomt men een 100% elektrische aandrijving gekoppeld aan een brandstofcel.

Men ziet dus dat er oneindig veel mogelijkheden zijn, maar het is evident dat ze niet allen dezelfde waarde hebben op het gebied van energetisch rendement als ook op economisch gebied. De evaluatie van de te beschouwen criteria werd ondergebracht in een computer model, dat ontwikkeld werd aan de Vrije Universiteit Brussel in het kader van een doctoraatsonderzoek, dat geraadpleegd kan worden op de volgende website: <http://etecnts1.vub.ac.be/VSP/>.

Evolutie en voornaamste technologische karakteristieken

Thermische motoren

De groep van thermische motoren ondergaat een continue evolutie zowel op het gebied van de verbetering van hun werking als op het gebied van de gebruikte brandstoffen.

Op basis van een studie uitgevoerd door VKA/RWTH van Aachen heeft EUCAR voorspellingen gepubliceerd van de samenstelling van wagenpark voor de periode 2000-2010

Volgens deze studie daalt het percentage benzine voertuigen van $\pm 75\%$ tot 50 a 65%. Daarentegen zal het aandeel van dieselloertuigen stijgen van 25% naar 30 tot 40%.

Dit wordt bevestigd door een studie van IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) die uitgevoerd werd in opdracht van FEBIAC. Deze studie voorziet slechts tegen 2010 vijf procent alternatieve oplossingen, die zowel hybride-, brandstofcel-, aardgas- als waterstofvoertuigen bevat. De verplichtingen opgelegd door de EURO normen leidt tot een toename van het gebruik van elektronica en micro-elektronica om de brandstofinjectie en emissies te kunnen controleren. Meer en meer parameters worden gemeten en gecontroleerd door meer en meer complexe rekeneenheden. Wij zijn in het rijk van de filters, katalysatoren en OBD (On Board Diagnostics) systemen. De richtlijn 98/69/EG legt het gebruik van OBD op voor alle benzinevoertuigen vanaf 2000 en voor alle dieselloertuigen vanaf 2004. Deze systemen generen een signaal die de bestuurder verwittigt wanneer het systeem niet optimaal meer functioneert. Wanneer het systeem niet meer goed functioneert ligt de verantwoordelijkheid om het te herstellen bij de gebruiker van het voertuig.

De veralgemeende invoering van oxydatie katalysatoren (Oxicat), driewegs-katalysatoren, deeltjes filters, CRT systemen (Continuous Regenerating Trap) en emissiecontrole systemen bij koude start zal leiden tegen 2020 tot een verwachte emissiereductie t.o.v. 1990 van :

- 90% CO-emissies (Koolstofoxide)
- 90% KWS-emissies (koolwaterstoffen)
- 78% NO_x-emissies (Stikstofoxides)
- 80% stofdeeltjes-emissies
- 93% benzeen-emissies (koolwaterstoffen)
- 96% SO₂-emissies (Zwavel dioxide)

Bij deze vergelijking zal het totaal aantal afgelegde kilometers met 50% stijgen en de CO₂ (koolstofdioxide) emissies met 26%.

De minder sterke toename van CO₂ emissies is het gevolg van de geprogrammeerde verbetering van het energetisch rendement van de voertuigen, die gerealiseerd zal worden onder de vorm van nieuwe injectiesystemen en controle van de verbranding. Voor benzine voertuigen zal de MPI techniek (Multi Point Injectie) afnemen ten voordele van de volgende systemen:

- GDI-CAI (Gasoline Direct Injection – Controlled Auto Injection)
- DI (Direct injection)
- VVA (Variable Valve Automation)
- VCR (Variable Compression Ratio)
- “Supercharging”
- geïntegreerde alternator-starter, ook wel “Soft Hybride Concept” genoemd
- kleinere motoren gebruikt in gebied met beter rendement

Voor diesellootvoertuigen zal de IDI technologie (Indirect Diesel Injection) vervangen worden door volgende systemen

- DID-HCCI (Direct injection Diesel – Homogeneous Charge Compression Ignition)
- combinatie van de huidige DI (direct injection) met “supercharging” en “geïntegreerde alternator-starter”

Voor de aardgasvoertuigen wordt de techniek van “common rail” algemeen gebruikt.

Het besluit voor de familie van thermische motoren is duidelijk: de realiseerbare winsten zijn belangrijk en moeten deel uitmaken van aangepast onderzoeks- en ontwikkelings-inspanningen. Een zekere voorzichtigheid dringt zich op daar de voorziene vooruitgang, die voor de constructeurs niet eenvoudig realiseerbaar zal zijn, maar wel doenbaar, zich baseert op de aanpassing van de motorisatie aan de EURO-normen (I tot V). Het gedrag van de motorisatie in reël gebruikt sterk wijkt daarentegen echter af van deze normen.

Het is wenselijk om deze verbetering volgens de normen aan te vullen met dynamische testen op een rollenbank en dit tijdens de ganse levensduur van het voertuig.

De elektrische, elektrisch hybride en brandstofcel aandrijvingen

De technologie van de geïntegreerde alternator-strater die toe laat de kinetische energie te recupereren tijdens het remmen, lijkt een centrale rol te gaan spelen in de aandrijving van de toekomst. Dit maakt duidelijk dat de elektrische energie een belangrijke rol zal spelen als partner in de toekomstige aandrijvingen.

Verschillende redenen pleiten in het voordeel van deze optie.

De volledige of gedeeltelijke elektrische aandrijving laat automatisch toe de kinetische energie te recupereren: 40% voor de metro, 10 tot 20% voor voertuigen in stedelijke gebieden.

Elektrische motoren zijn gekenmerkt een zeer hoog rendement (85 tot 95%) in een groot werkingsgebied. Ze laten dus een beter gebruik van de energie toe en dit afhankelijk van de gekozen productie keten.

Het samenbrengen van een elektrische motor met een thermische motor in de parallelle structuur (waarvan de alternator starter één voorbeeld is) laat toe de thermische motor te benutten in een beter werkingsgebied met hoger rendement en de verliezen tengevolge van overgangsregimes te vermijden. Een diversifiëring van energiebronnen wordt mogelijk zonder al teveel moeilijkheden en zonder vermeerdering van verschillende type van infrastructuur.

Voor de productie van elektriciteit kan men volgende centrales beschouwen:

- thermische centrales met klassieke fossiele brandstoffen (steenkool, aardgas, petroleum)
- nucleaire centrales
- waterkrachtcentrales
- zonnepanelen en windmolens
- centrales werkend op biomassa
- verbeterd rendement gebonden aan co-generatie

Betreffende de hybride technologieën bestaat er een controverse in de automobiël wereld: dient het voertuig volledig autonoom te zijn door gebruik te maken van slechts één energiebron of moet het mogelijk zijn het voertuig te verbinden met het elektriciteitsnet om de batterijen te kunnen bijladen en over een zuiver elektrische autonomie zonder emissies te kunnen beschikken?

Het antwoord is natuurlijk niet eenvoudig:

- Het zuiver elektrisch voertuig geeft aanleiding tot de grootste energiewinsten, 40 tot 50%, maar het lijdt (voornamelijk psychologisch) onder zijn gebrek aan autonomie en de duur van de lading van de batterijen. 98% van de trajecten zijn korter dan 50 kilometers en de gemiddelde dagelijkse gebruiksduur van een voertuig is 40 minuten. De laadinfrastructuur is zeer eenvoudig en de installatie vereist geen grote ingrijpingen. De winst aan energie is gebonden aan het hoog rendement van de aandrijving en is min of meer belangrijk in functie van de manier hoe de elektrische energie wordt opgewekt.
- De elektrisch hybride voertuigen kunnen energiewinsten opleveren van 30 tot 40%, maar niet alle structuren hebben dezelfde doeltreffendheid. De diesel-elektrische aandrijving, gebruikt voor stedelijke bussen biedt het voordeel van de grote soepelheid van de elektrische motor, maar geeft aanleiding tot en meerverbruik van 10 a 20%.

Tot slot kan men vaststellen dat de aansluiting aan het elektriciteitsnet, teneinde een traject in zuiver elektrische mode te kunnen afleggen of voor een bijkomende lading van de batterij, aanleiding geeft tot energiewinsten en reductie van CO₂-emissies.

Bij de serie hybride aandrijvingen kunnen een groot aantal verschillende soorten brandstoffen gebruikt worden, daar de verbrandingsmotor kan werken aan een bijna constante snelheid en vermogen, hetgeen een veelzijdig gamma aan motoren en brandstoffen toelaat.

De brandstofcel voertuigen vormen een groep die afzonderlijk dient beschouwd te worden daar zij gebruik maken van waterstof.

Waterstof op zich is een propere brandstof want er wordt enkel water geproduceerd

als afvalstof bij gebruik van waterstof in een brandstofcel en bij het gebruik in een verbrandingsmotor worden er water en NO_x emissies geproduceerd. Maar waterstof moet worden opgewekt.

Het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor wordt door de automobiellindustrie beschouwt als een weg die duidelijk niet tot de beste energetische oplossing leidt.

De meest rationele oplossing is het gebruik maken van de brandstofcel. De bijhorende aandrijving komt overeen met de familie van serie hybride voertuigen, waarvan het eerste onbetwistbaar voordeel de zuivere elektrische aandrijving is. Vijf soorten brandstofcellen maken deel uit van onderzoek en ontwikkelingswerkzaamheden (Tabel 1).

Type	Elektrolyet	Temperatuur (°C)	Toepassingsgebied vermogen
Alkalisch (AFC)	Kalium (vloeibaar)	80	ruimtevaart, transport 1 kW – 100 kW
Polymeer (PEMFC)	Polymeer (vast)	80	draagbare toestellen, transport, stationair 1 W – 10 MW
Fosforzuur (PAFC)	Fosfoszuur (vloeibaar)	200	stationair, transport 200 kW – 10 MW
Gesmolten Carbonaat (MCFC)	Gesmolten zouten (vloeibaar)	650	stationair 500 kW – 10 MW
Vast oxide (SOFC)	Keramisch (vast)	700 - 1000	stationair, transport 100 kW – 10 MW

Tabel 1: Overzicht van verschillende soorten brandstofcellen

De brandstofcellen die tegenwoordig ontwikkeld worden hebben in het algemeen een rendement van de grootte orde van 50%. Eén van de sleutelementen van deze technologie is het elektrolyet. Bij drie van de vijf brandstofcellen uit Tabel 1 wordt een vloeibaar elektrolyet gebruikt en bij de twee andere een vast. Om betrouwbaarheidsredenen en tengevolge van de industrialisatie op grote schaal zijn oplossingen die gebruik maken van een vast elektrolyet aantrekkelijker.

Tegenwoordig komen twee groepen te voorschijn: De brandstofcel met polymeer (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) en de brandstofcel met een vast oxide (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell). De alkalische brandstofcel (AFC, Alkaline Fuel Cell) werd reeds ontwikkeld in België (Elenco) in de jaren 1980 en is, gekoppeld aan een batterij, bruikbaar voor toepassingen in de binnenvaart.

De PEMFC brandstofcel is duidelijk gericht naar het wegtransport, auto's en autobussen.

De SOFC brandstofcel kan gebruikt worden voor zwaar vervoer.

Het in gebruik nemen van de PEMFC brandstofcel voor het wegtransport (voertuigen en bussen) geeft aanleiding tot het probleem van integratie van een voldoende groot vermogen in een beperkte ruimte. Op minder dan 10 jaar werden belangrijke vooruitgangen geboekt, met name door DaimlerChrysler. Van 117 kg/kW in 1997 is men geëvalueerd tot 25 kg/kW in 2000; hetgeen te vergelijken is met de 20 kg/kW van een vergelijkbaar thermisch voertuig.

Tegen 2004 verwacht men een energetische rendement van 42% voor toepassingen die gebruik maken van samengeperst waterstof, 32% indien waterstof geproduceerd wordt op basis van methanol, 25% voor hetzelfde voertuig uitgerust met een

dieselmotor en 20% voor een benzine voertuig. De mogelijke winst lijkt dus belangrijk, maar men moet nog het waterstof of methanol produceren.

In de huidige ontwikkelingen worden twee opties gekozen: enerzijds een toepassing met een brandstofcel die instaat alle dynamiek van de vermogenvariatie op te vangen en anderzijds de oplossing waarbij naast de brandstofcel ook een batterij voorzien is, waardoor het vermogen van de brandstofcel kleiner kan zijn en waarbij de batterij het dynamisch gedrag van het voertuig opvangt. Deze tweede oplossing is dus een serie hybride structuur waarbij twee elektrische energiebronnen parallel verbonden zijn.

Voorstel tot aanbevelingen

Nodige evoluties van de transportmiddelen en -systemen van morgen (2000-2010, 2010-2020)

Door aanpassing van de technologie kunnen bij de transportmiddelen van morgen twee belangrijke doelstellingen bereikt worden:

- het in dienst nemen van verschillende energiebronnen die toelaten een herverdeling van de vraag te realiseren, waardoor een energetische onafhankelijkheid gemakkelijker verzekerd wordt en zodoende een onvermijdbare energiecrisis ontweken wordt, die het gevolg zou zijn van de uitputting van de reserves van de klassieke fossiele brandstoffen;
- de dwingende vermindering van de koolstofdioxide (CO₂) emissies, het belangrijkste broeikasgas ten gevolge van de verbranding van koolwaterstoffen.

Onmiddellijke oplossingen zijn mogelijk.

Een betere intermodaliteit met het openbaar vervoer als kernpunt

De organisatie van een daadwerkelijke intermodaliteit tussen de verschillende transportmiddelen, van heel eenvoudig tot zeer ingewikkeld, wordt een plicht van de maatschappij.

Het ontlasten van de toegang tot de stad is een belangrijk middel om energie te besparen en CO₂ emissies te reduceren.

De ontwikkeling van het GEN (Gewestelijk Expres Net), maar ook een grotere kwaliteit van de treinverbindingen in het algemeen, zou een gevoelige transfer moeten toelaten van de verplaatsingen per wagen naar die met de trein. Het is duidelijk dat een programma dat de herorganisatie en investeringen verspreidt over een periode van 10 tot 15 jaar veel te traag is.

In de stad moet het openbaar vervoer aantrekkelijk worden op het gebied van comfort, frequentie en informatie.

Het overstappen van het ene openbaar transportmiddel naar het andere zou moeten kunnen gebeuren zonder ongemakken en op een efficiënte manier.

Het openbaar vervoer mag niet gehinderd worden door het individueel vervoer. Het gebruik van het openbaar vervoer vereist een verplaatsing te voet, waarvan het comfort en de veiligheid niet gehinderd mag worden door het individueel vervoer.

.

De individuele mobiliteit

Het is niet denkbaar een verbod op te leggen op het individueel vervoer per wagen, maar het gebruik dat ervan wordt gemaakt moet in competitie geplaatst worden met het collectief vervoer via de organisatie van trajecten en het in dienst stellen van rationele reglementen die effectief worden uitgevoerd (snelheidslimieten, parkings, enz.) en een doeltreffende informatie.

De wagen zou niet meer aanzien moeten worden als levensnoodzakelijk en een alternatief aanbod zou moeten vermeerderd worden zoals 'car sharing'; individueel

openbaar vervoer met elektrische voertuigen bedoelt om korte afstanden af te leggen van het ene uitleenstation naar het andere. Het is noodzakelijk dat het aanbod voldoende groot en aangepast is.

De individuele mobiliteit met “eenvoudigere” vervoermiddelen (te voet gaan, milieuvriendelijke tweewielers,...) moet sterk aangemoedigd worden.

Een snelle technologische evolutie op korte en middellange termijn.

Men kan het wagenpark niet van de ene dag op de andere vervangen. Dit vereist een aanpak verspreid over een periode van minstens tien jaar.

Het huwelijk van de elektrische aandrijving met de thermische aandrijving geeft aanleiding tot een belangrijke potentiële energiewinst en vermindering van CO₂ emissies. De elektrische en hybride vervoertechnologie kan zonder al te grote vertraging in gebruik genomen worden als complement op de verbeterd en alternatief thermische transportmiddelen.

Het gebruik van alternatieve brandstoffen (methanol, ethanol, biogas) is eenvoudiger in hybride voertuigen en heeft het voordeel dat de vraag minder groot zal zijn daar hogere rendementen realiseerbaar zijn. De korte en middellange termijn kan dus gekenmerkt worden door hybride technologieën.

Technologische evolutie op lange termijn, verder dan 2010

De vooruitzichten inzake energiebesparing en beperking van emissies gebonden aan de invoering van elektrische en vooral hybride voertuigen geeft aanleiding tot de vraag van de toepasbaarheid van waterstof, zeker betreffende de manier hoe waterstof zal worden opgewekt en de beschikbaarheid van ‘klassieke’ brandstoffen. Waterstof op zich komt slechts in beperkte mate voor in de natuur, maar het waterstof atoom is overvloedig aanwezig in water van meren, rivieren en oceanen en natuurlijk ook in fossiele brandstoffen en afkomstig van biologische processen (methanol, ethanol, biomassa, ...).

De brandstofcel heeft een zeer interessant eigen rendement ($\pm 50\%$), maar men dient het rendement te analyseren van de hele waterstof productieketen.

Het is niet zo interessant om fossiele brandstoffen te gebruiken om waterstof te produceren. In feite emiteert een brandstofcel die gebruik maakt van aardgas een beetje meer koolzuurgas dan de nieuwe dieselmotoren en gevoelig meer dan hybride voertuigen.

Waterstof zal interessant zijn wanneer het geproduceerd wordt uit hernieuwbare energiebronnen.

De elektrolyse van water geeft geen CO₂ emissies indien gebruik gemaakt wordt van elektriciteit dat zelf opgewekt wordt zonder uitstoot van broeikasgassen. Dan kan men echter zich vragen stellen over het spaarzaam gebruik van de energie

Ook de opslag van waterstof dient grondig te worden geëvalueerd.

Om te besluiten kan men stellen dat een grondige analyse noodzakelijk is betreffende de productie, opslag, distributie en gebruik van waterstof. Eveneens is een vergelijking nodig van de aanwending van de brandstofcel in transport systemen met

oplossingen geboden door elektrische en hybride voertuigen, waarbij men de familie van “traditionele” thermische aandrijvingen niet mag vergeten.