

ENERGIEBESPARING DOOR ELEKTRISCHE AUTO'S IN STADSVERKEER

G.F. BAKEMA

ABSTRACT

On behalf of the NOVEM a study has been carried out by the unit ESC of the Netherlands Energy Research Foundation (ECN) to calculate the energy savings aspects of electric vehicles.

The primary energy use for 4 types of vehicles (VW Golf/Citystromer, Peugeot 205, Renault Express and Renault Master) with conventional, Na-S and Li batteries has been compared with the primary energy use of the same car with internal combustion engine on petrol or diesel.

The energy savings on primary energy for electric vehicles with conventional (e.g. lead-acid) batteries vary from -4% to 20% compared to vehicles with diesel engines in 1990. Compared to petrol engines these percentages range from 20% to 30%. Due to higher changes in efficiency for internal combustion engines in 2000 the energy savings for vehicles with conventional batteries vary from -26% to +7% compared to diesel- and from 5% to 17% compared with petrol-vehicles..

For the Na-S battery these percentages are always higher. This means that in urban traffic all electric vehicles with Na-S batteries save primary energy, upto 40% for the Peugeot 205 and the Renault Express in the year 1990.

For future types of batteries (Li with solid electrolyte) the effects are still more positive. Calculations show, that in the year 2000 upto 40% of primary energy can be saved by the use of electric vehicles with Li batteries in urban traffic in comparison with diesel.

The fraction of braking energy which is recovered by regenerative braking depends on the battery characteristics. For lead-acid batteries at about 14% of the intrinsic energy can be recovered by regenerative braking. For Li batteries with a very high charge/discharge efficiency this percentage varies from 18% to 20%.

It can be concluded that electric vehicles using batteries with a higher energy density then the conventional types are a promising option for the future from an energetic point of view.

KEYWORDS

URBAN AREAS
AUTOMOBILES
DIESEL ENGINES
SPARK IGNITION ENGINES
ELECTRIC-POWERED VEHICLES
ENERGY CONSUMPTION
PERFORMANCE TESTING
STANDARDS
FORECASTING
COMPARATIVE EVALUATIONS

LEAD-ACID BATTERIES
METAL-METAL OXIDE BATTERIES
NICKEL-CADMIUM BATTERIES
SODIUM-SULFUR BATTERIES
LITHIUM
SOLID ELECTROLYTES
ENERGY CONSERVATION
~~REGENERATIVE~~ BRAKING
ELECTRIC BATTERIES

IS
~~GE~~
IGE

SAMENVATTING

De elektrische auto mag zich verheugen in hernieuwde belangstelling vanwege de bijdrage die dit vervoermiddel kan leveren aan de verbetering van met name het stedelijk milieu. Recent onderzoek naar het energetisch effect van elektrische voertuigen is echter niet beschikbaar. In deze studie wordt voor een viertal typen voertuigen nagegaan, of het primaire-energieverbruik toe- of afneemt, indien de verbrandingsmotor op benzine of diesel wordt vervangen door elektrische aandrijving.

De berekeningen worden gebaseerd op een methode beschreven in [4], waarmee de benodigde energie 'aan de wielen' (intrinsieke energie) voor voertuigen kan worden vastgesteld. Deze methode bleek goed toepasbaar voor het vergelijken van de benodigde intrinsieke energie van diverse typen voertuigen op benzine of diesel (ICEV = Internal Combustion Engine Vehicle) met die van elektrische voertuigen (EV). Wanneer voor voertuigen met benzine-motor een overall-rendement van motor en transmissie van circa 14% en voor diesel van circa 18% wordt gehanteerd, is het berekende primaire energieverbruik in goede overeenstemming met de uit de praktijk beschikbare cijfers voor het jaar 1990. Ook voor elektrische voertuigen kan het energieverbruik adequaat met [4] worden bepaald.

Tabel 1. Indexcijfer primaire energieverbruik bij ECE-15- cyclus

Voertuig		Index verbruik primaire energie			
		diesel=100		benzine=100	
Merk	Uitvoering	in 1990	2000	1990	2000
VW-Golf	diesel	100	100	79	83
	benzine	127	121	100	100
VW-Citystromer	lood-zuur	99	115	78	95
	Na-S	79	93	62	77
	Li		67		55
Peugeot 205	diesel	100	100	86	89
	benzine	116	112	100	100
	Ni-Cd	80	93	69	83
	Na-S	67	78	58	70
	Li		59		53
Renault-Express	diesel	100	100	82	85
	benzine	122	117	100	100
	Ni-Fe	85	99	70	85
	Na-S	70	82	57	70
	Li		62		53
Renault-Master	diesel	100	100		
	lood-zuur	104	126		
	Na-S	81	97		
	Li		73		

De methode is toegepast voor vier verschillende typen voertuigen: de VW/Golf, de Peugeot 205, de Renault Express en de Renault Master. Van deze voertuigen zijn benzine- en diesel-versies te koop. Daarnaast zijn ook exemplaren met elektrische aandrijving in de praktijk getest. Naast het bestaande elektrische voertuig met een conventionele accu, zijn de berekeningen ook uitgevoerd voor hetzelfde voertuig met een Na-S- en met een Li-accu, welke een veel hogere energiedichtheid hebben, maar commercieel nog niet beschikbaar zijn. Voor deze laatste 2 typen is de capaciteit van de accu zodanig verondersteld, dat het voertuig een actieradius van circa 200 kilometer in stadsverkeer heeft.

De resultaten van de berekeningen zijn in de vorm van indexcijfers samengevat in tabel 1. Een indexcijfer lager dan 100 betekent, dat het EV een besparing op primaire energie oplevert ten opzichte van de referentie met diesel- respectievelijk benzine-motor.

De berekeningen tonen aan, dat in 1990 de energiebesparing op het primaire energieverbruik bij elektrische voertuigen met een conventionele accu in stadsverkeer varieert van -4% tot +20% ten opzichte van het verbruik van hetzelfde voertuig met dieselmotor. Het besparingseffect bleek het grootst voor de kleine EV's, welke overigens ook met de accu met de hoogste energiedichtheid waren uitgerust. Ten opzichte van benzinevoertuigen is de besparing ruim 20% tot ruim 30% hoger. Bij gebruik van accu's met een hoge energiedichtheid, zoals de Na-S-accu is het primaire energieverbruik in stadsverkeer in alle gevallen lager dan dat van voertuigen met verbrandingsmotor. Het besparingseffect van een EV met een Na-S accu bedraagt in 1990 circa 20% tot 30% ten opzichte van een dieselveertuig en tot ruim 40% ten opzichte van hetzelfde voertuig met benzinemotor.

Omdat het waarschijnlijk is dat de verbeteringen in efficiency voor verbrandingsmotoren in de komende 10 jaar groter zullen zijn dan de efficiency-verbeteringen voor EV's is het energiebesparingseffect van EV's in 2000 lager. De energiebesparing van elektrische voertuigen met conventionele accu varieert van -26% tot +7% in vergelijking met de dieselauto. In het jaar 2000 zijn alle EV's met conventionele accu in stadsritten zuiniger dan dezelfde auto met benzinemotor. De besparing varieert van 5% tot 17%. Voor ritten, die voor de helft in de voorsteden plaatsvinden daalt de besparing van het EV ten opzichte van het voertuig met verbrandingsmotor met ongeveer 5%. De elektrische Peugeot 205 en de Renault Express met conventionele accu zijn dan nog meer dan 10% zuiniger dan de benzine uitvoering. In alle andere gevallen verbruikt de ICEV minder primaire energie.

Elektrische auto's die zijn uitgerust met een Na-S-accu leveren in het jaar 2000 een energiebesparing op. Deze varieert van 7% tot 22% in vergelijking met dieselveertuigen. Ten opzichte van een voertuig op benzine bedraagt de besparing zelfs 23% tot 30%.

De energiebesparing kan nog flink toenemen als de Li-accu met vaste elektrolyt beschikbaar komt. Dankzij de zeer hoge energiedichtheid (150 Wh/kg) en het uitstekende cycluserendement van 98% varieert de energiebesparing in stadsritten voor EV's met Li-accu van bijna 30% tot meer dan 40% ten opzichte van dezelfde dieselauto. Buiten de stad neemt deze besparing met enkele procenten af.

Uit de berekeningen kan eveneens worden afgeleid, hoeveel remenergie bij EV's kan worden terugewonnen. Voor conventionele accu's varieert dit in stadsritten van 13% tot 15%. Voor de Na-S-accu ligt deze waarde, dankzij het hogere cycluserendement, ongeveer 3% hoger. De meeste remenergie kan worden teruggewonnen bij gebruik van een Li-accu dankzij het zeer hoge cycluserendement. De bijdrage bedraagt voor dit type accu 18% tot 20% van het energiegebruik.

Uit de studie kan worden geconcludeerd dat elektrische voertuigen uitgerust met een accu met hoge energiedichtheid (Na-S of Li) bij gebruik in het stads- en voorstadsverkeer een besparing op het primaire-energieverbruik kunnen opleveren die kan oplopen tot circa 40%.

INHOUD

1. INLEIDING	7
2. METHODIEK	8
2.1. Inleiding	8
2.2. Intrinsieke energie	9
2.3. Brandstofinzet	10
2.4. Conversie	11
3. UITGANGSPUNTEN	12
3.1. Voertuigparameters	12
3.2. Verliezen motor en transmissie ICEV	14
3.3. Accuverliezen bij EV's	15
3.4. Elektrische aandrijving en regeling	15
3.5. Recuperatief remmen	16
3.6. Verliezen elektriciteitsproductie en distributie	16
3.7. Transport en distributie fossiele brandstoffen	16
4. RESULTATEN	17
4.1. Intrinsieke en primaire energie	17
4.2. Vergelijking met de praktijk	20
4.3. Effect recuperatief remmen	21
LITERATUUR	23
BIJLAGE 1. BEREKENINGSRESULTATEN VOERTUIGEN MET VERBRANDINGSMOTOR	25
BIJLAGE 2. BEREKENINGSRESULTATEN VOERTUIGEN MET ELEKTRISCHE AANDRIJVING	39
BIJLAGE 3. GRAFIEKEN	61

1. INLEIDING

Het gemotoriseerd verkeer neemt een fors aandeel van het energiegebruik voor zijn rekening. Volgens [1] bedroeg de finale brandstofvraag voor de transportsector in 1985 ruim 300 PJ, 17% van het primaire-energieverbruik. Tot het jaar 2010 wordt een groei voorzien tot 375 à 475 PJ. De problemen die deze groei voor het milieu met zich meebrengt zijn genoegzaam bekend.

Eén van de mogelijkheden om de luchtverontreiniging van de transportsector terug te dringen is het gebruik van elektrische voertuigen. Met name voor het verkeer in de stad en directe omgeving lijkt dit een veelbelovende mogelijkheid. In [2] is nagegaan, welke effecten het gebruik van elektrische auto's heeft op de luchtverontreiniging.

Uit een studie uit 1983 naar het energiebesparingseffect ten gevolge van het gebruik van elektrische voertuigen [3] bleek dat het gebruik van elektrisch transport geen duidelijk besparend effect heeft op het gebruik van primaire energie. De verliezen, die in de diverse schakels van de keten 'primaire brandstof - elektriciteitsproductie/distributie - elektrisch voertuig' optreden bleken gezamenlijk even groot als de verliezen die optreden als benzine of diesel direct in verbrandingsmotoren van auto's wordt ingezet.

Sinds 1983 is er echter het nodige veranderd. Niet alleen springen auto's met interne-verbrandingsmotor zuiniger met hun brandstof om, ook in de alternatieve weg via elektriciteit hebben de nodige ontwikkelingen plaatsgevonden. In opdracht van de NOVEM is nagegaan, of het gebruik van elektrische voertuigen bij de huidige stand van de techniek en de te voorziene ontwikkelingen tot het jaar 2000 naast positieve gevolgen voor het milieu ook een bijdrage levert aan besparing op primaire energie. Dit rapport doet verslag van de gevonden resultaten.

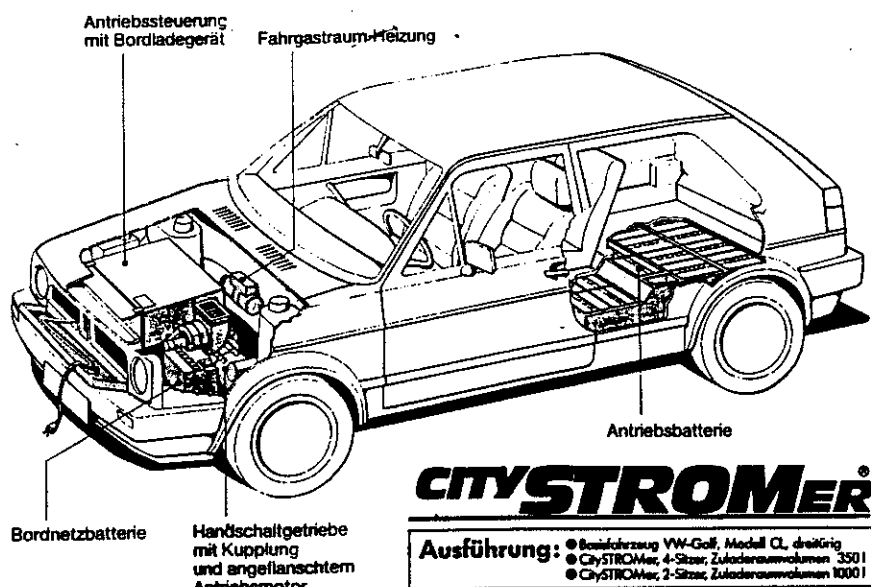
Voor een viertal verschillende typen voertuigen, waarvan zowel een uitvoering met interne verbrandingsmotor (ICEV) als één met elektrische aandrijving (EV) beschikbaar is, is het energiegebruik bepaald. In hoofdstuk 2 wordt de gehanteerde methode beschreven. Hoofdstuk 3 behandelt de gehanteerde uitgangspunten. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de berekeningen gepresenteerd. Tevens wordt een vergelijking gemaakt met de resultaten die in de praktijk worden behaald.

2. METHODIEK

2.1 Inleiding

Om het mogelijke besparingseffect op primaire brandstoffen na te gaan, is het primaire energieverbruik per km afgelegde weg van 4 typen elektrische voertuigen vergeleken met dat van overeenkomstige auto's met benzine- of dieselmotor. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de volgende typen voertuigen, waarvan ook elektrische uitvoeringen bestaan, en bovendien voldoende cijfermateriaal beschikbaar is:

- a. VW-Citystromer versus VW-Golf (personenauto);
- b. Peugeot 205 (personenauto);
- c. Renault Express (lichte bestelauto);
- d. Renault Master (bestelauto).



City Stromer

Voor de uitvoering van het voertuig is zoveel mogelijk uitgegaan van de in de praktijk voorkomende versie. In een aantal gevallen zijn ook berekeningen uitgevoerd (bijv. voor wat betreft het gebruikte type accu) van versies, die nu (nog) niet werkelijk voorkomen.

Allereerst is voor deze voertuigen de benodigde intrinsieke energie (de 'energie aan de wielen') bepaald voor 2 verschillende ritcycli: de ECE-15 ritcyclus en een ritcyclus in de voorstedelijke gebieden. Vervolgens is voor een aantal varianten nagegaan hoeveel primaire energie moet worden ingezet om de intrinsieke energie te genereren, rekening houdend met de verliezen in de verschillende conversiestappen. Vergelijking van de benodigde primaire energie voor ICEV en EV laat het energetisch voordeel of nadeel zien van het gebruik van een elektrisch voertuig.

In de volgende paragrafen zal nader worden ingegaan op een aantal fundamentele aspecten van deze methodiek.

2.2 Intrinsieke energie

Uitgangspunt van de berekeningen vormt de intrinsieke energie; dit is de hoeveelheid energie, die 'aan de wielen' nodig is om een voertuig met bekende karakteristieken en massa een bepaalde cyclus met gedefinieerde snelheidsvariaties te laten doorlopen. De berekening van de intrinsieke energie start met de berekening van het energiegebruik bij constante snelheid. Deze kan als volgt worden bepaald:

$$dE/dx = F = C_c M + C_t M + 1/2 \rho C_d A V^2 \text{ (Nm/m)} \quad (1)$$

waarin

- E = energie (J)
- x = afgelegde weg (m)
- F = kracht (N)
- M = massa van het voertuig (kg)
- V = snelheid van het voertuig (m/s)
- C_c = chassis rolweerstand-coëfficiënt (N/kg)
- C_t = banden rolweerstandcoëfficiënt (N/kg)
- C_d = aerodynamische weerstandcoëfficiënt
- A = frontale oppervlak van het voertuig (m²)

Wanneer de benodigde intrinsieke energie voor een ritcyclus moet worden bepaald, moet rekening worden gehouden met de verschillende snelheden, die in de cyclus optreden en de versnellingen en vertragingen gedurende de ritcyclus. Volgens [4] kan de benodigde energie voor een cyclus worden berekend met:

$$E = X C_{ct} M + Y M + Z C_d A \text{ (Wh/km)} \quad (2)$$

waarin:

$$C_{ct} = C_c + C_t \text{ en}$$

X, Y, en Z afhankelijk zijn van het rittype.

De drie termen in (2) representeren achtereenvolgens de rolweerstand, de traagheids effecten en de windinvloed. Indien de energie wordt uitgedrukt in Wh/km, is de waarde voor X: 0,278 voor alle typen ritcycli. De termen Y en Z zijn afhankelijk van het type ritcyclus. In [4] zijn de waarden van Y en Z gegeven voor een aantal verschillende ritcycli. In deze studie zijn alleen de ECE-15-stadscyclus en een ritcyclus in de voorstad (Suburban) gebruikt. Y kan worden berekend met de experimenteel bepaalde formule:

$$Y = (f_0 F_r - f_1 C_{ct} - f_2 C_d A / M) (1 - F_b) \quad (3)$$

Hierin is F_b de fractie van de remenergie, die bij elektrische voertuigen wordt teruggewonnen (F_b = 0 voor ICEV's); in F_r zijn de traagheids effecten van alle draaiende delen verwerkt. F_r = 1,05 voor ICEV's en 1,035 voor EV's.

Substitutie van (3) in (2) levert:

$$E = f_0 F_r M + (0,278 - f_1) C_{ct} M + (Z - f_2) C_d A \text{ (Wh/km)} \quad (4)$$

Tabel 2.1 geeft de waarden voor f_0 , f_1 , f_2 en Z voor de ECE-15-cyclus en een Nieuw-Zeelands Suburban cyclus:

Tabel 2.1 Y en Z coëfficiënten. Bron: [4]

Ritcyclus	f_0	f_1	f_2	Z
ECE-15	0,0394	0,0557	3,0	17,17
Suburban	0,0156	0,030	4,5	50,44

Aan de hand van een getallenvoorbeeld ontleend aan [4] kan het gebruik van (2) en (3) worden geïllustreerd. Gaan we bijvoorbeeld uit van de volgende waarden:

$$C_c = 0,13$$

$$C_t = 0,12$$

$$C_d = 0,35$$

$$A = 1,9$$

welke redelijk zijn voor een 'goede' auto uit 1985, dan volgt uit de formules voor een auto met een massa van 1000 kg dat voor een ECE-15-cyclus de benodigde intrinsieke energie (de energie 'aan de wielen') 106,4 Wh/km bedraagt, indien geen energierugwinning bij het remmen plaatsvindt. 34% respectievelijk 31,3% is nodig voor het overwinnen van de rolweerstand van chassis en banden, 24% gaat verloren bij het remmen en 10,7% is nodig voor het overwinnen van de luchtweerstand. Voor de Suburban cyclus bedraagt de intrinsieke energie 108,9 Wh/km. De respectieve percentages zijn 33,2%, 30,6%, 5,4% en 30,8%. Duidelijk is de afname voor deze cyclus te zien van de remverliezen en de toename van de benodigde energie voor het overwinnen van de luchtweerstand ten gevolge van de hogere snelheid in vergelijking met de ECE-15-cyclus.

Voor de beschouwde typen voertuigen zal de volgens deze methodiek berekende intrinsieke energie basis zijn voor de berekening van het uiteindelijke energieverbruik voor zowel het voertuig met benzine- of dieselmotor als de tegenhanger met elektrische aandrijving.

2.3 Brandstofinzet

In de voertuigen met interne verbrandingsmotor wordt – afhankelijk van het type – benzine of dieselolie als primaire brandstof gebruikt. Voor het opwekken van de elektrische energie in elektriciteitscentrales zijn in de Nederlandse situatie aardgas en kolen de belangrijkste energiedragers. Een vergelijking van het energiegebruik is mogelijk, omdat de verbrandingswaarde van deze fossiele brandstoffen bekend is. Daarbij wordt wel voorbijgegaan aan verschillen vanuit economische of milieu-perspectieven tussen de fossiele brandstoffen. Bovendien moeten veronderstellingen worden gedaan over de mate, waarin de verschillende typen centrales worden ingezet voor de opwekking van de elektriciteit voor het bijladen van de accu's.

Een juiste vergelijking van het primaire energiegebruik wordt onmogelijk, indien andere dan fossiele energiedragers (kernenergie of duurzame bronnen) een substantiële bijdrage leveren aan de elektriciteitsvoorziening.

Om deze problemen te ondervangen is in deze studie verondersteld dat dezelfde brandstof die in de ICEV wordt toegepast, bij gebruik van een EV wordt aangewend voor de opwekking van elektriciteit in een STEG-eenheid. Alhoewel deze eenheden in de praktijk in Nederland niet zullen worden toegepast voor de elektriciteitsproductie kan op deze wijze een goede vergelijking worden gemaakt tussen het primaire energiegebruik van elektrische voertuigen en het conventionele voertuig. Nadrukkelijk moet worden gesteld dat hieruit

geen conclusies over het kostenaspect of over de effecten op de milieuverontreiniging kunnen worden getrokken, omdat het een fictieve inzet van benzine of diesel in elektriciteitscentrales betreft.

2.4 Conversie

In de vorige paragraaf is aangegeven, dat voor ICEV en EV dezelfde primaire energiedrager langs verschillende conversiestappen wordt ingezet voor het genereren van de benodigde intrinsieke energie. Dit betekent dat berekeningen van de verschillen in omzetting kunnen worden beperkt tot die vanaf de output van het raffinageproces. Voor de twee alternatieven levert dit de volgende aspecten op, waarmee rekening moet worden gehouden:

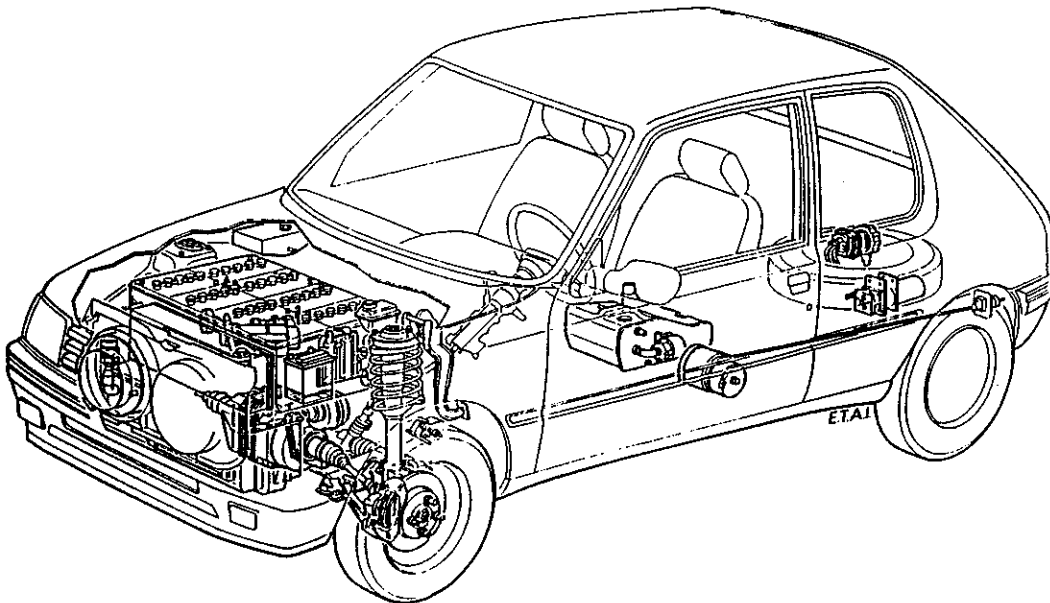
ICEV:

1. transport en distributie van raffinaderij naar de brandstoftanks van de auto;
2. verliezen verbrandingsmotor en transmissie;
3. stilstandsverliezen ICEV.

EV:

1. transport en distributie van raffinaderij naar elektriciteitscentrales;
2. omzetting in centrales en netverliezen;
3. verliezen acculader en accu;
4. aandrijving en regeling EV;
5. regeneratief remmen.

In hoofdstuk 3 is voor elk van deze aspecten aangegeven, welke waarden zijn aangehouden.



Schema van de elektrische Peugeot 205

3. UITGANGSPUNTEN

3.1 Voertuigparameters

Omdat er voor de verschillende typen voertuigen geen cijfers konden worden gevonden voor de chassis- en bandenrolweerstandscoefficiënt, zijn deze grootheden voor alle voertuigen gelijk verondersteld aan de waarden, die in [4] worden genoemd voor een 'goed' voertuig in 1985:

$$C_c = 0,12 \text{ N/kg}$$

$$C_t = 0,13 \text{ N/kg}$$

De aërodynamische weerstandcoëfficiënt en het frontaal oppervlak zijn overgenomen van de opgave van de fabrikant of importeur (tabel 3.1.). Aangezien ICEV en EV uiterlijk niet van elkaar verschillen zijn deze waarden voor beide typen voertuigen gelijk.

Tabel 3.1 Luchtweerstandscoefficiënt C_d en frontaal oppervlak A

Voertuig	luchtweerstandscoeff.	frontaal oppervlak (m ²)
VW-Golf/Citystromer	0,60	2,37
Peugeot 205	0,35	1,90
Renault Express	0,40	2,25
Renault Master	0,40	4,30

De voertuigmassa hangt af van het beschouwde type. Allereerst bestaat er verschil tussen de benzine en dieseluaruitvoering van ICEV's. De dieseluaruitvoering is in het algemeen zwaarder. De massa van het elektrische voertuig is veel groter ten gevolge van het accupakket dat moet worden meegevoerd. Dit meergewicht is afhankelijk van het type accu dat wordt toegepast. Hiervoor zijn de volgende alternatieven onderscheiden:

1. De accu, zoals deze in de praktijk werd aangetroffen. De VW-Citystromer is in de praktijk getest met lood-zuur-accu's. Van de Peugeot 205 zijn gegevens beschikbaar van een uitvoering met Ni-Cd-accu [7]. Van de Renault-Express met Ni-Fe-accu. De cijfers van deze praktijksituaties zijn overgenomen. De Renault-Master is in de praktijk toegepast met zowel lood-zuur-, Ni-Fe- als Ni-Cd-accu [6]. Voor dit voertuig zijn de praktijkgegevens van de uitvoering met lood-zuur-accu overgenomen. Voor al deze accu's geldt dat de energiedichtheid laag is. Deze varieert van ruim 30 Wh/kg voor een lood-zuur-accu tot circa 50 Wh/kg voor Ni-Fe- en Ni-Cd-accu's. Voertuigen uitgerust met een dergelijke accu zijn daardoor zwaar en hebben in de praktijk een actieradius van maximaal 100 kilometer.
2. Er is verondersteld dat het EV ook met een Na-S-accu kan worden uitgerust. De energie-inhoud van deze accu's bedraagt circa 120 Wh/kg, en is daardoor veel geschikter voor de toepassing in mobiele bronnen dan de eerder genoemde accu's. De Na-S-accu is uitgebreid in verschillende typen VW's, waaronder de Citystromer, getest. De praktijkcijfers van deze combinatie zijn overgenomen. Voor de overige voertuigen is uitgegaan van een zodanige dimensionering van deze accu, dat het voertuig een actieradius heeft van 200 km bij de ECE-15 cyclus. Reeds een aantal jaren wordt aangekondigd dat deze accu een min of meer commercieel stadium heeft bereikt. Op grote schaal wordt deze accu op dit moment echter nog niet geproduceerd. Het is goed

mogelijk, dat deze accu in de toekomst veelvuldig in elektrische voertuigen wordt toegepast, gezien de gunstiger verhouding tussen gewicht en energie-inhoud.

- In Denemarken en Groot-Brittannië wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een lithium accu met vaste elektrolyt. De vooruitzichten voor dit type accu lijken gunstig [9]. In de toekomst moet deze accu een energiedichtheid kunnen bereiken van 150 Wh/kg. Bovendien is het rendement van de laad/ontlaad-cyclus zeer gunstig (98%) en heeft deze accu een verwaarloosbare zelfontlading. Er is verondersteld, dat deze accu in het jaar 2000 voor elektrische auto's beschikbaar is. Evenals voor de Na-S accu is de accu voor alle voertuigen gedimensioneerd op een – arbitraire – actieradius van 200 kilometer bij de ECE-15-cyclus.

Als nuttige lading van de voertuigen is 150 kg voor de twee personenauto's en de Renault-Express aangenomen. Voor de Renault-Master geldt dat het maximale nuttige laadvermogen van het EV met lood-zuur-accu 630 kg bedraagt. Deze waarde is als lading in alle situaties aangehouden. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de verdeling van de massa van de verschillende typen:

Tabel 3.2 Voertuigmassa (kg)

Voertuig	Uitvoering	Massa			
		Voertuig	Accu	Lading	Totaal
VW-Golf	benzine	850		150	1000
	diesel	850		150	1000
VW-Citystromer	lood-zuur	850	500	150	1500
	Na-S	850	265	150	1265
	lithium	850	157	150	1157
Peugeot 205	benzine	740		150	890
	diesel	860		150	1010
	Ni-Cd	774	282	150	1206
	Na-S	774	167	150	1091
	lithium	774	130	150	1054
Renault-Express	benzine	790		150	940
	diesel	840		150	990
	Ni-Fe	790	330	150	1270
	Na-S	790	177	150	1117
	lithium	790	137	150	1077
Renault-Master	diesel	2000		630	2630
	lood-zuur	2000	1140	630	3760 ¹⁾
	Na-S	2000	470	630	3100
	lithium	2000	365	630	2995

¹⁾ Maximaal toelaatbaar gewicht

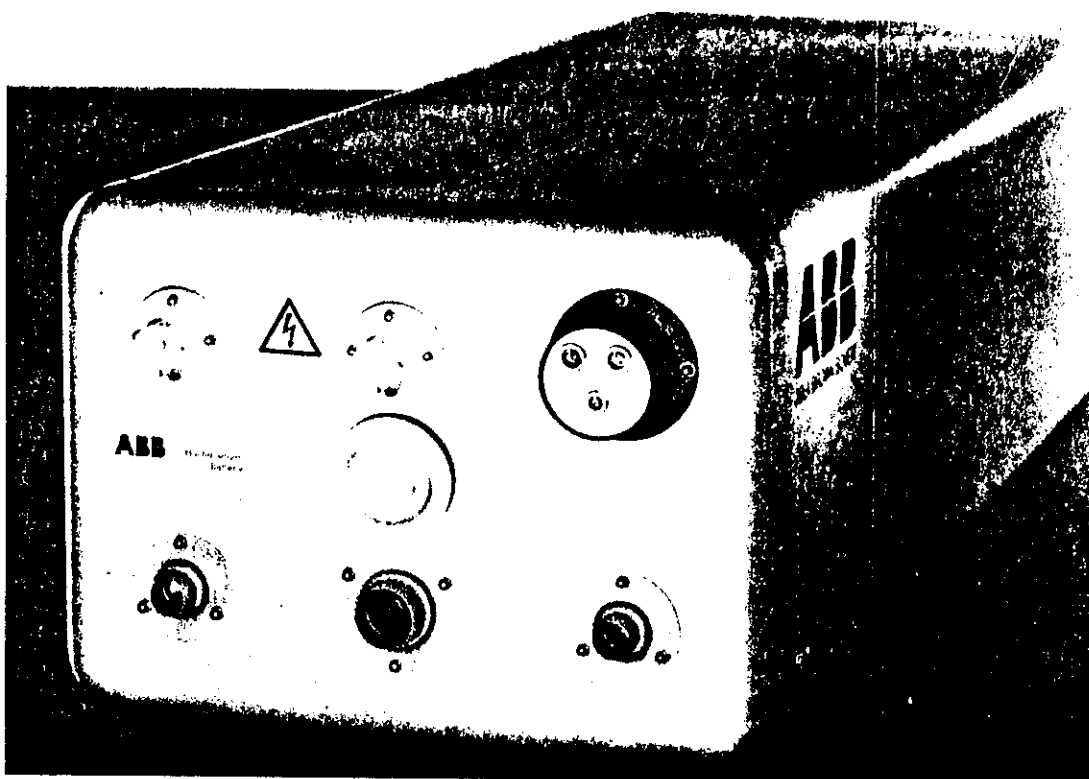
Het nuttig laadvermogen van elektrische voertuigen is aanmerkelijk lager dan dat van hetzelfde voertuig met verbrandingsmotor, omdat een relatief zwaar accupakket moet worden meegevoerd. Ook bij een fors accupakket is de actieradius van elektrische voertuigen nog beperkt. Voor lood-zuur- en vergelijkbare accu's is de actieradius in de praktijk minder dan 100 kilometer, voor meer geavanceerde accu's met een grotere ladingsdichtheid is een actieradius in de orde van 200 kilometer realiseerbaar. De beperkte

actieradius en de lange tijd, die nodig is om de accu's weer te laden, heeft consequenties voor de toepassingsmogelijkheden van elektrische auto's.

3.2 Verliezen motor en transmissie ICEV

Voor het uitvoeren van de berekeningen zijn gemiddelde waarden aangehouden voor de efficiency van transmissie en verbrandingsmotor. Voor de transmissie is een gemiddeld rendement van 0,90 verondersteld. Voor de verbrandingsmotoren is een gemiddelde waarde voor de huidige ('1990') benzinemotoren van 20% en voor dieselmotoren van 25% aangenomen. Voor de komende 10 jaar is uitgegaan van een verbetering van het rendement van beide typen motoren met 10% tot 30% respectievelijk 35%.

Naast conversie- en transmissieverliezen treden bij een ICEV ook stilstandsverliezen op. Telkens als een auto voor bijvoorbeeld een stoplicht staat te wachten, draait de motor door, waardoor het brandstofverbruik doorgaat. In [4] wordt voor stilstandsverliezen van benzinemotoren één liter/uur (= 9,3 kW of 2,58 Wh/s) aangehouden. Deze waarde komt redelijk overeen met de 1200 ml/uur, die wordt genoemd in [5]. Bij de berekeningen is een verbruik van 1 liter/uur aangehouden. Ten gevolge van 1 minuut stilstand per km resulteert dit in een stilstandsverlies van 155 Wh/km bij de ECE-15-cyclus. Voor de Suburban cyclus bedraagt het stilstandsverlies volgens [3]: 81 Wh/km. Het stilstandsverlies van dieselmotoren is lager dan dat van benzinemotoren. Dit cijfer kon niet aan de hand van andere literatuurbronnen worden geverifieerd. In de berekeningen is daarom uitgegaan van de aanname dat dit verlies 75% van het stilstandsverlies van benzinemotoren bedraagt



Na-S-accu

(ECE-15: 115 Wh/km; Suburban: 60 Wh/km). Voor de Renault Master bestelauto is verondersteld dat de stilstandsverliezen 25% hoger zijn (ECE-15: 145 Wh/km; Suburban: 75 Wh/km) dan die voor een diesel personenauto.

3.3 Accuverliezen bij EV's

Bij elektrische aandrijving wordt de elektriciteit opgeslagen in de accu die in de auto wordt meegevoerd. De bewegingsenergie wordt tijdens de rit aan de accu onttrokken. De verliezen die optreden zijn de verliezen in de acculader en de verliezen in de accu zelf.

Voor de acculader is verondersteld, dat deze verliezen nu 5% bedragen en in de toekomst door verbeterde elektronische componenten kunnen worden teruggebracht tot 3%.

De aard en de grootte van de verliezen in de accu zelf is afhankelijk van het type accu:

a. Lood-zuur-accu:

Het rendement voor het laad- en ontlad-proces bedraagt bij deze accu's in de praktijk maximaal 89%. Dit betekent een rendement van de laad/ontlaadcyclus van maximaal 79%. Daarnaast treedt er een geringe zelfontlading op, die circa 0,6% per dag bedraagt. Uitgaande van 200 gebruiksdagen per jaar van de elektrische auto levert dit een extra verlies van bijna 1%. In [6] wordt voor een praktijkexperiment met de Renault Master een gezamenlijk rendement van lader en accu van 50% gevonden, hetgeen een accurendement van omstreeks 60% betekent. In de berekeningen voor deze studie is voor het cycluserendement gerekend met een waarde van 75%. Het resulterende overall-rendement bedraagt 74,1%.

b. Na-S-accu:

Het rendement van de laad/ontlaad-cyclus bedraagt voor deze accu 90%. Nadeel van de accu is de hoge bedrijfstemperatuur van circa 300 °C, die voortdurend moet worden aangehouden. Voor de standaard module (220-170 V, 180 Ah, 265 kg) is hiervoor continu een vermogen van 80 W nodig. Indien deze energie uit de accu zelf wordt onttrokken, resulteert dit in een ontlading van 7% per dag. Bij 200 bedrijfsdagen per jaar is dus de overall-efficiency van dit systeem ongeveer 77,8%. In de studie is geen verbetering van dit rendement verondersteld in de komende 10 jaar.

c. Ni-Fe- en Ni-Cd-accu:

In de berekeningen is voor deze accu's, toegepast in de Peugeot 205 respectievelijk de Renault-Express hetzelfde rendement (74,1%) aangehouden als voor de lood-zuur accu.

d. Li-accu:

Volgens persoonlijke mededeling van één van de bij de ontwikkeling van deze accu betrokken partijen (ERL, Denemarken) is het rendement van de laad/ontlaadcyclus voor de lithium-accu met vaste elektrolyt 98%. De zelfontlading van dit type accu is minder dan 0,1% per maand [9]. Deze waarden zijn zeer gunstig in vergelijking met de andere typen accu's.

3.4 Elektrische aandrijving en regeling

De in de accu van een elektrische auto opgeslagen energie wordt via een elektronische regeling aan de elektromotor toegevoerd. In deze keten treden eveneens verliezen op. Het gebruik van moderne elektronica maakt het mogelijk zeer efficiënte regelsystemen te construeren. In de praktijk wordt een efficiency van 96% gerealiseerd, terwijl verbetering tot circa 98% in het jaar 2000 mogelijk is.

Voor elektromotoren geldt een rendement van meer dan 90%, wanneer deze optimaal worden bedreven. In elektrische voertuigen staan zij echter bloot aan wisselende omstan-

digheden, waardoor het rendement afneemt. Voor 1990 is uitgegaan van een gemiddeld rendement over het hele traject van 85%. Voor de toekomst lijken beperkte verbeteringen mogelijk door het gebruik van (verbeterde) permanente magneten. Voor het jaar 2000 is daarom uitgegaan van een gemiddeld rendement van 87%.

3.5 Recuperatief remmen

Bij EV's is het mogelijk (een gedeelte van) de remenergie terug te winnen, en naar de accu terug te voeren. De elektromotor wordt daarbij als generator gebruikt, waarmee de accu wordt herladen. De volgende verliezen treden hierbij op:

- a. Generatorverliezen. Deze zijn in eerste benadering gelijk aan de verliezen in motorbedrijf.
- b. Verliezen door de laad/ontlaadcyclus van de accu. De eerst aan de accu onttrokken energie wordt teruggevoerd. Dit betekent dat een extra laad/ontlaadcyclus optreedt met de daarbij behorende verliezen.
- c. Niet alle energie kan worden benut. Een gedeelte gaat in de vorm van warmte bij het remmen verloren.

Bij de berekeningen is in alle varianten verondersteld, dat 70% van de beschikbare remenergie weer aan de accu wordt teruggevoerd. 30% gaat verloren in de generator en in de t remmen. Gecombineerd met het rendement van de laad/ontlaadcyclus van de accu betekent dit dat voor de lood-zuur- en vergelijkbare accu 53% van de remenergie wordt teruggewonnen; voor de Na-S-accu is dit 68% en voor de Li-accu 69%.

3.6 Verliezen elektriciteitsproductie en distributie

In hoofdstuk 2 is reeds aangegeven dat er is verondersteld dat de elektriciteit in de centrale met een hoog-rendement STEG-eenheid wordt opgewekt met dezelfde brandstof (benzine of diesel), die ook in het ICEV wordt ingezet. Voor deze installaties is voor 1990 een conversierendement van 43% en voor het jaar 2000 een rendement van 45% aangehouden. In de praktijk zal voor het opwekken van de benodigde elektriciteit gebruik worden gemaakt van basislasteenheden. Het rendement van deze eenheden op kolen ligt circa 2% lager dan de gebruikte waarden. Indien de elektriciteit wordt opgewekt met Gas-STEG-eenheden ligt het rendement tot 5% hoger. De verschillen tengevolge van winning en transport moeten dan echter ook in de berekeningen worden verdisconteerd.

De netverliezen, die optreden bij het transport van elektriciteit van de elektriciteitscentrale naar de afnemers (de acculaders) is gesteld op 6%.

3.7 Transport en distributie fossiele brandstoffen

Bij het gebruik van fossiele brandstoffen in ICEV's moeten benzine en diesel van de raffinaderijen getransporteerd worden naar de tankstations. Daar wordt de brandstof gedistribueerd naar de brandstoftanks van de betreffende voertuigen. Bij het gebruik van elektrische voertuigen wordt de fossiele brandstof ingezet in elektriciteitscentrales.

Door verschillen in de transportafstand, de vervoersmiddelen gebruikt voor transport en distributieverliezen zijn de verliezen, die bij transport en distributie optreden, voor de alternatieven niet gelijk. Voor de inzet in elektriciteitscentrales bedragen de transportverliezen ongeveer 0,1%. De transport- en distributieverliezen naar de brandstoftanks van ICEV's zijn hoger, omdat fijnmaziger distributie plaatsvindt, en bovendien verliezen bij het tanken optreden. In dit geval zijn de verliezen geraamd op 0,2%.

4. RESULTATEN

4.1 Intrinsieke en primaire energie

Gebruikmakend van de methodiek beschreven in hoofdstuk 2, en de basisparameters beschreven in hoofdstuk 3 is de intrinsieke energie en de benodigde primaire energie berekend voor ICEV's op benzine en diesel (Renault-Master alleen diesel) en voor EV's met een standaard-accu en een Na-S-accu. Voor beide groepen voertuigen zijn de berekeningen uitgevoerd voor drie verschillende situaties:

- a. jaar: 1990, 100% ECE-15-cyclus;
- b. jaar: 2000, 100% ECE-15-cyclus;
- c. jaar: 2000, 50% ECE-15-cyclus, 50% Suburban-cyclus.

De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in tabel 4.1 en 4.2 De details van deze berekeningen zijn opgenomen in bijlage 1 (ICEV's) en bijlage 2 (EV's).

Tabel 4.1 *Intrinsieke energie en primaire brandstofverbruik (Wh/km).
Cyclus: 100% ECE-15*

Voertuig	Uitvoering	Energieverbruik				Rendement	
		Intrinsiek	Primair		1990 %	2000 %	
			1990	2000			
VW-GOLF	benzine	117	807	590	15	20	
	diesel	117	637	488	18	25	
VW-Citystromer	lood-zuur	165	629	563	26	29	
	Na-S	142	506	453	28	31	
	Li	131		329		40	
Peugeot 205	benzine	96	688	511	14	18	
	diesel	107	593	457	18	24	
	NiCd	126	473	424	27	30	
	Na-S	114	398	356	29	32	
	Li	110		270		41	
Renault-Express	benzine	104	734	541	14	19	
	diesel	109	600	461	18	23	
	Ni-Fe	135	512	458	26	30	
	Na-S	120	422	378	28	32	
	Li	116		286		41	
Renault-Master	diesel	279	1390	1034	23	27	
	lood-zuur	387	1450	1299	27	29	
	Na-S	322	1119	1002	29	32	
	Li	311		759		41	

Tabel 4.1 laat zien, dat voor benzinevoertuigen in 1990 circa 14% van het primaire-energieverbruik als energie 'aan de wielen' beschikbaar komt. In het jaar 2000 is dit toegenomen tot 18% à 20%. Voor dieselveertuigen liggen de overeenkomstige percentages

ongeveer 4% hoger: 18% in 1990 en 23% à 25% in het jaar 2000. Voor de bestelwagen Renault-Master vallen beide percentages gunstiger uit tengevolge van de relatief lagere stilstandsverliezen.

Voor elektrische voertuigen geldt, dat in 1990 26% van het primaire energieverbruik bij standaard accu's en 29% bij Na-S-accu's als intrinsieke energie overblijft. Voor het jaar 2000 stijgt dit conversierendement met circa 3%. Bij EV's met Li-accu komt in het jaar 2000 40% van het primaire brandstofverbruik beschikbaar als intrinsieke energie. Het verschil met de Na-S-accu komt vooral door het zeer hoge rendement van de laad/ontlaadcyclus.

Tabel 4.2 *Intrinsieke energie en primaire brandstofverbruik in 2000 (Wh/km). Cyclus: 50% ECE-15, 50% Surburban*

Voertuig	Uitvoering	Energieverbruik		
		Intrinsiek	Primair	Rendement %
VW-GOLF	benzine	133	610	22
	diesel	133	509	26
VW-Citystromer	lood-zuur	181	612	30
	Na-S	158	500	32
	Li	147	366	40
Peugeot 205	benzine	104	502	21
	diesel	115	455	25
	NiCd	134	445	30
	Na-S	122	377	32
	Li	118	286	41
Renault-Express	benzine	114	542	21
	diesel	119	466	26
	Ni-Fe	146	488	30
	Na-S	130	406	32
	Li	126	309	41
Renault-Master	diesel	300	1056	28
	lood-zuur	409	1354	30
	Na-S	343	1055	33
	Li	332	800	42

Vergelijking van tabel 4.1 en 4.2 laat zien, dat de intrinsieke energie per kilometer afgelegde weg groter is voor ritten, die voor 50% in de voorsteden worden afgelegd. Dit wordt veroorzaakt door de toename van de luchtweerstandseffecten. Voor de voertuigen met een lage luchtweerstandscoefficiënt bedraagt deze toename ongeveer 9%, voor de minder gestroomlijnde VW Golf 14%. Voor ICEV's is de toename in het primaire-brandstofverbruik verwaarloosbaar, omdat de toename van de intrinsieke energie wordt gecompenseerd door de afname van de stilstandsverliezen. Bij EV's treden geen stilstandsverliezen op. Daar neemt daarentegen bij toenemend gebruik van het voertuig in voorsteden de mogelijkheden tot terugwinnen van remenergie (13% tot 20% van de benodigde intrinsieke energie) met 1% af.

De figuren in bijlage 3 geven aan via welke conversieverliezen de primaire energie uitmondt in energie 'aan de wielen'. Bij de vergelijking tussen ICEV en EV moet worden bedacht, dat

het hogere conversierendement voor EV's, zoals dat blijkt uit tabel 4.1, gedeeltelijk teniet wordt gedaan door het feit dat meer intrinsieke energie nodig is ten gevolge van het grotere gewicht van het voertuig. Bepalend voor het primaire energieverbruik is niet het overallrendement van alle conversiestappen, maar de absolute hoogte van het primaire energieverbruik voor eenzelfde vervoersprestatie (per persoons- c.q. ton-kilometer nuttige lading). In de figuren van bijlage 3 is dit het startpunt van de lijnen aan de linkerkant van de grafiek.

Tabel 4.3 geeft de resultaten van de onderlinge vergelijking van het primaire-energieverbruik van de verschillende typen voertuigen. Voor elk type voertuig is de uitvoering met de verbrandingsmotor op diesel als referentie gekozen.

Uit tabel 4.3 blijkt dat benzinevoertuigen in 1990 16% tot 27% meer primaire energie verbruiken dan hetzelfde voertuig in dieseluitvoering. In 2000 verbetert het benzinevoertuig iets meer dan het dieselveertuig, waardoor het meerverbruik in dat jaar 12% tot 21% bedraagt.

In 1990 varieert het primaire energieverbruik van elektrische voertuigen met een conventionele accu (lood-zuur, Ni-Fe, Ni-Cd) van 20% lager tot bij benadering gelijk aan het energiegebruik van een dieselveertuig. Bij de kleine voertuigen, die tevens ook een iets betere accu hebben qua energiedichtheid treedt energiebesparing op, bij de grotere EV's niet. In het jaar 2000 verslechtert de situatie voor conventionele accu's ten opzichte van dieselveertuigen. In stadsritten is er in een aantal gevallen nog een licht voordeel tot 6% over, maar bij ritten, die voor de helft in de voorstad plaatsvinden, vervalt ook dit voordeel vrijwel geheel.

Tabel 4.3 Primaire energieverbruik (diesel=100)

		100% ECE-15		50% ECE-15 50% Surburban
		1990	2000	2000
VW-Golf	diesel	100	100	100
	benzine	127	121	120
VW-Citystromer	lood-zuur	99	115	120
	Na-S	79	93	98
	Li		67	72
Peugeot 205	diesel	100	100	100
	benzine	116	112	110
	Ni-Cd	80	93	98
	Na-S	67	78	83
	Li		59	63
Renault-Express	diesel	100	100	100
	benzine	122	117	116
	Ni-Fe	85	99	105
	Na-S	70	82	87
	Li		62	66
Renault-Master	diesel	100	100	100
	lood-zuur	104	126	127
	Na-S	81	97	99
	Li		73	75

Elektrische voertuigen met een Na-S-accu hebben in 1990 een duidelijk energiebesparend effect. Ten opzichte van dieselveertuigen bedraagt dit effect 20% tot 30%, ten opzichte van benzinevoertuigen tot meer dan 40%. Daarbij moet wel worden bedacht dat deze accu op dit moment nog niet in de praktijk op enige schaal wordt toegepast. In het jaar 2000 neemt dit voordeel af. Toch blijft een EV met Na-S-accu energetisch in het voordeel ten opzichte van het dieselveertuig. Dit voordeel is voor stadsritten ongeveer 5% hoger dan voor ritten, die zich ook gedeeltelijk buiten de stad afspelen. Ten opzichte van benzinevoertuigen is in het jaar 2000 een EV met NaS-accu ongeveer 30% zuiniger. De toekomstige Li-accu scoort in dit opzicht nog aanmerkelijk gunstiger. Bij de gehanteerde uitgangspunten treedt bij gebruikmaking van deze accu een besparing aan primaire energie op van 30% tot 40% in stadsritten. In gedeeltelijk suburbane ritten neemt dit voordeel met 5% af.

Vanzelfsprekend zijn de resultaten afhankelijk van de gehanteerde waarden voor de diverse parameters. De berekening van het primaire energiegebruik vindt plaats door lineaire vermenigvuldiging van de intrinsieke energie met het produkt van de reciproken van de rendementen in de achtereenvolgende conversiestappen. Een afwijking ten opzichte van de uitgangspunten in het rendement van elk van de conversiestappen werkt dus proportioneel door in het eindresultaat.

4.2 Vergelijking met de praktijk

De resultaten die met de modelberekeningen in hoofdstuk 4 zijn verkregen, zijn vergeleken met praktijkresultaten.

Voor voertuigen met verbrandingsmotor is het primaire energieverbruik (na transport en distributie) vergeleken met het brandstofverbruik, zoals dat door de fabrikant of door de RAI ([10], [11]) is opgegeven. In de figuren van bijlage 3 zijn deze waarden aangegeven met 'verbruikscijfers RAI'.

Voor elektrische voertuigen zijn de uitkomsten van de berekeningen vergeleken met de resultaten, zoals deze voor de praktijkexperimenten zijn genoemd ([6], [7], [8]). Bovendien zijn de cijfers van 3 van de 4 typen voertuigen (VW-Citystromer en de beide Renaults) gelegd naast de uitkomsten van de '12 elektrische uren van Brugge' [12] op 9 september 1989. Hierbij moet worden aangetekend dat deze praktijkervaringen geen ECE-15-cyclus betreffen, maar de resultaten zijn van normaal gebruik in stadssituaties. Dit leidt vanzelfsprekend tot afwijkingen ten opzichte van de berekende resultaten.

Voor de VW-Golf blijkt het berekende energieverbruik zowel voor de benzine- als voor de diesel-uitvoering zeer goed overeen te komen met de cijfers uit de praktijk. Ook de praktijkervaring met de Citystromer met Na-S-accu [7] sluit zeer goed aan bij de berekeningsresultaten. Het energiegebruik in de praktijkproef in Brugge valt 14% hoger uit dan de berekende waarde.

Zowel de opgegeven verbruikscijfers voor de Peugeot met verbrandingsmotor als de opgave van het verbruik van de elektrische Peugeot (125 Wh/km bij J227C-cyclus) zijn 10% lager dan de modelberekeningen. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door een verschil tussen veronderstelde en werkelijke rolweerstandscoefficienten.

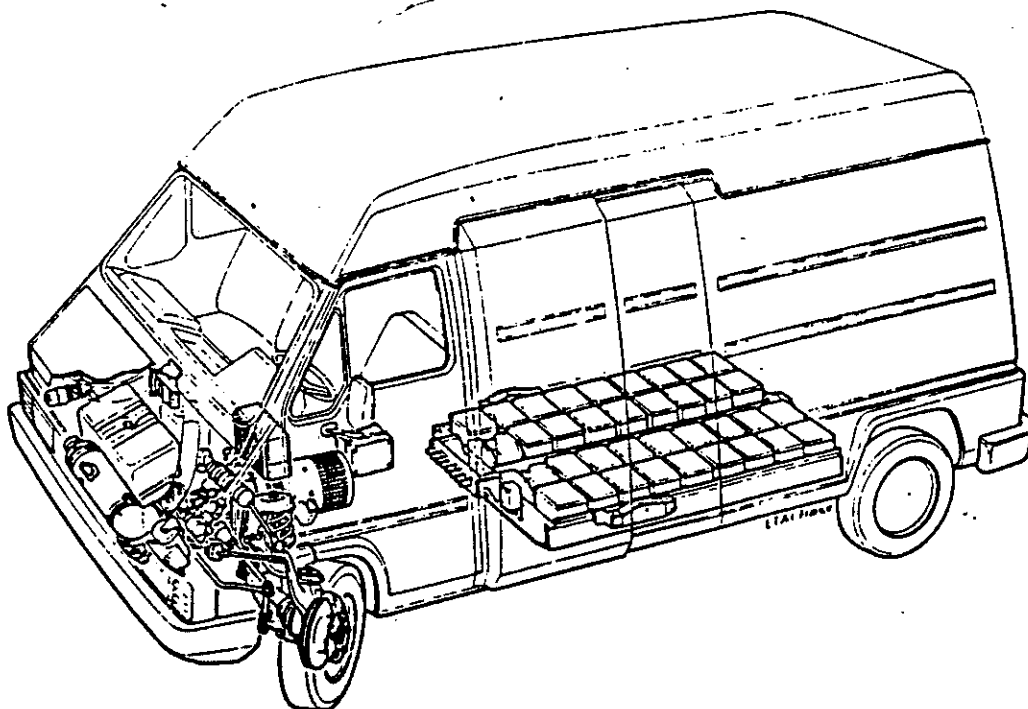
Het berekende brandstofverbruik van de Renault Express komt redelijk overeen met de door de RAI opgegeven cijfers. De benzine-uitvoering is volgens deze opgave ongeveer 10% zuiniger dan berekend, de dieseluarvoering 3% minder zuinig. Het enige gegeven uit de praktijk van het EV, dat kon worden gevonden, bestaat uit het energiegebruik tijdens de '12 elektrische uren van Brugge'. Het in die situatie vastgestelde gebruik van 340 Wh/km wijkt sterk af van de berekende waarde (circa 200 Wh/km). Een verklaring voor deze afwijking kan zijn dat het cycluserendement van de toegepaste Ni-Fe-accu sterk afwijkt van de aangenomen waarde. Deze veronderstelling wordt gesteund door het feit dat ook in de Renault Master het energiegebruik van de uitvoering met een Ni-Fe-accu circa 35% hoger ligt dan van de uitvoeringen met lood-zuur- of Ni-Cd-accu.

Met de Renault Master zijn praktijkexperimenten uitgevoerd met verschillende voertuigtypen (gesloten bestelauto, bestelauto met open laadbak en minibus) en verschillende soorten accu's (lood-zuur, Ni-Fe en Ni-Cd). De modelberekeningen zijn alleen uitgevoerd voor de gesloten bestelauto met lood-zuur en Na-S-accu. In de rapportage van de praktijkresultaten [6] worden cijfers gegeven voor het energieverbruik van de EV en, ter vergelijking, van de ICEV. Deze cijfers zijn in de figuur van bijlage 3 weergegeven. Er blijkt een goede overeenstemming te zijn tussen de berekende cijfers en de resultaten uit de praktijk. Het energiegebruik van de Renault Master tijdens de '12 elektrische uren van Brugge' was minder dan uit de berekeningen volgt. Daarbij moet echter worden bedacht, dat het in Brugge om een lichtere uitvoering gaat (met Ni-Cd- in plaats van lood-zuur-accu) en dat bovendien de in de berekeningen veronderstelde lading van 630 kg ontbrak. Uit deze vergelijking kan geconcludeerd worden dat de modelberekeningen in goede overeenstemming met de werkelijkheid zijn.

4.3 Effect recuperatief remmen

Uit de tabellen van bijlage 2 kan worden afgelezen, welke bijdrage recuperatief (regeneratief) remmen levert aan de intrinsieke energie van het elektrische voertuig. Deze bijdrage wordt sterk beïnvloed door het cycluserendement van de gebruikte accu. Immers, regeneratief remmen betekent een extra laad/ontlaadcyclus van de eerder aan de wielen afgedragen energie.

De procentuele bijdrage van recuperatief remmen aan de intrinsieke energie komt overeen met het percentage besparing op primaire brandstoffen ten gevolge van recuperatief remmen.



Elektrische bestelbus (Renault Master Electric)

Voor conventionele accu's varieert dit in stadsritten van 13% tot 15%. Voor de Na-S-accu ligt deze waarde, dankzij het hogere cyclusrendement, ongeveer 3% hoger. De meeste remenergie kan worden teruggewonnen bij gebruik van een Li-accu dankzij het zeer hoge cyclusrendement van 98%. De bijdrage bedraagt voor dit type accu 18% tot 20% van het energiegebruik.

Aangezien in suburbane ritten minder wordt geremd, neemt voor ritten met 50% ECE-15- en 50% Suburban-cyclus de bijdrage van recuperatief remmen af. Deze afname bedraagt ongeveer 1% van de benodigde intrinsieke energie.

LITERATUUR

- [1] Nationale Energie Verkenningen 1987
Energie Studie Centrum
Petten, september 1987, ESC-42.
- [2] Economische en Milieu-effecten van Elektrische auto's
G.F. Bakema; ESC
Petten, oktober 1989, ESC-50.
- [3] Energetische optimalisering van aandrijfsystemen voor elektrische voertuigen
L.A.M. van Dongen; Proefschrift TU Eindhoven, maart 1983.
- [4] Predicting fuel (or battery power) consumption
R.T.C. Harman; University of Canterbury (NZ)
Automotive Engineer, October/November 1985.
- [5] Demonstratieproject effect coördinatie van de verkeersregeling op het brandstofverbruik.
Bureau Goudappel Coffeng;
Deventer, 24 februari 1984, PBE/061/02/Tj.
- [6] Praktijkervaringen met twee modellen van elektrische Renaults in Chattellerault.
AVERE; Paper, gepresenteerd op de '12 Elektrische uren van Brugge';
Brugge, 9 september 1989.
- [7] High-Energy Battery for Electric Road Vehicles.
J.W. Angelis, H. Birnbreier, H. Haase
Documentatie van Asea Brown Boveri
Heidelberg, 1987.
- [8] Peugeot, de elektrische 205's, België als testland.
Paper, uitgereikt te Brugge, 9 september 1989.
- [9] Advanced Li batteries with a solid electrolyte: a brighter future for electric vehicles
Entech, Newsletter of the E.C. Joule Energy R&D Programme; 1989.
- [10] Brandstofverbruikscijfers van personenauto's.
Min. van EZ, Min. van V&W, Sven, RAI;
februari 1989.
- [11] Auto-Rai catalogus.
RAI; Amsterdam, 2 t/m 12 februari 1989.
- [12] The 12 Electric hours of Bruges, official results.
P. Van den Bossche, G. Maggetto
ASBE (Belgian Section of AVERE);
Brussel, 1989.

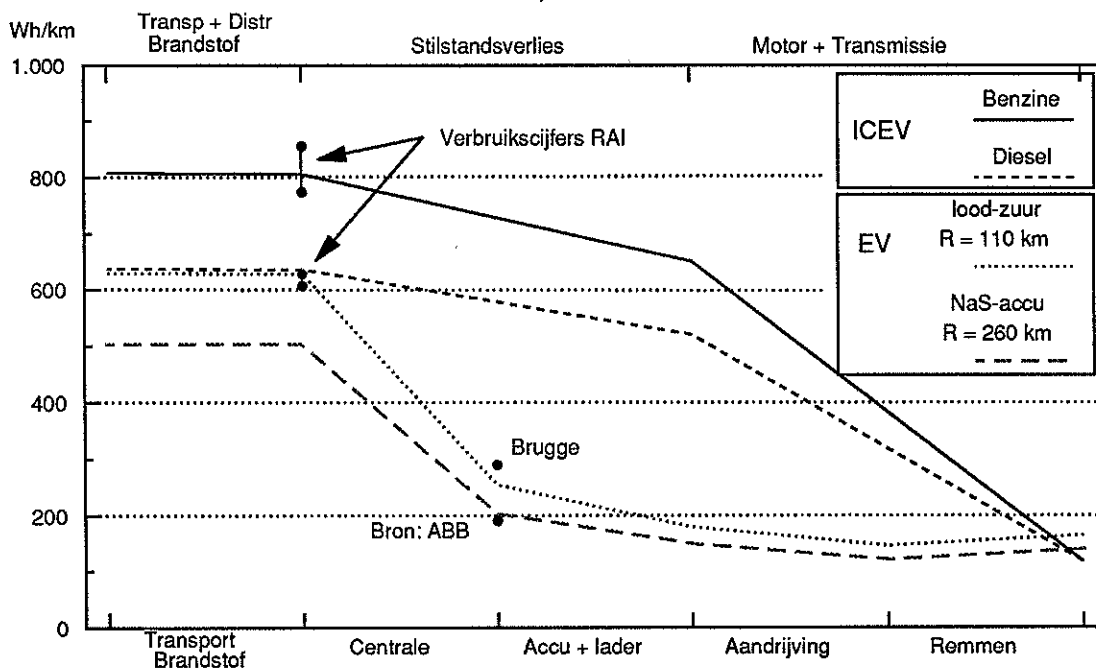
BIJLAGE 1. BEREKENINGSRESULTATEN
VOERTUIGEN MET
VERBRANDINGSMOTOR

BIJLAGE 2. BEREKENINGSRESULTATEN
VOERTUIGEN MET ELEKTRISCHE
AANDRIJVING

BIJLAGE 3. GRAFIEKEN

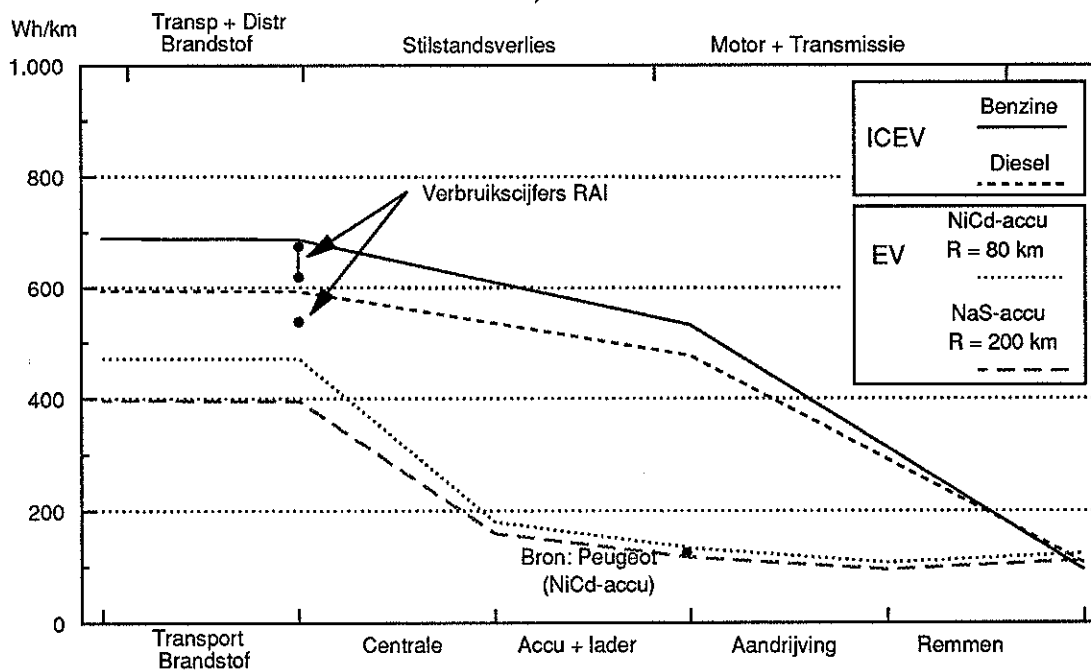
Energiegebruik

VW Golf/Citystomer
Jaar: 1990, Test: ECE15



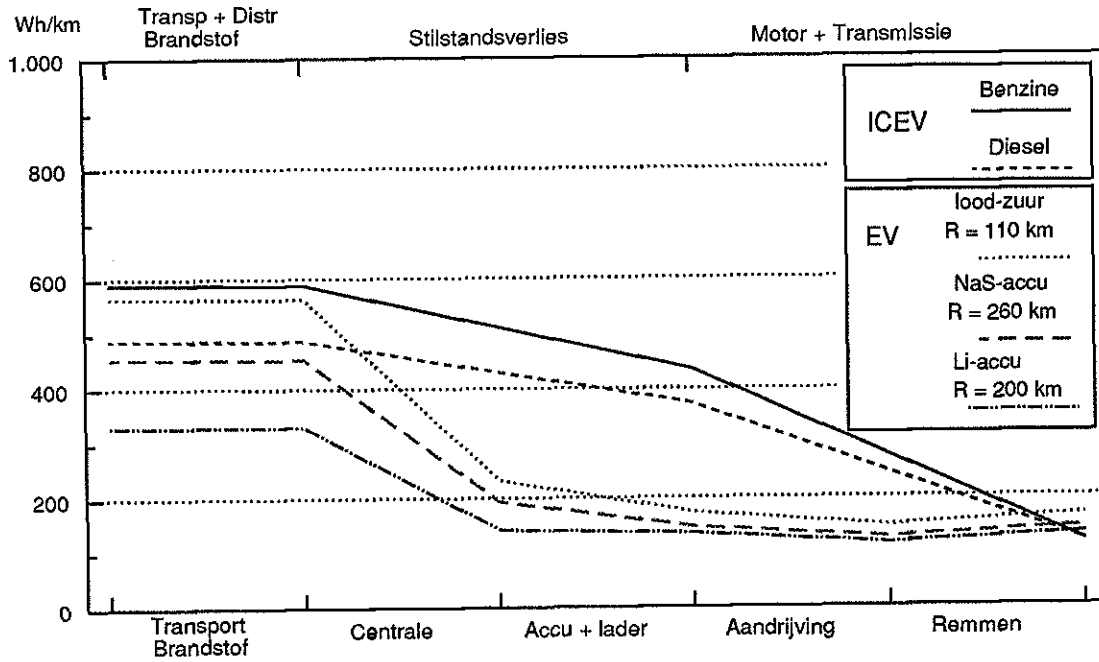
Energiegebruik

Peugeot 205
Jaar: 1990, Test: ECE15



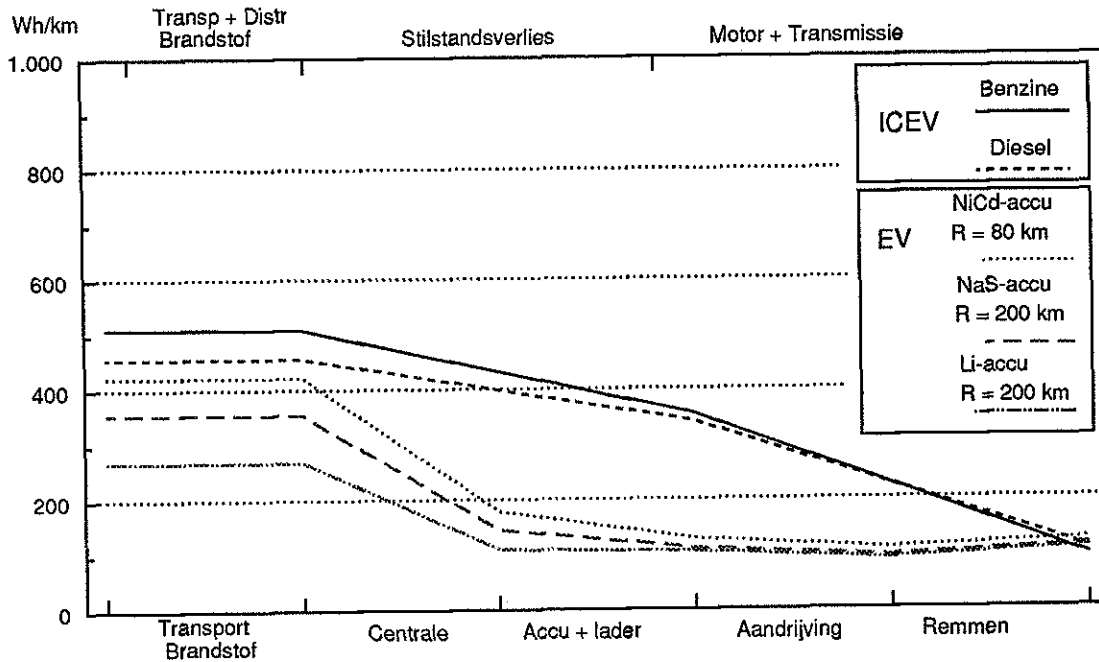
Energiegebruik

VW Golf/Citystromer
Jaar: 2000, Test: ECE15



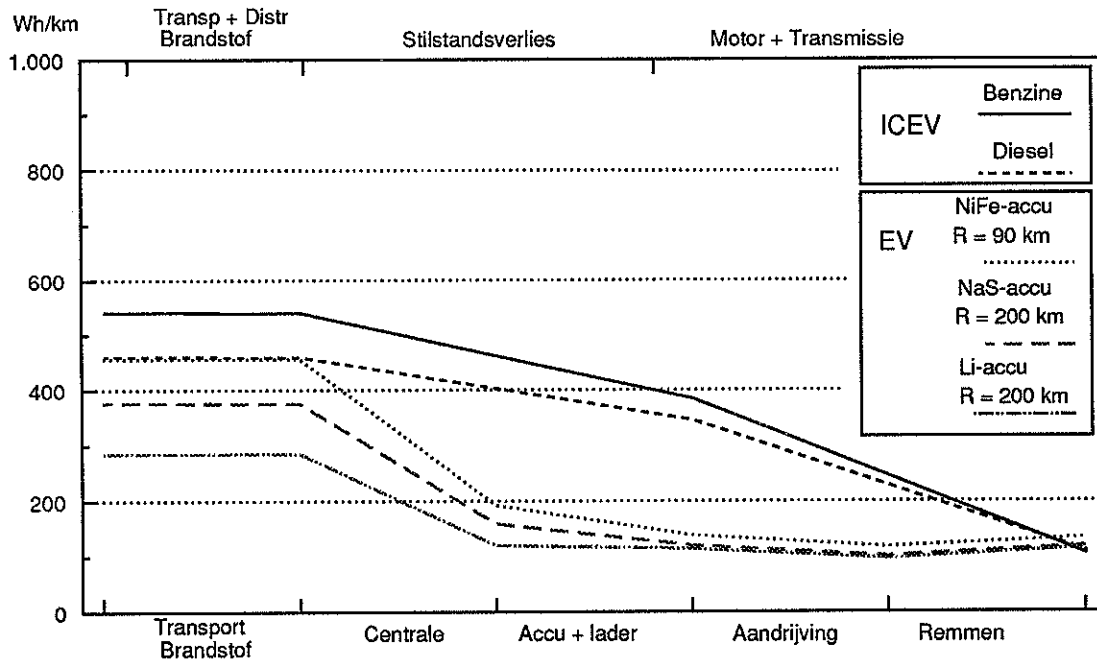
Energiegebruik

Peugeot 205
Jaar: 2000, Test: ECE15



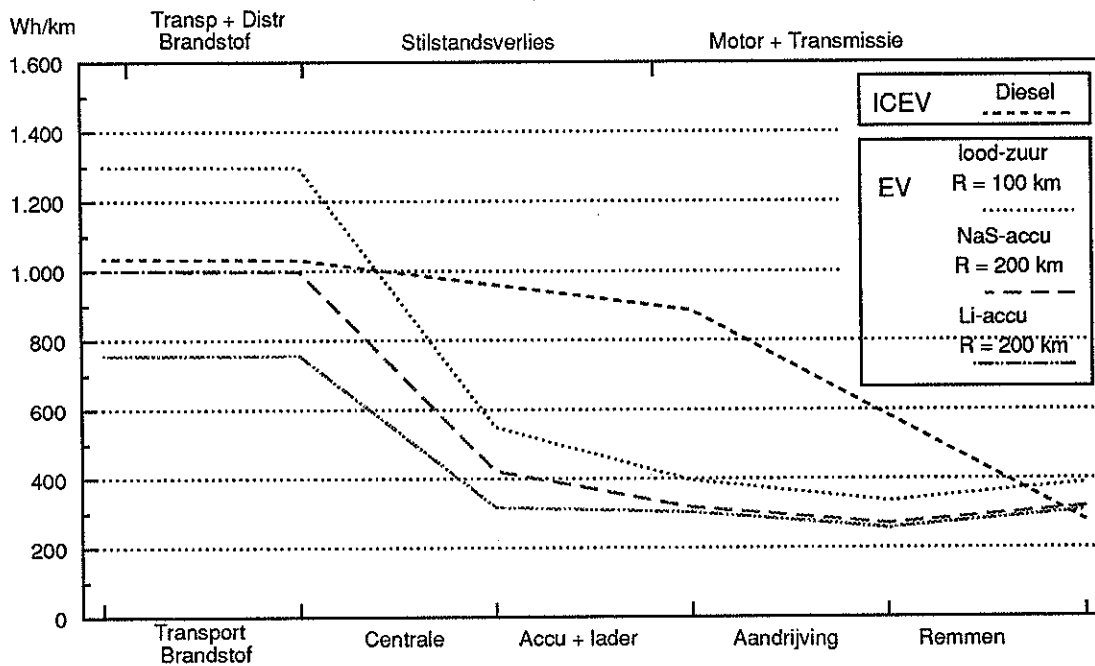
Energiegebruik

Renault Express
Jaar: 2000, Test: ECE15



Energiegebruik

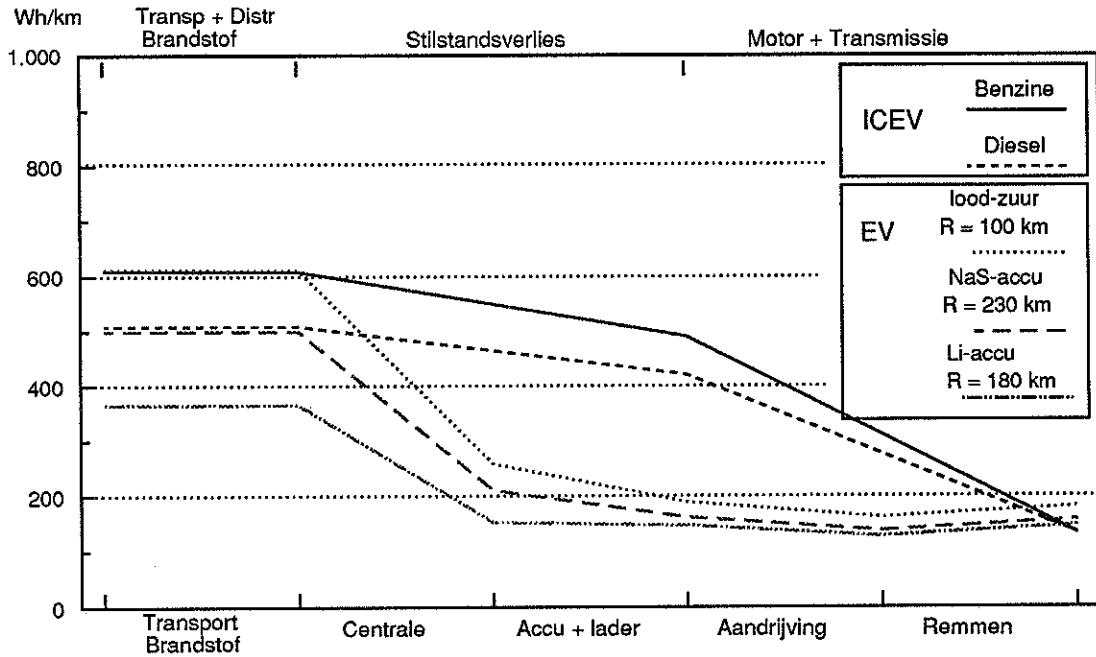
Renault Master
Jaar: 2000, Test: ECE15



Energiegebruik

VW Golf/Citystroomer

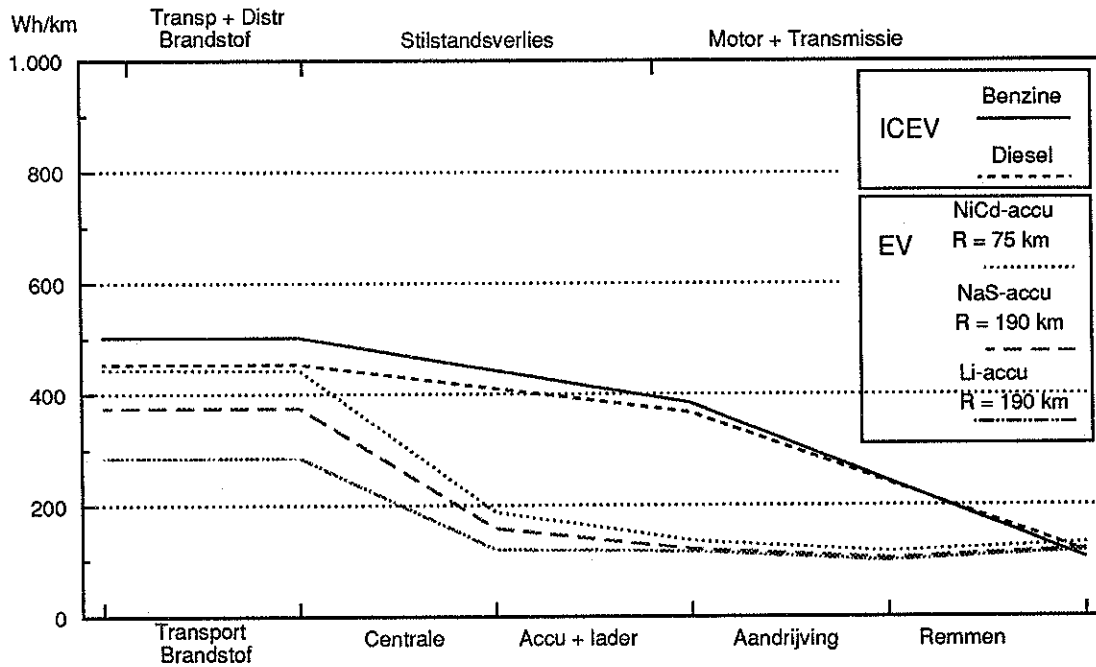
Jaar: 2000, Test: 50% ECE15, 50% Suburban



Energiegebruik

Peugeot 205

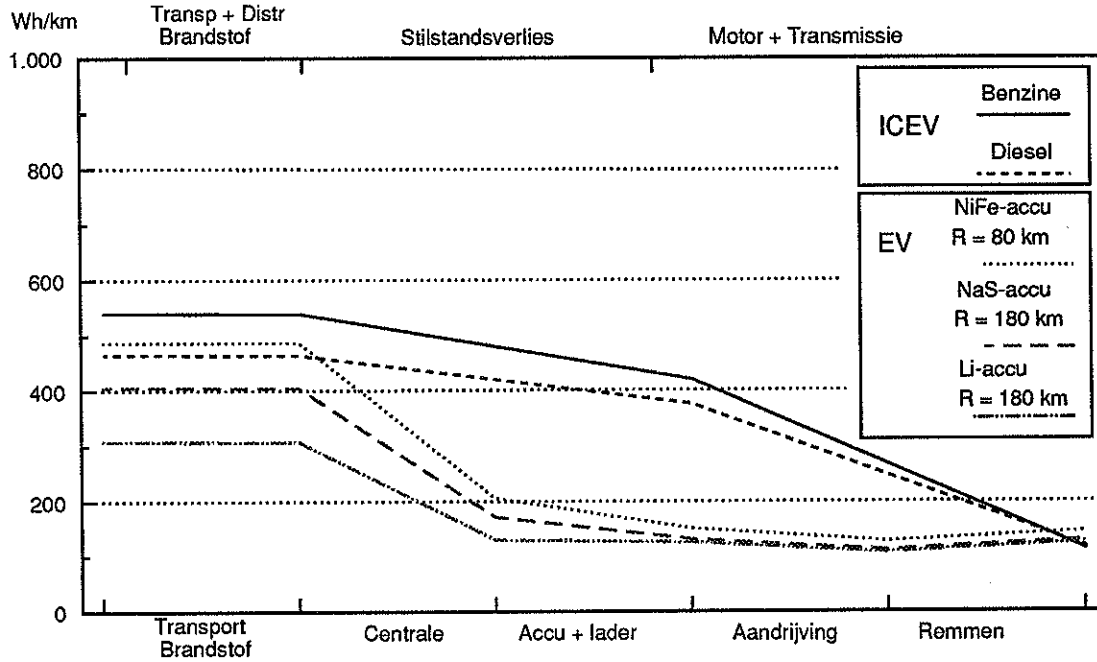
Jaar: 2000, Test: 50% ECE15, 50% Suburban



Energiegebruik

Renault Express

Jaar: 2000, Test: 50% ECE15, 50% Suburban



Energiegebruik

Renault Master

Jaar: 2000, Test: 50% ECE15, 50% Suburban

