

Hybride vervoerssystemen Connexxion;

Een voorstudie naar de status quo en de mogelijkheden.



Enschede, 28 oktober 2005
Maarten Cannegieter
Anthon Henk Sonnenberg

Colofon

Opdrachtgever:	Jan Makkinga
Bedrijf:	Connexion Openbaar Vervoer, Enschede Kottendijk 21 7514 BB Enschede T: 053-482 55 26
Auteurs:	Anthon Henk Sonnenberg en Maarten Cannegieter
Bedrijf:	Avante Consultancy Noorderhagen 4 7511 EL Enschede M: 06-51 27 51 08 E: a.h.sonnenberg@student.utwente.nl W: www.avanteconsultancy.nl
Distributielijst:	Jan Makkinga en Rob van Daalen
Datum:	28 oktober 2005
Code:	AC/CO/HY/DR/281005
Status:	Definitief
Aantal pagina's	16

Inhoudsopgave

1	INLEIDING.....	4
2	DE WERKING VAN EEN HYBRIDE VOERTUIG	5
3	VOOR- EN NADELEN	7
3.1	VOORDELEN	7
3.2	NADELEN	8
4	REFERENTIEPROJECTEN.....	10
5	TOEKOMSTPERSPECTIEVEN	15
6	CONCLUSIES.....	17
	BRONNEN	18

1 Inleiding

In de afgelopen tientallen jaren is de zorg over luchtvervuiling in het algemeen, en in het bijzonder in steden, toegenomen. Wereldwijd kwam het luchtvervuiling- en luchtkwaliteitsprobleem hoog op de politieke agenda te staan. Wegtransport is één van de hoofdoorzaken van dit probleem en er is daarom veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor het reduceren van de emissies van voertuigen. Dergelijke onderzoeken worden door de EU en de nationale overheden gestimuleerd.

Het toepassen van hybride elektrische voertuigen is één van de mogelijkheden waarnaar veel onderzoek gedaan is en deze worden steeds vaker gebruikt. De strikte definitie van een hybride voertuig is: *een voertuig dat voortbewogen wordt door 2 soorten aandrijving*. In het dagelijks gebruik wordt onder een hybride voertuig echter een voertuig verstaan dat zowel een verbrandingsmotor als een elektrische motor heeft (dit is dus één van de vele hybride systemen die mogelijk is). Een hybride systeem kan op twee manier opgebouwd zijn. In serie, waarbij een motor, die op het efficiëntste toerental draait, een generator aandrijft die voor elektriciteit zorgt voor de voortstuwing. De andere mogelijkheid is een parallel systeem waarbij het voertuig in principe door elektriciteit wordt voortbewogen, maar wanneer de elektriciteit op is of wanneer er meer kracht nodig is dan de elektriciteit kan leveren (bijvoorbeeld bij hard rijden) de verbrandingsmotor bijspringt. De verbrandingsmotor zorgt in beide gevallen ook voor het opladen van de accu's. Bij veel hybride systemen wordt de kinetische energie die vrijkomt bij het afremmen ook opgeslagen in de accu's. Vanwege dit systeem levert hybride de meeste voordelen bij gebruik in de stad. Voor busmaatschappijen is hybride dus een interessant systeem omdat er binnen de steden veel (af)geremd dient te worden en de snelheid beperkt is waardoor de verbrandingsmotor niet veel bij hoeft te springen.

Hoewel er veel onderzoek gaande is naar hybride systemen zijn er maar weinig cijfers omtrent de resultaten. Verder zijn een aantal cijfers ook tegenstrijdig. Dit komt mede omdat er op het gebied veel ontwikkelingen zijn die elkaar snel opvolgen. Avante Consultancy heeft daarom een voorstudie voor Connexxion uitgevoerd om de hybride technologie te verkennen en de duidelijk te krijgen wat de status quo is op het gebied van hybride vervoerssystemen, specifiek gericht op bussen. In dit rapport worden de resultaten van deze voorstudie en de mogelijkheden die dit biedt voor Connexxion uiteengezet. Als eerste zal uitgelegd worden hoe een hybride systeem werkt en wat voor verschillende systemen er zijn, daarna zullen voor- en nadelen van hybride systemen besproken worden. Vervolgens worden er een aantal referentieprojecten/-onderzoeken besproken en tot slot wordt er een toekomstverwachting gegeven.

Product: Definitief Rapport		Pag. 4 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

2 De werking van een hybride voertuig

Een hybride voertuig is een voertuig met twee aandrijfsystemen. Zoals in de inleiding is aangegeven, impliceert dit meestal dat één van die aandrijfsystemen een elektrische aandrijving is en het andere een conventionele verbrandingsmotor. Deze verbrandingsmotor kan een benzine-, diesel- of LPG-motor zijn.

Onder de voertuigen die onder de noemer hybride vallen bestaan veel variaties in type aandrijfsysteem, type energievoorziening en de relatieve grootte van de toegepaste componenten. Globaal kunnen er twee soorten hybride systemen worden onderscheiden, de serie hybride en de parallelle hybride. Bij de serie hybride drijft een verbrandingsmotor, die op het efficiëntste toerental draait, een generator aan die de elektriciteit voor de aandrijving van het voertuig opwekt. Het voertuig wordt vervolgens alleen door de elektromotor aangedreven. Hierdoor is er geen versnellingsbak nodig, die de effectiviteit van energieomzetting verlaagt door wrijving. In een parallelle hybride komt de energie van beide energiebronnen beschikbaar op de mechanische koppeling. De verbrandingsmotor is dus mechanisch gekoppeld aan de wielen en zijn energie wordt dus niet omgezet in elektrische energie voor de aandrijving.

Een verdere evolutie is de "mild hybride". Deze voertuigen maken gebruik van een geïntegreerde startergenerator (ISG), die mechanisch gekoppeld is aan de verbrandingsmotor. De ISG op zich is een elektromotor. Hij vervangt het vliegwiel op de motor, fungeert als startmotor bij opstart en als generator bij gewone motorwerking. Bovendien kan de ISG de verbrandingsmotor assisteren bij hoge motorbelasting. ISG systemen maken het mogelijk om (EMIS, 2005):

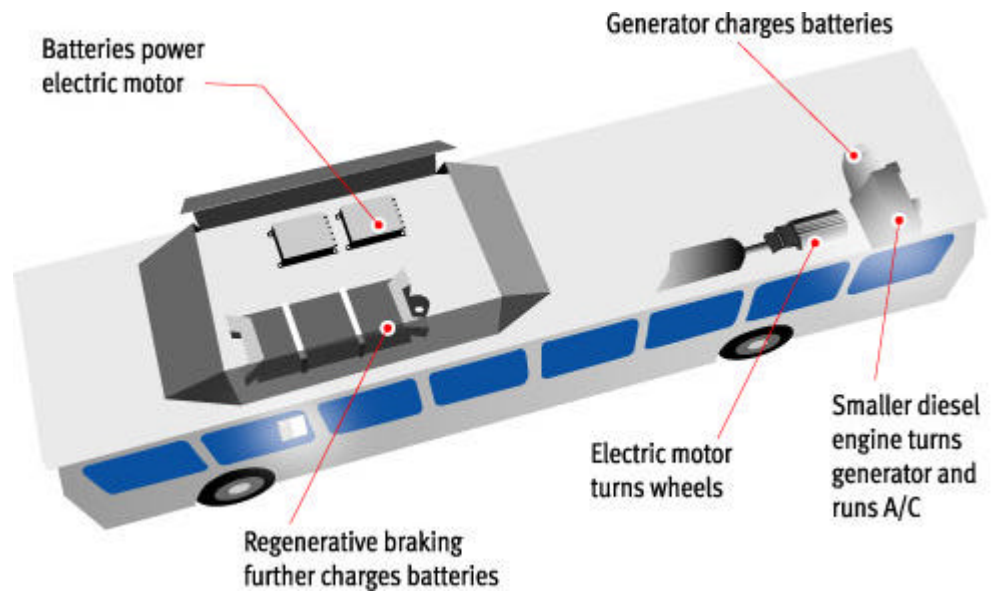
- De verbrandingsmotor af te zetten bij stilstand van het voertuig. De ISG kan de motor terug starten in minder dan een halve seconde.
- De verbrandingsmotor te verkleinen (een deel van het piekvermogen kan door de ISG geleverd worden). Hierdoor wordt ook de globale efficiëntie van de verbrandingsmotor verhoogd.
- Een deel van de remenergie via de ISG op te slaan in de batterijen (regeneratief remmen). Met deze technologie zou het brandstofverbruik kunnen verlaagd worden met 15 à 20%.

Naast de "mild hybride" bestaat er ook een "full hybride" waarvan verwacht wordt dat ze een grote kans maakt op de markt. In tegenstelling tot "mild" kan dit systeem meer dan de motor assisteren of opstarten bij bijvoorbeeld een stoplicht. Bij een "full hybride" kan het voertuig in principe ook volledig op elektriciteit rijden. Zeker in stadsverkeer, waar de snelheden beperkt blijven. Wanneer de snelheden hoger worden, en meer energie benodigd is kan de brandstofmotor assisteren. Dit systeem, wat een combinatie is tussen serie en parallel eigenschappen, kan in tegenstelling tot "mild hybride", tegelijkertijd elektriciteit opwekken en gebruiken. Voorbeelden van "full hybride" zijn de Toyota Prius en Ford Escape (Powers, 2005). Voor bussen wordt dit systeem toegepast in The Whisper (zie hoofdstuk 4, Referentieprojecten).

In figuur 1 op de volgende pagina is de werking van een (serie)hybride voertuig globaal weergegeven. De verbrandingsmotor drijft een elektrische generator aan welke de batterijen op het dak oplaadt. De batterijen drijven vervolgens een elektrische motor aan welke de wielen in beweging zet. Wanneer de bus afremt, wordt de energie die vrijkomt gebruikt om de batterijen verder opgeladen. Dit wordt

Product: Definitief Rapport		Pag. 5 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

regeneratief remmen genoemd. Hierbij fungeren de elektromotoren als generatoren en sturen energie terug naar de batterijen



Figuur 1: De werking van een hybride bus (Bron: www.trimet.org)

3 Voor- en nadelen

In dit hoofdstuk zullen allereerst de voordelen van een hybride bus uiteengezet worden. Vervolgens zal er worden ingegaan op de nadelen.

3.1 Voordelen

Hybride voertuigen hebben een aantal voordelen in vergelijking met conventionele voertuigen. De belangrijkste voordelen hebben betrekking op milieuaspecten.

- Reduceren van emissies

De benodigde verbrandingsmotor in een hybride bus is significant kleiner dan in een conventionele bus. De gasuitstoot bij een conventionele bus is het hoogst wanneer deze optrekt of heuvel op rijdt. De hybride bus gebruikt elektrische energie uit de batterijen waardoor emissies drastisch afnemen in dergelijke situaties (www.trimet.org/environment/hybridbus.htm).

Afhankelijk van de uitvoering hebben hybride voertuigen de volgende voordelen ten opzichte van conventionele voertuigen op het gebied van emissies (EMIS, 2005):

- Hybride voertuigen kunnen in bijvoorbeeld stedelijk gebied volledig elektrisch rijden en dus zonder lokale emissies (alleen full hybriden)
- Hybride voertuigen kunnen bij het stoppen en optrekken volledig elektrisch rijden
- Koude start emissies kunnen gereduceerd worden bij hybride voertuigen. Bij benzine-wagens vormen deze koude start emissies een groot probleem; in de eerste minuten van een rit emitteert het voertuig relatief veel. De koude start emissies worden voor een groot deel veroorzaakt door mengselverrijking en doordat de katalysator nog niet op temperatuur is. Hybride voertuigen kunnen het eerste deel van de rit elektrisch rijden, terwijl de katalysator elektrisch kan worden opgewarmd, voordat de verbrandingsmotor wordt gestart.

Een veel gehoorde kritiek op elektrische voertuigen is dat er elektriciteit opgewekt moet worden in een elektriciteitscentrale, waardoor de netto emissie nauwelijks gereduceerd wordt. Voor een hybride voertuig is dit in de meeste gevallen niet het geval omdat de elektriciteit in het voertuig zelf wordt opgewekt.

- Hoger rendement

Er zijn een aantal redenen waarom hybride voertuigen – vooral in stadsverkeer - zuiniger zijn dan conventionele voertuigen (EMIS, 2005):

- Het hybride systeem biedt de mogelijkheid tot regeneratie van remenergie waardoor efficiënter met energie kan worden omgesprongen.
- De verbrandingsmotor kan worden gedimensioneerd op gemiddelde belasting en niet op piekbelasting.
- Een serie hybride kan voorzien zijn van een relatief kleine motor die optimaal is afgesteld op een bepaald toerental en draait op bijna vol vermogen.

Met deze eigenschappen kan een rendement van 35 tot 40% worden gehaald terwijl een conventionele automotor niet meer dan 18% haalt in stadsverkeer.

Product: Definitief Rapport		Pag. 7 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

De toepassing van hybride voertuigen heeft naast het positieve effect op het milieu ook een positief effect op het 'groene imago' van een stad of bedrijf, wat burgers tegenwoordig aanspreekt (EMIS, 2005).

- Geluid

Vanwege de kleinere dieselmotor in een hybride bus is de geluidsoverlast kleiner. Ook optrekken en heuvel op gaat zonder veel lawaai. Het geluidsniveau van de hybride bus benadert dat van een personenauto. Dit aspect is een groot bijkomend voordeel voor de omgeving als wel voor de inzittenden (www.trimet.org/environment/hybridbus.htm).

- Comfort

Naast het lage geluidsniveau zorgt ook het lage trillingsniveau voor een groter comfort voor de inzittenden. Tevens zorgt de verbeterde acceleratie voor meer comfort.

- Lagere onderhoudskosten

Over de onderhoudskosten van een hybride bus bestaat nog weinig duidelijkheid en eenduidigheid. Verwacht wordt echter dat deze in de toekomst, wanneer er meer hybride bussen worden toegepast, lager zullen zijn dan die van een conventionele bus vanwege (www.gm.com en www.trimet.org):

- Minder slijtage van remmen in verband met regeneratief remmen
- Geen onderhoud aan versnellingsbak
- Langere levensduur olie

Hiertegenover staat echter, dat de twee aandrijfsystemen die aanwezig zijn, de onderhoudskosten weer omhoog zullen drijven (EMIS, 2005).

- Gewicht

Het gewicht van de hybride bus zal door gebruik van een kleinere brandstofmotor en lichte materialen vergelijkbaar of zelfs lichter zijn dan de conventionele bus.

- Infrastructuurvoorzieningen

In vergelijking met voertuigen die bijvoorbeeld gebruik maken van een brandstofcel of alleen een elektrisch aandrijfsysteem hebben, hebben de hybride voertuigen als voordeel dat er geen aparte infrastructuurvoorzieningen nodig zijn omdat zij gebruik maken van dezelfde brandstof als conventionele voertuigen.

3.2 Nadelen

Naast de genoemde voordelen heeft de hybride bus ook enkele nadelen ten opzichte van conventionele bussen

- Kosten

Daar 2 aandrijfsystemen in 1 voertuig worden geïntegreerd, komt men tot hogere kostprijzen dan het conventionele voertuig. De meerkosten liggen momenteel rond de 50%. De brandstofkosten liggen daarentegen lager dan voor het conventioneel

Product: Definitief Rapport	Pag. 8 / 18	
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005
28 oktober 2005		

voertuig omwille van het lagere verbruik. Sommige hybride voertuigen kunnen via het net worden bijgeladen, andere niet. Dit heeft een invloed op verbruik en exploitatiekosten. Door schaalvergroting zal de kostprijs mogelijk dalen in de toekomst (EMIS, 2005).

- Nog relatief weinig ervaring

Hoewel meer en meer steden hybride bussen invoeren is er nog niet zo heel veel ervaring met de technologie op grote schaal en met name op de lange termijn. Hoewel sommige steden al experimenteren sinds de jaren negentig is de technologie nog niet geoptimaliseerd en zijn er nog verschillende problemen die aandacht vereisen. De ontwikkelingen zijn nog in volle gang.

- Onzekere toekomst

De hybride bus wordt gezien als tijdelijke oplossing totdat andere technologieën (zoals de brandstofcel) verder ontwikkeld zijn en toegepast kunnen worden. Meer hierover vindt u in hoofdstuk 5, Toekomstperspectieven.

- Geluids- en trillingsproblemen

Hoewel de hybride bus aanzienlijk stiller is dan de conventionele bus kan er nog altijd geluids- en trillingshinder ontstaan in verband met het verschil in frequentie van de 2 motoren. Dit probleem zal in de toekomst echter waarschijnlijk opgelost worden (Houthoofd & Kindt, 2004).

Product: Definitief Rapport		Pag. 9 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

4 Referentieprojecten

Sinds halverwege de jaren negentig wordt er overal ter wereld meer en meer geëxperimenteerd met hybride bussen en worden deze in toenemende mate toegepast. Hoofdredekenen voor het vervangen van conventionele bussen door hybride zijn de emissie verlaging en het hogere rendement. Gezien het feit dat de meeste projecten zich nog in de beginfase bevinden zijn de evaluatiegegevens beperkt en is er nog weinig ervaring met de technologie op langere termijn. Zes verschillende projecten worden hieronder nader toegelicht.

- Eindhoven

In Eindhoven loopt sinds 1 juli 2005 een project genaamd Phileas (www.phileas.nl). Het project is een nationaal en internationaal demonstratieproject maar dient er ook voor om het gebruik van het Openbaar Vervoer te stimuleren. Men tracht dit te bereiken door in de spits te zorgen voor een dienstregeling waarbij er om de 10 minuten een bus passeert.



Figuur 2: Voertuig van het Phileas-systeem

Het Phileas-project bestaat uit drie onderdelen: een busbaan met voertuiggeleiding, een moderne bus en maatregelen om OV-gebruik te stimuleren. De busbaan bestaat uit een betonnen wegdek waarin magneten verwerkt zijn. Deze magneten dienen er voor om de bus op zijn baan te houden. Dit kan met grote precisie en door toepassing van deze magneten kan een bus in principe zonder bestuurder zijn route volgen en stoppen bij haltes waar dat nodig is. Echter, omdat in Eindhoven de busbaan niet afgesloten is, moet er nog een bestuurder aanwezig zijn voor het geval van plotseling overstekende voetgangers of andere obstakels. De bus zelf bestaat uit een voertuig met een lage vloer die een gelijke hoogte heeft met de perrons. Het hybride systeem bestaat uit een LPG-motor die een generator aandrijft. Aangezien de LPG-motor niet de wielen aandrijft maar een generator kan de motor op het meest efficiënte toerental blijven draaien waardoor brandstofverbruik en uitstoot geminimaliseerd worden. De generator wekt de energie op die nodig is voor de elektromotoren die de wielen aandrijven. Energie die teveel wordt opgewekt wordt opgeslagen in accu's alsmede de kinetische energie die vrij komt bij het afremmen. Met behulp van deze opgeslagen energie kan Phileas over een drietal kilometers, bijvoorbeeld in het stadscentrum, geheel emissie vrij rijden. Men beweert dat de Phileas 30 procent zuiniger is in het gebruik dan een LPG bus van dezelfde omvang.

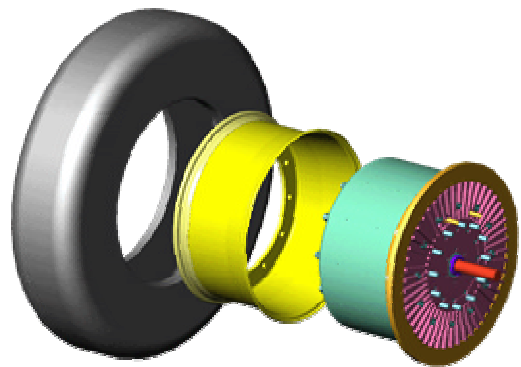
Dit project wordt in Eindhoven uitgevoerd vanwege een aantal redenen. Ten eerste bestonden er in de regio al plannen voor een Hoogwaardig Openbaar Vervoer (HOV)

Product: Definitief Rapport	Pag. 10 / 18	
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005
28 oktober 2005		

netwerk. Phileas past goed in een HOV systeem omdat de dienstregeling regelmatig en met korte tussenpozen kan zijn. Daarnaast is er bij Eindhoven een VINEX-locatie genaamd Meerhoven. Op dit moment wordt er nog gebouwd aan dit project, maar uiteindelijk zal Phileas door de wijk rijden en Meerhoven verbinden met de belangrijke locaties van de stad zoals het Centraal Station en de luchthaven. Tot slot is er ook gekozen voor Eindhoven omdat de schaalgrootte beperkt is en omdat er betrokkenheid aanwezig is bij de regionale partijen. Kosten voor het huidige (totale) project liggen rond de 100 miljoen euro (www.phileas.nl). Evaluatiegegevens van het project zijn op dit moment nog niet voor handen.

- The Whisper

The Whisper is een bus die voortbewogen wordt door een elektrisch aangedreven wiel. Het wiel is ontwikkeld door E-traction (www.e-traction.com), een consortium van Nederlandse bedrijven en TNO. Het innovatieve aan dit wiel is dat de elektromotor in de wielen zit en elk wiel als het ware om de motor heen draait.



Figuur 3: The Wheel

Het systeem van de motor in de wielen is erg efficiënt (90% van de energie wordt omgezet in bewegingsenergie) omdat er geen differentieel en geen versnellingsbak tussen de motor en de wielen geplaatst hoeft te worden die voor wrijving zorgen, en dus voor energieverlies. E-traction heeft het systeem toegepast in een bus, waarvan The Whisper in Nederland getest is. Het systeem laadt zich 's nachts op via netstroom en gebruikt deze elektriciteit om overdag te rijden. Het aanvullen van de accu's overdag gebeurt door een dieselgenerator en door het omzetten van kinetische energie in elektriciteit.



Figuur 4: The Whisper, met duidelijk in plaats van een conventioneel achterwiel, de elektromotor

Bij de eerste tests waren er al verbeteringen wat betreft het aantal decibels dat de bus produceert en de luchtvervuiling. Bij een verbeterde versie (met een kleiner wiel/motor combinatie) waren er zelfs drastische verbeteringen bij het

Product: Definitief Rapport	Pag. 11 / 18	
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005
28 oktober 2005		

brandstofverbruik. Tests wezen uit dat The Whisper 2,5 keer efficiënter rijdt dan de meest efficiënte dieselbus.

- E.U. Sagittaire

De Europese Unie (E.U.) heeft ook een project op het gebied van hybride bussen lopen. Dit is een project dat in 11 steden wordt uitgevoerd. Het project is gestart in 1997. Het belangrijkste doel van dit project is om aan te tonen dat hybride bussen in normale omstandigheden kunnen opereren, net zoals conventionele bussen. Daarnaast wil men in de betrokken steden ook de modale split veranderen, van de auto naar het openbaar vervoer. Doel hiervan is om vervuiling en overlast te verminderen, door toepassing van hybride vervoer. Daarnaast wil men naar aanleiding van dit project richtlijnen opstellen voor toekomstige projecten en verschillende hybride bussen onderling en ten opzichte van conventionele bussen vergelijken. Het project liep echter vast omdat er moeilijkheden ontstonden met busfabrikanten en de techniek (Schiltz, 1999)

- GM bussen

Seattle was in 2004 de eerste stad met hybride bussen van General Motors (GM). Volgens GM kan er met hun bussen een brandstofbesparing van 50% en een emissiebesparing van 90% behaald worden. Tevens zijn de bussen stiller en comfortabeler dan conventionele bussen. (Meredith, 2005) Het systeem dat GM gebruikt wordt gemaakt door het dochterbedrijf Allison Transmission. De bussen hebben een parallel hybride systeem. Dit betekent dat de wielen zowel door de dieselmotor, als door de elektrische motor aangedreven kunnen worden. Het teveel



Figuur 5: Hybride bus van GM

aan energie dat de motor genereert wordt opgeslagen in accu's voor later gebruik bij bijvoorbeeld optrekken of langzaam rijden. Daarnaast wordt ook kinetische energie tijdens het afremmen opgeslagen in de accu's. GM beweert dat er, zoals eerder vermeldt, een besparing van 50% in brandstof en 90% in emissie te verkrijgen is. Dit wordt echter tegengesproken door een onafhankelijk onderzoek uitgevoerd in Connecticut. In tegenstelling tot wat er verwacht werd, ontdekte Uconn dat er geen

significant verschil is wat betreft emissies tussen hybride en conventionele bussen. Ook de claim van GM dat de bussen 50% minder brandstof zouden verbruiken klopt niet. In hetzelfde onderzoek werd een besparing van 10 tot 15% gemeten. Andere steden hebben dezelfde bevindingen of zelfs nog slechtere. Een verklaring voor deze uitkomsten is dat GM de bussen niet heeft afgesteld om zo efficiënt mogelijk te rijden, maar op de beste prestatie. Elektriciteit wordt dan niet gebruikt om diesel te besparen, maar om sneller op te trekken en harder te rijden (Holmen, 2005).

- Sao Paolo

Sinds 2001 wordt er in Sao Paolo gebruik gemaakt van hybride bussen voor het openbaar vervoer in de stad. In Sao Paolo is onderzoek uitgevoerd naar de relatie tussen energie efficiëntie (km/L) en de rijsnelheid (km/h). Het doel van deze studie is het bepalen van de snelheid waarmee hybride bussen het meest efficiënt omgaan met brandstof, waarna met deze snelheid kan worden bepaald welke gebieden en/of routes geschikt zijn voor toepassing van hybride bussen (D'Agosto & Ribeiro, 2005).

Een onderzoeksteam van de Transportation Engineering Program van de Federale Universiteit van Rio de Janeiro heeft dit onderzoek uitgevoerd met als doel te onderzoeken hoeveel diesel er bespaard kan worden en in hoeverre de CO2 uitstoot beperkt kan worden. Voor het onderzoek is een bepaalde buslijn aangewezen als proeftraject. Daarna is voor verschillende beladingen de route vijf maal afgelegd om tot de meetresultaten te komen.

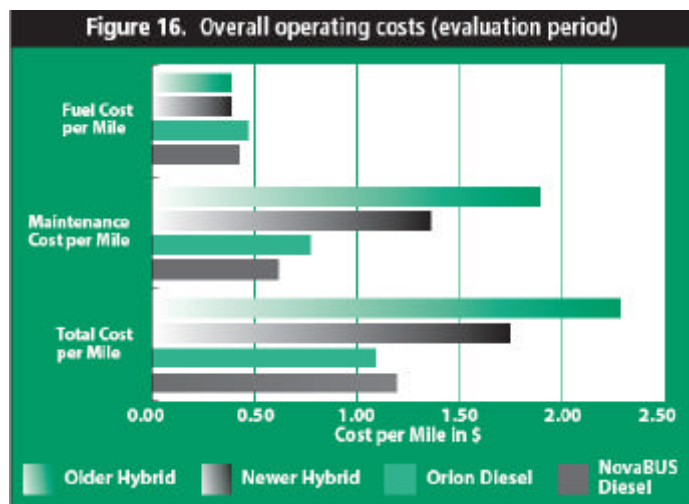
Uit de resultaten van deze proef bleek dat er bij gebruik van hybride bussen wat betreft brandstofverbruik een reductie is van ongeveer 23% ten opzicht van conventionele bussen, bij een gemiddelde trajectnelheid tussen de 20 en 25 km/h. Na deze empirische test is er een model gemaakt die de meetgegevens interpreteerde voor verschillende verkeerscondities. Hieruit blijkt dat de meest efficiënte gemiddelde snelheid op een busbaan ligt tussen de 15 en 25 km/h (D'Agosto & Ribeiro, 2005). Voor een hybride bus is een busbaan ook de meest efficiënte verkeersconditie. Dit komt omdat er op een busbaan geen ander verkeer is waardoor een bus abrupt af moet remmen. Abrupt remmen verstoort namelijk de efficiëntie van het omzetten van de bewegingsenergie van de bus naar elektrische energie.

- New York

In 1998 zijn in New York 10 hybride bussen in gebruik genomen. Tussen 1999 en 2001 hebben deze bussen meegedaan aan een onderzoek naar het functioneren van de bussen en hun positieve en negatieve effecten. Uit dit onderzoek kwamen de volgende resultaten (Chandler et al, 2002):

- Het brandstofverbruik van hybride bussen ligt 10% lager dan de conventionele bussen. Echter uit andere testen blijkt dat dit vaak hoger ligt en mogelijk in de toekomst veel hoger kan liggen als er meer bekend is over afstellingen;

- Onderhoudskosten over de periode lagen voor hybride bussen hoger dan conventionele bussen. Dit heeft drie redenen:

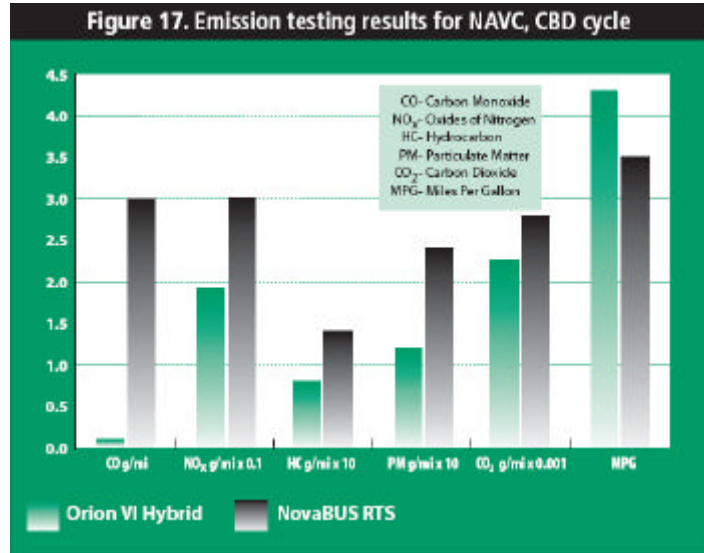


Figuur 6: kosten voor gebruik van verschillende typen bussen. Bovenste twee balken zijn voor hybride bussen, de onderste twee voor diesel

- o De hybride bussen waren prototypes
- o Onervarenheid met het systeem bij de monteurs
- o Hybride bussen waren slechts een klein percentage van het totaal aantal (conventionele) bussen

Wanneer er meer hybride bussen in gebruik worden genomen wordt verwacht dat de onderhoudskosten zullen dalen;

- Emissies van hybride bussen liggen lager dan conventionele bussen, echter resultaten kunnen verschillen per route;
- Olieverbruik ligt voor hybride bussen en conventionele bussen ongeveer op hetzelfde niveau.



Figuur 7: Emissies. Linkse balk is van een hybride bus, rechts van een dieselbus

5 Toekomstperspectieven

De toekomstperspectieven voor hybride bussen zijn erg onduidelijk. De ontwikkelingen van andere alternatieve brandstoffen hebben een grote invloed. Hybride aandrijfsystemen zijn een methode om voertuigen milieuvriendelijker te laten rijden. Er is echter nog steeds een brandstofmotor benodigd die fossiele brandstof verbruikt en dus uitstoot heeft. Een andere energiebron die geen uitstoot heeft is het uiteindelijke doel voor voertuigen (zero-emission). De belangrijkste concurrenten van de hybride systemen zijn de brandstofcel, de volledig elektrische aandrijfsystemen en de huidige brandstofmotoren (EMIS, 2005):

Een brandstofcel zet waterstof (H_2) om in elektriciteit wat gebruikt wordt om de elektromotor aan te drijven. Het rendement van een brandstofcel is 2 tot 3 keer hoger dan een conventionele brandstofmotor en het voertuig is 100% schoon, omdat er als bijproduct slechts water ontstaat. Nadeel is dat er H_2 geproduceerd moet worden, vaak met fossiele brandstof waardoor er (indirect) alsnog uitstoot en verbruik van fossiele brandstof is. De ontwikkelingen hebben nog een lange weg te gaan, hoewel er al wel een aantal demonstratieprojecten gestart zijn, onder andere in Amsterdam, waar onder de naam Clean Urban Transport for Europe (CUTE) 2 jaar lang 3 brandstofcelbussen van Mercedes Benz in exploitatie zijn gegaan. Amsterdam was de zevende stad in Europa die mee doet aan het Europese project CUTE (<http://www.brandstofcel.com/bus3.htm>). Het project is gestart eind 2003 en er is € 7,5 miljoen mee gemoeid. De technologie is nog volop in ontwikkeling en verwacht wordt dat het nog jaren zal duren voordat deze brandstof op grotere schaal in productiemodellen toegepast kan worden. Waterstof kan ook in een vonkstekingsmotor (ofwel een gewone ontbrandingsmotor aangepast aan H_2) gebruikt worden. Uitstoot van deze motor is dan bijna alleen waterdamp. Net zoals bij de brandstofcel moet ook nu H_2 gemaakt worden met dezelfde nadelige gevolgen. Hiervan rijden er slechts nog prototypes rond. Voor beide methoden dient er tevens een infrastructuur ontwikkelt te worden zodat men H_2 kan tanken.

Op dit moment bestaan er productiemodellen voor elektrische auto's. Het rendement van elektrische voertuigen is ongeveer 50% en daarmee een stuk hoger dan dat van conventionele voertuigen. Elektrische voertuigen produceren geen uitlaatgassen op de plaats van gebruik, maar het is, zoals eerder aangegeven, ook niet zo dat deze voertuigen emissievrij zijn. De benodigde elektriciteit wordt in een elektriciteitscentrale opgewekt en de daarbij vrijkomende emissies moeten naar rato van energiegebruik aan elektrische voertuigen worden toegerekend. Elektrische voertuigen zijn momenteel nog duur in aanschaf en de prestaties vallen nog erg tegen. Vooral de beperkte actieradius (70 tot 100km), het grote gewicht aan batterijen en de hoeveelheid batterijen, wat beperkingen oplevert voor de (laad)ruimte, vormen een probleem. Verder ontbreekt ook voor deze auto's de infrastructuur om (onderweg) energie op te nemen (EMIS, 2005). Voor stadsbussen zijn deze problemen geringer. Hoewel elektrisch aangedreven wagens, bussen en vrachtwagens nog een uitzondering vormen op de wegen, gaan de ontwikkelingen echter snel en wordt er bijvoorbeeld veel energie gestoken in het verbeteren van de batterijen.

De derde concurrent voor hybride systemen zijn de huidige fossiele brandstoffen. Deze kunnen een bedreiging vormen voor hybride, maar alleen als diesel- en benzinemotoren zuiniger en milieuvriendelijker worden dan ze nu zijn. Door de dreigingen van alternatieve technologieën wordt er momenteel ook hard gewerkt aan het verbeteren van verbrandingsmotoren en aan het toepassen van schonere brandstoffen. Het toepassen van aardgas is een van de opties. Aardgas is niet

Product: Definitief Rapport		Pag. 15 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

duurzaam maar wel schoon. Het gebruik van aardgas in plaats van diesel voor zwaar vervoer vermindert de emissie van deeltjes en NO_x aanzienlijk. Dit, samen met het lagere geluidsniveau van aardgasvoertuigen, maakt aardgas in het bijzonder geschikt voor toepassing in stedelijke gebieden. Gezien het extra gewicht en volume van de aardgastank worden aardgasvoertuigen vooral in stadsverkeer gebruikt, waar het aantal afgelegde km per dag toch beperkt blijft (EMIS, 2005). Aardgasbussen worden steeds vaker toegepast. In bijvoorbeeld Haarlem zal Connexxion aardgasbussen toe gaan passen en in Wageningen zal BBA dit doen.

De ontwikkelingen van de verschillende technieken gaan erg snel en kunnen een gevaar vormen voor hybride vervoerssystemen. Uit een onlangs uitgevoerd onderzoek in Taiwan blijkt echter dat de hybride bus momenteel het beste alternatief is in de Taiwanese steden (Tzeng et al, 2005). Verschillende experts hebben meegewerkt bij het uitvoeren van de multi-criteria analyse (MCA). In deze analyse zijn onder andere conventionele diesel bussen, LPG-bussen, volledig elektrische bussen, brandstofcelbussen en verschillende soorten hybride bussen vergeleken. In totaal zijn er 11 verschillende criteria gebruikt om de alternatieven met elkaar te vergelijken, waaronder: rendement, luchtvervuiling, geluid, onderhoudskosten, implementatiekosten, beschikbaarheid van energie, zijn er extra faciliteiten benodigd, snelheid van verkeersstromen, en comfort.

Uit de MCA blijkt dat de hybride bus met benzinemotor het beste alternatief is ten opzichte van alle andere, en zeker ten opzichte van de conventionele bus. De hybride bus staat op plaats 1 (van 12) en de conventionele bus op plaats 10. Er wordt echter een kanttekening geplaatst dat hybride bussen vervangen zullen worden wanneer andere technieken, zoals volledig elektrische en de brandstofcel, verbeterd zijn (Tzeng et al, 2005). Over een termijn waarop dit zal gebeuren wordt niet gesproken.

Het National Renewable Energy Laboratory (NREL), een onderzoekslaboratorium in de Verenigde Staten wat zich richt op het zware wegverkeer, waaronder bussen, heeft de mogelijkheden onderzocht om emissies en brandstofverbruik te verlagen bij deze categorie. Uit dit onderzoek volgt dat hybride aandrijving, maar ook gewichtsreductie, de belangrijkste parameters zijn die van invloed zijn op brandstofbesparing. Hybride aandrijving verliest echter haar voordeel ten opzichte van conventionele bussen wanneer de hybride bussen op hoge snelheid voor lange duur rijden (O'Keefe en Vertin, 2002). Voor stadsbussen is dit niet aan de orde.

Naast de concurrentiegevaaren kan er tevens de vraag gesteld worden welke hybride techniek als standaard gebruikt gaat worden. Net zoals met de VHS en Betamax kan dit een probleem opleveren bij hybride systemen, zoals gebleken is bij Sagittaire waar fabrikanten niet tot een geschikt voertuig konden komen. Hier is nog weinig inzicht in en dit kan de toekomst van (bepaalde) hybride systemen beïnvloeden.

Product: Definitief Rapport		Pag. 16 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

6 Conclusies

Met oog op het tegengaan van de luchtvervuiling en het verbeteren van luchtkwaliteit is er de laatste tientallen jaren veel aandacht besteed aan de mogelijkheden de emissies van voertuigen te reduceren. Wegtransport draagt voor een groot deel bij aan de luchtvervuiling en hier valt dan ook veel winst te behalen met het oog op het reduceren van emissies. De ontwikkeling van duurzame vervoerssystemen is in volle gang en een aantal van deze technologieën wordt al toegepast in de praktijk en is op de markt verkrijgbaar. Een van deze technologieën is het hybride vervoerssysteem. Het hybride vervoerssysteem heeft veel voordelen ten opzichte van conventionele systemen, vooral voor gebruik in de stad. De snelheid is hier namelijk beperkt en doordat er veel (af)geremd moet worden kan er veel energie teruggewonnen worden met regeneratief remmen. Hybride systemen zijn dan ook vooral geschikt voor stadsbussen. Wereldwijd wordt de hybride bus meer en meer toegepast in steden. De uitstoot van schadelijke gassen ligt bij een hybride bus significant lager dan bij conventionele bussen en het rendement is hoger, waardoor brandstof bespaard wordt. Ook het lage geluidsniveau en de hoge mate van comfort maken een hybride bus aantrekkelijk. Naast het feit dat de kosten voor een hybride bus hoger liggen dan de kosten voor een conventionele bus, wordt als grootste nadeel van een hybride bus de onzekere toekomst gezien. Vooral technologieën zoals volledig elektrische bussen en brandstofcelbussen vormen, op de lange termijn, een bedreiging voor de hybride bus. Gezien het feit dat deze technologieën nog veel problemen te overwinnen hebben en nog erg kostbaar zijn, wordt de hybride bus gezien als een goede overbrugging tot de tijd dat deze technologieën verder ontwikkeld en verbeterd zijn. Met het oog op de relatief korte afschrijvingsperiode van een bus en met het oog op de duur van een concessie biedt de hybride bus dan ook goede mogelijkheden voor implementatie voor Connexxion. Het feit dat er niet geïnvesteerd hoeft te worden in infrastructurele voorzieningen, wat bij elektrische bussen en brandstofcelbussen wel het geval is, maakt de hybride bus ook een aantrekkelijk alternatief.

Connexxion is een vooruitstrevend bedrijf dat graag voorop loopt met de nieuwste ontwikkelingen om de concurrentie een stap voor te zijn en daarnaast om een positieve en innovatieve uitstraling te creëren. Ook met het oog op concessies is het voor Connexxion van groot belang zich op het gebied van de nieuwste technologieën te richten. Het toepassen van hybride bussen past uitstekend in dit streven. De toepassing van hybride voertuigen heeft naast bovengenoemde voordelen ook een positief effect op het 'groene imago' van het bedrijf, wat burgers en overheden tegenwoordig aanspreekt. Door dit in eerste instantie te koppelen aan de herbouw van de landelijk bekende wijk Roombeek kan het imago van Connexxion versterkt worden.

Product: Definitief Rapport		Pag. 17 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexxion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005

Bronnen

Literatuur:

Chandler, K., Walkowicz, K. en Eudy, L. (2002), *New York City Transit Diesel hybrid electric buses: final results*, Oak Ridge: U.S. Department of Energy/NREL

D'Agosto, M.A. & Ribeiro, S.K. (2005), *The potential fuel economy due to hybrid-drive buses use: the case of Brazilian urban transit corridors*, Urban Transport 11, Wessex Institute of Technology

Holmen, B. (2005), *UConn Study Finds No PM Emissions Reduction from GM Parallel Hybrid Buses*, Green Car Congress
[Online] http://www.greencarcongress.com/2005/09/uconn_study_fin.html

Houthoofd, T. & Kindt, P. (2004), *Geruisloos door de stad*. Leuven: Katholieke Universiteit van Leuven.

Meredith, M. (2005), *First GM Hybrid Transit Buses Go to Work*
[Online] <http://auto.msn.com>

O'Keefe, M. P. en Vertin, K. (2002), *An Analysis of Hybrid Electric Propulsion Systems for Transit Buses*, Golden Colorado: NREL

Powers, E. (2005), *How hybrid cars work*
[Online] hybridcars.about.com

Schiltz, J. (1999), *Sagittaire*,
[Online] <http://europa.eu.int/comm/energy/en/thermie/sagittair.htm>

Tzeng, G.H., Lin, C.W. and Opricovic, S. (2005). *Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation*. Energy Policy, Vol. 33, pp. 1373-1383

Websites:

EMIS (Het energie en informatiesysteem voor het Vlaamse gewest):
<http://www.emis.vito.be>

E-traction: <http://www.e-traction.com>

Phileas Eindhoven: <http://www.phileas.nl>

<http://www.brandstofcel.com/bus3.htm>

<http://www.dto-kov.nl/themas/main-verplaatsen.htm>

http://www.gm.com/company/gmability/adv_tech/100_news/hybridbus_081905.html

http://www.greencarcongress.com/2005/09/uconn_study_fin.html

<http://www.haarlem.nl/smartsite27414.htm>

<http://www.rqriley.com/ev-tech.htm>

<http://www.trimet.org/environment/hybridbus.htm>

<http://www.vrom.nl/>

http://www.wageningenbereikbaar.nl/050714_Lijn_88_op_aardgas.php

Product: Definitief Rapport		Pag. 18 / 18
Project: "Hybride vervoerssystemen Connexion"		
28 oktober 2005	Status: Definitief	AC/CO/HY/DR/281005