

MEETPROGRAMMA PRAKTIJKPROEF ELEKTRISCH AANGEDREVEN VOERTUIGEN

O. VAN HILTEN

De studie is uitgevoerd in opdracht van Koninklijk Nederlands Vervoer en staat bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7048.01. De werkzaamheden zijn gefinancierd door NOVEM, onder opdrachtnummer 42130-210.3.

INHOUD

1. INLEIDING	5
2. BESCHRIJVING VAN DE VERZAMELDE DATA	7
3. GEREALISEERDE AFSTANDEN, TOTAAL EN PER DAG	9
4. ENERGIEGEBRUIK	11
4.1. Algemeen	11
4.2. Resultaten van de kWh-metingen	11
4.3. Vergelijking van het verbruik van primaire energiedragers	14
4.4. Milieubelasting	17
5. HET OPLADEN VAN DE BATTERIJEN	19
6. ANALYSE VAN DE UITKOMSTEN VAN HET RITREGISTRATIESYSTEEM	21
6.1. Beschrijving van het ritregistratiesysteem	21
6.2. Resultaten	22
6.2.1. Afstanden en ritten	23
6.2.2. Netto energiegebruik	24
6.2.3. Besturing van de motor	26
6.2.4. Bruto energiegebruik en oplaadtijden	27
6.2.5. Bruto versus netto elektriciteitsverbruik; rendementen	27
7. CONCLUSIES	31
LITERATUUR	33

1. INLEIDING

In het kader van de "Praktijkproef met elektrisch aangedreven voertuigen" zijn door de unit ESC-Energiestudies van het ECN data geanalyseerd ten aanzien van het energiegebruik van de in de proef gebruikte auto's. Dit rapport is één van de bijlagen bij het hoofd rapport van KNV (voluit: Koninklijk Nederlands Vervoer) waarin verslag wordt uitgebracht van de bevindingen in de praktijkproef.

Het hoofddoel van de praktijkproef is het opdoen van gebruikerservaringen. Daarnaast zijn op beperkte schaal data verzameld die inzicht geven in de gebruiksintensiteit (aantal ritten per dag, aantal kilometers per dag) en het energiegebruik van de auto's. Deze data worden in dit rapport geanalyseerd. Gecombineerd met de in Bijlage C van het hoofd rapport gerapporteerde ervaringen van chauffeurs en passagiers, geeft dit een beeld van de prestaties en de inzetbaarheid van elektrische voertuigen.

Dataverzameling is in de proef van secundair belang geweest en (mede daardoor) met de nodige problemen gepaard gegaan. Dit heeft uiteraard consequenties voor de analyse, die op sommige punten gebaseerd is op een kleine en/of onvolledige dataset.

In het kader van de "Praktijkproef" is, in de periode 1/12/1990 tot 1/2/1992, door steeds wisselende gebruikers gereden met een zestal elektrische auto's. De belangrijkste gegevens van deze voertuigen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 1. Gebruikte voertuigen, type batterijen en energie-inhoud van de batterijen

Type voertuig	Type batterij	Energie-inhoud (bij benadering)
2 VW Jetta's	Natrium-zwavel	20 kWh
1 VW Transporter	Natrium-zwavel	40 kWh
1 Chrysler Voyager	Natrium-zwavel	20 kWh
1 Peugeot J5E	Lood-zwavelzuur	20 kWh
1 MTC-Surya	Lood-zwavelzuur	13 kWh

De voertuigen zijn gebruikt voor verschillende toepassingen (woon-werk, personenvervoer, goederenvervoer) en in alle delen van het land. De omstandigheden waaronder de voertuigen gereden hebben zijn dus zeer divers. Als gevolg hiervan, en door het ongetwijfeld uiteenlopende rijgedrag van de verschillende chauffeurs, zijn de resultaten per auto en per gebruiker onderling niet vergelijkbaar. Geaggregeerd over de gehele periode geven de data wel een beeld van de karakteristieken van de elektrische auto's bij 'gemiddeld' gebruik. Onder de gebruikers waren energiebedrijven en taxibedrijven sterk vertegenwoordigd.

Gedurende de proef zijn langs twee wegen data verzameld. In de eerste plaats zijn voor alle auto's dagelijks formulieren ingevuld waarop de gereden afstand, de tijdsduur van het laden en de hoeveelheid geladen elektriciteit zijn ingevuld. In de tweede plaats zijn gedurende een vrij korte periode voor één van de Jetta's data verzameld met behulp van een automatisch ritregistratiesysteem. Deze data zijn veel uitgebreider en gedetailleerder dan de op de formulieren ingevulde gegevens. In de rapportage worden deze data daarom separaat (in paragraaf 6) besproken.

2. BESCHRIJVING VAN DE VERZAMELDE DATA

Bij het verzamelen van de data is als uitgangspunt gehanteerd dat de data zoveel mogelijk 'automatisch', dus zonder dat de gebruiker van de auto iets hoeft te doen, verzameld zouden moeten worden. Hiermee wordt bereikt dat de gebruiker het niet bij voorbaat vervelend gaat vinden om in de elektrische auto te rijden (omdat er allerlei formulieren ingevuld moeten worden) en dat er zo weinig mogelijk menselijke fouten worden gemaakt (bij het invullen van die formulieren). Het opdoen van gebruikservaringen heeft de hoogste prioriteit gekregen in de proef, het verzamelen van data is daaraan ondergeschikt geweest. Vanaf het begin van de praktijkproef is het streven er dan ook op gericht geweest om de auto's uit te rusten met ritregistratie-apparatuur, die voor automatische opslag van een aantal meetgegevens op een geheugendrager zorgdraagt. Het enige dat de gebruiker dan nog moet doen, is het van tijd tot tijd verwisselen van de geheugendrager. Aan het te gebruiken ritregistratiesysteem is de eis gesteld dat, naast de 'conventionele' gegevens, ook de belangrijkste energiestromen gemeten worden. Dergelijke systemen zijn niet commercieel beschikbaar en, zo heeft de ervaring geleerd, niet eenvoudig te ontwerpen. Het gevolg hiervan is dat pas in juni een systeem kon worden ingebouwd, dat pas eind september vrij was van kinderziektes. Bovendien heeft slechts in één van de voertuigen (de Jetta nr. 8) inbouw plaatsgevonden.

Om niet geheel van data verstoken te blijven is toch aan de gebruikers gevraagd om dagelijks een aantal kengetallen in te vullen op de daartoe ontworpen formulieren. Op grond van het bovengenoemde uitgangspunt zijn deze formulieren heel summier gehouden: de gebruikers is gevraagd om per dag vijf getallen in te vullen. Deze getallen zijn:

- a. Op het moment dat de auto voor het eerst die dag gebruikt gaat worden:
 1. De stand van de kilometerteller.
 2. De tijd.
 3. De stand van de kWh-meter die zich, bij de beide Jetta's en de Chrysler, onder de motor-
kap bevindt.
- b. Op het moment dat de auto voor het laatst die dag is gebruikt en aangesloten wordt op het elektriciteitsnet:
 1. De tijd.
 2. De stand van de kWh-meter.

Op de formulieren was verder ruimte gelaten voor opmerkingen van de gebruikers. Deze opmerkingen zijn meegenomen in bijlage C van het hoofdrapport van de praktijkproef. Deze bijlage zal ook verschijnen als ECN-rapport.

Uit de in het begin van de proef ingevulde formulieren bleek dat de kWh-meters in de Jetta's en de Chrysler *geen* correcte waarden gaven en dat correctie niet mogelijk was omdat de geconstateerde procentuele fout varieerde, al naar gelang de ladingstoestand van de batterij. Dit betekent dat de geregistreerde kWh-gegevens van de Chrysler, de Jetta nr. 11, en van de Jetta nr. 8 vóór inbouw van de ritregistratie-apparatuur, niet bruikbaar zijn. Gedurende de proef is daarom waar mogelijk gewerkt met (goed werkende) externe kWh-meters, om zo toch nog enige bruikbare kWh-metingen te verkrijgen. Hetzelfde geldt voor de Transporter en de Peugeot, die geen ingebouwde kWh-meter hebben (bij de Peugeot is de meter in het (externe) laadapparaat ingebouwd). Daarnaast zijn, met name door de gebruikers van de Peugeot en de Transporter, de waarden van de interne Ah-meter genoteerd.

Als gevolg van eerdergenoemde prioriteitsstelling (gebruikservaring op de eerste plaats, dataverzameling op de tweede), zijn er enige hiaten gevallen in de dataverzameling:

- De formulieren zijn niet altijd volledig ingevuld;
- De formulieren zijn soms onleesbaar ingevuld;
- De formulieren zijn soms aantoonbaar fout ingevuld.

Hierdoor is het aantal dagen waarvoor de formulieren volledig zijn ingevuld lager dan het aantal dagen waarop met de auto gereden is.

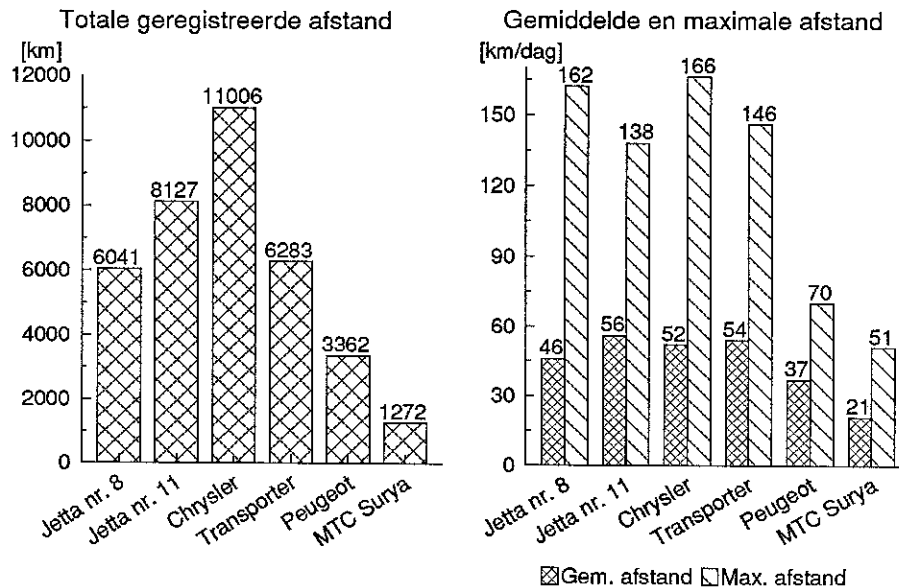
De gegevens hebben betrekking op de volgende periodes:

Chrysler	: 23 november 1990 - 24 oktober 1991
Jetta nr. 8	: 7 januari 1991 - 10 december 1991
Jetta nr. 11	: 23 november 1990 - 28 oktober 1991
Transporter	: 13 mei 1991 - 9 februari 1992
Peugeot J5	: 21 mei 1991 - 16 januari 1992
MTC-Surya	: 5 september 1991 - 26 oktober 1991 en
	: 8 januari 1992 - 27 januari 1992

Naast de data afkomstig van de zes voertuigen uit de 'praktijkproef' is tevens gebruik gemaakt van gegevens betreffende de Peugeot J5 die in gebruik is geweest bij de PGEM (periode waarover gegevens beschikbaar zijn: 1/8/91 t/m 28/1/92).

3. GEREALISEERDE AFSTANDEN, TOTAAL EN PER DAG

In figuur 1 is, voor alle auto's, de totaal gereden afstand, de gemiddelde afstand per dag en de maximale afstand per dag weergegeven. De gemiddeldes hebben alleen betrekking op dagen waarop gereden is (dagen waarop niet gereden is zouden het gemiddelde fors omlaag trekken).



Figuur 1. Totale afstand, gemiddelde afstand en maximale dagafstand

De in figuur 1 getoonde totale afstand is kleiner dan het werkelijk gereden aantal kilometers, aangezien het aantal dagen waarover metingen beschikbaar zijn vrij gering is in relatie tot de lengte van de proef. Het niet beschikbaar zijn van meetgegevens voor een bepaalde dag kan verschillende oorzaken hebben: de auto was defect, de auto was niet nodig (bijvoorbeeld in weekends) of men is vergeten de formulieren in te vullen. Opgemerkt dient te worden dat de auto's prototypen zijn, zodat het uitvalpercentage niets zegt over de betrouwbaarheid van marktrijpe types.

De ervaringen met de Peugeot hebben geleerd dat de actieradius aanmerkelijk daalt indien de buitentemperatuur afneemt. De gemiddeld afgelegde afstand is bij de gebruikers in de zomer inderdaad beduidend hoger dan bij latere gebruikers. Dit is een bekend fenomeen bij lood-zwavelzuur batterijen. In [1] wordt gemeld dat de capaciteit van de batterij bij een elektroliettemperatuur van 0° Celsius nog slechts 80% is van de capaciteit bij een temperatuur van 26° Celsius. Dit effect zou ongedaan gemaakt kunnen worden door de batterij tijdens het laden op te warmen. Aangezien de temperatuur van het elektroliet bij de normale Nederlandse buitentemperatuur slechts langzaam afneemt, zou het 's nachts opladen van de batterij in een verwarmde ruimte het capaciteitsverlies ook al aanzienlijk verminderen. De Na-S batterijen worden op een constante temperatuur van rond de 300° Celsius gehouden, zodat de omgevingstemperatuur geen invloed heeft op de werking van de batterij.

4. ENERGIEGEBRUIK

4.1. Algemeen

Zoals reeds opgemerkt is tijdens de proef gebleken dat de kWh-meters die zich in de Jetta's en de Chrysler bevonden, ondeugdelijk waren. Tegelijk met de installatie van het ritregistratiesysteem in de Jetta nr. 8 is in die auto ook een goed werkende kWh-meter aangebracht. De vervolgens verzamelde gegevens worden uitvoerig besproken in paragraaf 6. Ten aanzien van de andere Jetta en de Chrysler zijn bij een klein aantal gebruikers kWh-metingen verricht met een externe kWh-meter. De kWh-metingen aan de Transporter, de Peugeot en de MTC-Surya zijn eveneens uitgevoerd met behulp van een externe kWh-meter.

De gemeten kWh-waarden geven aan hoeveel elektriciteit uit het stopcontact is geleverd aan de auto. Deze elektriciteit wordt slechts gedeeltelijk voor het daadwerkelijk rijden (d.w.z. "aan de wielen") gebruikt. De overige elektriciteit gaat 'onderweg' verloren in het laadapparaat, de batterij en de aandrijving of wordt, in het geval van Na-S batterijen, gebruikt voor het warmhouden van de batterij. Niet alle benodigde elektriciteit komt uit het stopcontact, want er is aan boord van de elektrische auto nog een 'energiebron': tijdens het remmen werkt de motor als generator, zodat elektriciteit wordt opgewekt en opgeslagen in de batterij, om op een later tijdstip weer gebruikt te worden. De gemeten hoeveelheid kWh uit het stopcontact is dus de resultante van:

- De benodigde energie "aan de wielen", die afhangt van voertuigkarakteristieken (gewicht, frontaal oppervlak) en ritkarakteristieken (gemiddelde snelheid, mate van acceleratie, de aanwezigheid van hellingen, etc.);
- De (eventueel) benodigde energie voor het warmhouden van de batterij;
- De energie die tijdens het remmen gewonnen wordt;
- De verliezen in het laadapparaat, de batterij en de aandrijving;
- Verbruik voor verlichting, radio, ruitewissers etc.

Deze vijf 'deelwaarden' zijn niet bekend. Alleen de resultante, kWh's uit het stopcontact, wordt gemeten. Met behulp van de met het ritregistratiesysteem verzamelde gegevens kan een meer gedetailleerde analyse van deze 'deelwaarden' worden gemaakt (zie paragraaf 6).

De Na-S batterijen moeten te allen tijde op een bedrijfstemperatuur van 300°C worden gehouden. Dus ook als de auto met Na-S batterij niet gebruikt wordt, verbruikt hij elektriciteit. Dit vrij forse verbruik voor het warmhouden van de prototype Na-S batterijen (ongeveer 200 W voor de Jetta's en de Chrysler, zie paragraaf 6) leidt ertoe dat het elektriciteitsverbruik per kilometer sterk afhangt van de gebruiksintensiteit: het totale elektriciteitsverbruik uitgedrukt in kWh/km zal lager zijn naarmate het aantal gereden kilometers stijgt. Met andere woorden: het elektriciteitsverbruik is niet alleen gerelateerd aan het aantal gereden kilometers, maar ook aan de tijdsduur waarin dat verbruik is gemeten.

4.2. Resultaten van de kWh-metingen¹

De schaarse correcte metingen aan Jetta nr. 8, Jetta nr. 11, de Chrysler en de Transporter leveren de volgende resultaten op. Het 'aantal dagen' is het aantal dagen waarvoor een kWh-meting beschikbaar was. Daar kunnen dagen bij zitten waarop niet gereden is, hetgeen het gemiddeld aantal gereden kilometers per dag beïnvloedt.

¹ De data voor Jetta nr. 8 in deze paragraaf zijn verzameld met het ritregistratiesysteem.

Tabel 2. Elektriciteitsverbruik door auto's met Na-S batterij

Auto	Aantal dagen	km/dag	kWh/km
Jetta nr. 8	46	32,5	0,37
Jetta nr. 11	14	35	0,40
Chrysler	44	42	0,41
Transporter	73	47	0,60

Aangezien het elektriciteitsverbruik voor het warmhouden van de batterij is inbegrepen in de geregistreerde kWh-waarden, is het berekende verbruik in kWh/km sterk afhankelijk van de gebruikintensiteit. Met deze cijfers is het dus niet mogelijk om het elektriciteitsverbruik vast te stellen indien het aantal kilometers per dag significant lager of hoger is, of indien de benodigde energie voor warmhouden veel lager wordt door een betere isolatie. Om toch antwoorden op deze vragen te kunnen geven, is met behulp van lineaire regressie de volgende relatie geschat (neem aan dat de batterij op tijdstippen t_1 en t_2 vol is):

$$\text{Totaal energiegebruik in } [t_1, t_2] = x \text{ maal "aantal gereden kilometers in } [t_1, t_2]" + y \text{ maal } (t_2 - t_1)$$

Het totaal energiegebruik, het aantal gereden kilometers en de tijdsduur $t_2 - t_1$ (meestal een etmaal) worden geregistreerd. De waarden x en y worden vervolgens met bovenstaande relatie geschat. Dit levert de volgende resultaten:

Tabel 3. Berekening elektriciteitsverbruik auto's met Na-S batterij

Auto	x (kWh/km)	y (kW)
Jetta nr. 8	0,17	0,28
Jetta nr. 11	0,19	0,33
Chrysler	0,25	0,29
Transporter	0,34	0,49

De waarde van x zou gezien kunnen worden als een benadering voor het verbruik in kWh/km alleen voor het rijden, y zou gezien kunnen worden als een benadering van het vermogen in kW dat nodig is voor het warmhouden van de batterij. Echter: het gaat hier om benaderingen, waarbij is uitgegaan van de twee onjuiste veronderstellingen dat de benodigde energie per kilometer constant is en dat er een constant vermogen nodig is voor het warmhouden van de batterij. Aan de precieze waarde van x en y mag derhalve niet al te veel waarde worden gehecht. Bovenstaande relatie is in feite alleen bedoeld om het totale elektriciteitsverbruik te schatten voor dagkilometrages die afwijken van het dagkilometrage in tabel 2.

De berekende waarden in tabel 3 kunnen gecontroleerd worden m.b.v. de gerealiseerde verbruikscijfers uit tabel 2. Dit geeft een indicatie dat de geschatte relatie een goede benadering vormt. Ook de gebruikelijke significantietoetsen voor multiple regressie geven aan dat de gevonden relatie significant is. Wel is de onderliggende dataset van kWh-metingen vrij klein.

Vooraf bij de Transporter, die veel energie gebruikt tijdens stilstand wegens het grote batterijpakket, is het effect van meer kilometers op het gemiddelde kWh-verbruik goed te zien. Indien gemiddeld 80 km/dag zou worden gereden, is het elektriciteitsverbruik (berekend met bovengenoemde geschatte relatie) 0,49 kWh/km. Bij een gemiddeld aantal kilometers van 40 km/dag is het verbruik 0,63 kWh/km, oftewel 30% hoger.

Bij de auto's met lood-zwavelzuur batterij is er geen sprake van energiegebruik voor het warmhouden van de batterij. De toegevoerde elektriciteit wordt dus (vrijwel) uitsluitend aangewend voor het rijden. De registraties geven het volgende beeld.

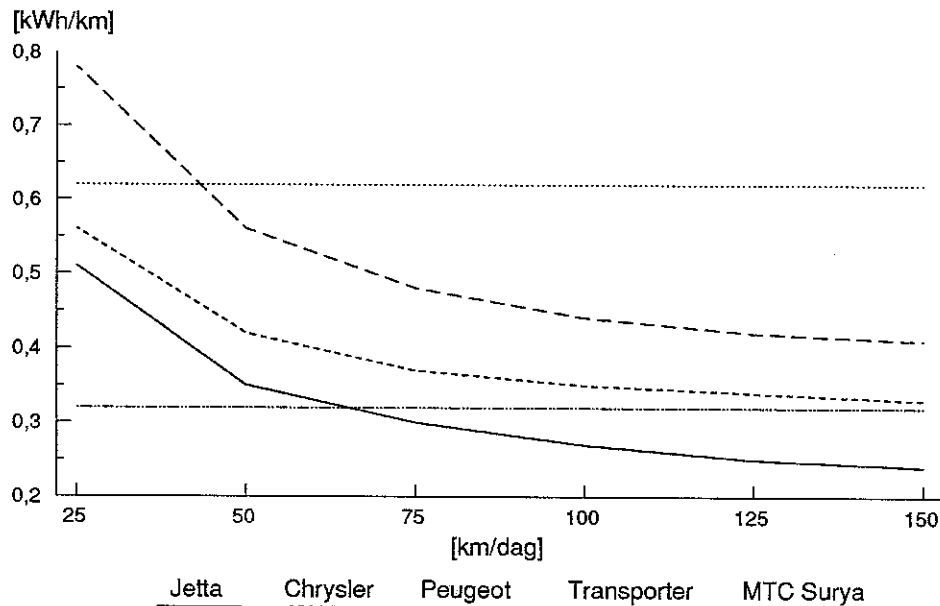
Tabel 4. Elektriciteitsverbruik door auto's met lood-zwavelzuur batterij

Auto	kWh/km
Peugeot J5	0,62
MTC-Surya	0,32

NB: De cijfers van de MTC-Surya beslaan alleen de periode 5/9/91 tot en met 26/10/91. De spreiding in de verbruikscijfers per gebruiker zijn bij de Peugeot aanzienlijk: van 0,52 kWh/km tot 0,66 kWh/km. Dit houdt mede verband met de installatie van een nieuwe motor in september/oktober 1991, waardoor enerzijds de auto pittiger is geworden, maar anderzijds het energiegebruik hoger.

Ter vergelijking: de Peugeot die in gebruik is bij de PGEM had, in de periode waarover data beschikbaar waren, een verbruik van 0,65 kWh/km.

Met behulp van de relatie en de veronderstelde parameters uit tabel 3 is voor alle auto's het elektriciteitsverbruik per kilometer berekend voor dagkilometrages vanaf 25 km/dag. De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.



Figuur 2. Elektriciteitsverbruik

Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de voertuigen met (de huidige) Na-S batterijen bij lage kilometrages t.o.v. lood-zwavelzuur batterijen meer energie gebruiken, als gevolg van de energie voor het warmhouden van de batterij. Bij hogere kilometrages is de lood-zwavelzuur batterij in het nadeel, als gevolg van het hoge gewicht van de batterij (en dus van het voertuig) en van de slechtere efficiency van de lood-zwavelzuur batterij t.o.v. de Na-S batterij (zie ook paragraaf 4.3 en 6.2).

De gevonden resultaten voor de auto's met lood-zwavelzuur batterijen kunnen vergeleken worden met het gemeten elektriciteitsverbruik van elektrische auto's in Zwitserland [2]. Het elektriciteitsverbruik van de meeste personenvoertuigen in [2] is lager dan het elektriciteitsverbruik van de MTC-Surya. Dit verschil kan voor een belangrijk deel verklaard worden uit het gewicht van de diverse auto's. In [2] wordt een relatie afgeleid tussen het gewicht van de auto en het kWh-verbruik per kilometer ($\text{kWh-verbruik per 100 kilometer} = \text{gewicht}/40 + 2,5$). Volgens deze relatie zou de MTC-Surya, met zijn ledig gewicht (incl. batterij) van 1100 kg, 0,30 kWh/km verbruiken. Iets minder dus dan de gevonden waarde. Indien dezelfde relatie verondersteld wordt voor

het elektriciteitsverbruik van bestelauto's zou het elektriciteitsverbruik van de Peugeot (gewicht 2420 kg) 0,63 kWh/km zijn. Dit komt zeer goed overeen met de gevonden waarde.

4.3. Vergelijking van het verbruik van primaire energiedragers

De hernieuwde aandacht voor de elektrische auto komt voort uit de zorg om de als ernstig beschouwde milieubelasting door het verkeer. Het gaat daarbij om de uitstoot van stoffen die rechtstreeks schadelijk zijn voor de gezondheid (roetdeeltjes, benzeen), stoffen die bijdragen aan smogvorming (koolwaterstoffen, NO_x), en CO_2 . Ten aanzien van lokale luchtverontreiniging is het positieve effect van elektrische auto's maximaal: tijdens het rijden produceert de elektrische auto geen luchtverontreiniging. Indien de uitstoot door elektriciteitsproductie in de beschouwing wordt meegenomen, hangt het van veel factoren af of de elektrische auto er goed af komt. Er zijn reeds vele studies verschenen die de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en CO_2 door een auto met verbrandingsmotor en een elektrische auto vergelijken ([3],[4]), waaruit blijkt dat bij de gangbare elektriciteitsparken in Nederland en Europa de elektrische auto schoner is dan de auto met interne verbrandingsmotor. Slechts indien er veel kolen gestookt worden, kan de SO_2 en CO_2 uitstoot van de elektrische auto hoger zijn.

Met name de uitstoot van CO_2 speelt de laatste tijd een grote rol in de discussie. De meeste studies zijn gebaseerd op theoretische rendementen van voertuigen en elektriciteitsopwekking. De metingen in de praktijkproef geven de mogelijkheid om de huidige stand van zaken te beoordelen. Een goede maat voor de uitstoot van CO_2 (en in veel mindere mate ook voor de uitstoot van NO_x , SO_2 , stof en koolwaterstoffen) is het verbruik van primaire energiedragers.

Bij de bepaling van het verbruik van primaire energiedragers zijn de volgende veronderstellingen gemaakt:

- Het elektriciteitsverbruik van elektrische auto's wordt afgeleid uit de tabellen 2 en 4. Voor de Jetta is uitgegaan van een gemiddelde van de beide auto's;
- De rendementen van oliewinning, -transport, -raffinage en het transport van benzine en diesel zijn afgeleid uit [4];
- Het rendement van elektriciteitsopwekking met fossiele brandstoffen is overeenkomstig het gerealiseerde rendement in Nederland in 1990 [5]. De transport- en distributieverliezen zijn op 5% gezet. Het rendement van de winning en transport van primaire brandstoffen ten behoeve van de elektriciteitsproductie is overgenomen uit [4];
- De elektrische Jetta wordt vergeleken met een Jetta op benzine met een 1.3 liter motor, waarvan het verbruik 1 op 13,2 is volgens [6]. De MTC-Surya wordt vergeleken met een 'gemiddelde' kleine personenauto (Fiat Uno, Opel Corsa, Peugeot 205) op benzine. Het verbruik is, op basis van de gegevens in [6], gezet op 1 op 14,5;
- De Transporter, de Peugeot en de Chrysler worden alle drie vergeleken met de dieselvans van de Peugeot J5, waarop de elektrische variant gebaseerd is. Het verbruik is 1 op 10;
- Ten aanzien van het energiegebruik voor de verwarming van het interieur van een elektrische auto is uitgegaan van de gegevens van de elektrische Peugeot J5: een dieselmethaankachel met een vermogen van 4,5 kW en een brandstofverbruik van 0,7 liter/uur. Het aantal vollasturen per jaar van deze kachel is geschat op 100 uur;
- Het verbruik van primaire energiedragers van de elektrische auto's met Na-S batterijen is uitgerekend voor verschillende gemiddelde (n.b. gemiddeld over alle dagen van het jaar) etmaal-kilometrages.

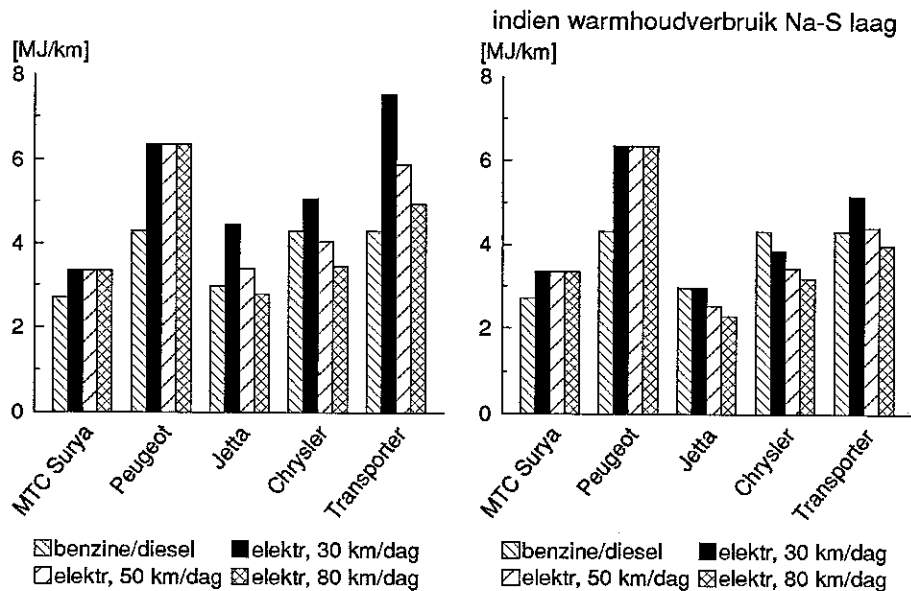
Opgemerkt dient te worden dat de vergelijking van het primaire energiegebruik niet meer dan een indicatie kan geven. In de eerste plaats hebben de energiegebruikscijfers van de verschillende auto's niet betrekking op een 'standaardrit', zodat een exacte vergelijking niet te maken is. In de tweede plaats geeft de in paragraaf 4.2 afgeleide formule ter bepaling van het elektriciteitsverbruik van de auto's met Na-S slechts een benadering van het werkelijke verbruik.

De resultaten van de vergelijking zijn weergegeven in figuur 3a. Duidelijk is dat de beide auto's met lood-zwavelzuur batterij meer primaire energie gebruiken dan hun conventionele tegenvoe-

ters. Vooral bij de Peugeot J5 is het verschil vrij groot. Ten aanzien van de auto's met Na-S is goed te zien dat het primair energiegebruik per kilometer als gevolg van het warmhouden van de batterij sterk afhangt van het gemiddelde aantal kilometers per etmaal. Dit geldt vooral voor de Transporter met zijn 'dubbele' batterij. Ondanks het hoge verbruik voor warmhouden van de batterij gebruiken de Jetta en de Chrysler bij hoge kilometrages minder primaire energie dan hun conventionele tegenvoeters.

De gebruikte batterijen zijn prototypes die meer warmteverliezen hebben dan strikt noodzakelijk. Indien de batterijen goed geïsoleerd worden, kan het warmhoudvermogen beperkt worden tot 90 W voor het type batterij in de Jetta en de Chrysler ([7]). Om inzicht te krijgen in hoe de vergelijking in dat geval uitpakt, is in figuur 3b aangenomen dat de y-waarde uit tabel 2, die een indicatie geeft van het warmhoudvermogen, 0,1 is voor de Jetta en de Chrysler en 0,2 voor de Transporter. Zoals reeds opgemerkt mag aan de precieze waarde van y niet te veel waarde gehecht worden. De via deze aanpak gevonden resultaten, weergegeven in figuur 3b, zijn dus niet meer dan een groffe benadering van het elektriciteitsverbruik indien de batterij goed geïsoleerd is. De resultaten geven aan dat de Jetta en de Chrysler nu ook bij bescheiden jaarkilometrages minder primaire energie gebruiken dan hun conventionele tegenvoeters. Bij de Transporter wordt pas een besparing bereikt bij hoge kilometrages. Voor een grotere actieradius moet dus in termen van energiegebruik een hoge prijs betaald worden indien de actieradius niet regelmatig daadwerkelijk gebruikt wordt.

Hierbij dient wel de kanttekening gemaakt te worden dat het beoogde type gebruik van de elektrische auto (veel stadsverkeer met korte ritjes en veel stop-and-go verkeer) veel energie per kilometer vraagt. Het brandstofverbruik van conventionele auto's in dergelijk verkeer zal aanzienlijk hoger zijn dan de gemiddelde waarde die gebruikt is in figuur 3. Juist in stadsverkeer heeft de elektrische auto voordelen, als gevolg van de afwezigheid van stilstandsverliezen en de mogelijkheid van terugwinning van remenergie. Daar staat tegenover het hogere gewicht, dat ook een belangrijke bepalende factor is van het energiegebruik in stadsverkeer, van de elektrische auto. In [9] wordt voor het jaar 2000 voorzien dat een auto met lood-zwavelzuur batterij in stadsverkeer meer energie verbruikt dan een dieserversie en ongeveer evenveel als een benzineversie. De auto met Na-S batterij verbruikt vrijwel evenveel (in het geval van relatief zware auto's) of 20% minder (in het geval van relatief lichte auto's) primaire energie dan de dieserversie. Het grote verschil tussen de lichte en de zware auto komt voort uit het relatief kleinere belang van stilstandsverliezen bij zware diesel- en benzine-auto's en een relatief groter effect van het extra batterijgewicht bij zwaardere auto's. Overigens is in [9] uitgegaan van een warmhoudvermogen van 80 W, voor alle typen auto met Na-S batterij.



Figuur 3a en b. Vergelijking primair energiegebruik

Het is duidelijk dat de elektrische auto zijn 'winst' moet halen uit de efficiënte energie-omzetting in de auto: bij de elektriciteitsopwekking en -distributie gaat vijftig tot zestig procent van de primaire energie verloren. Afgezien van verbetering van de reeds efficiënte elektrische aandrijving, is bij auto's met Na-S batterijen de grootste winst te behalen door het reduceren van de warmteverliezen van de batterij, en bij lood-zwavelzuur batterijen door de efficiency van het laadapparaat en de laadprocedure te vergroten [8]. Daarbij lijken de kansen van de auto met Na-S batterij beter te liggen [9].

Hoe groot de verliezen 'tussen stopcontact en wielen' zijn bij de auto's in de proef is niet exact te achterhalen. Wel zijn bij zowel de Transporter als de Peugeot door sommige gebruikers de standen van de Ah-meter op het dashboard opgenomen. Deze Ah-meter geeft aan hoeveel ampère-uur van de batterij naar de motor zijn gegaan. Gecombineerd met de gemiddelde batterijspanning kan hiermee uitgerekend worden hoeveel energie uit de batterij naar de motor loopt. Vergelijking van dit cijfer met het kWh-verbruik uit het net geeft een ruwe indruk van de verliezen van het laadapparaat en de batterij en, in het geval van Na-S batterijen, van de verliezen t.g.v. het warmhouden van de batterij.

Gemiddeld heeft de Peugeot 2,23 Ah/km gebruikt, en de Transporter 2,00 Ah/km (opgemerkt dient te worden dat er gedurende de proef diverse malen problemen zijn geweest met de Ah-meter van de Transporter. De dagwaarden variëren ook vrij sterk, maar dat is tevens het geval bij de Peugeot (van 0,5 Ah/km tot meer dan 5 Ah/km)). De batterijspanning van de Transporter is 180 V, die van de Peugeot 168 V. Pas wanneer de batterij bijna leeg is, daalt de spanning. Gemiddeld zal de spanning dus dicht bij 180 respectievelijk 168 V liggen. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.

Tabel 5. Energieverliezen

Auto	Ah/km	Spanning	"Netto" kWh/km	"Bruto" kWh/km	Verliezen
Peugeot J5	2,23 ²	168 V	0,37	0,62	40%
Transporter	2,00	180 V	0,36	0,60	40%

NB: Er vindt terugwinning van remenergie plaats (de Ah-meter in de Peugeot 'ziet' dat niet, de meter in de Transporter wel). Dit betekent, plastisch uitgedrukt, dan niet alle Ah uit het stopcontact komen. De verliezen over het hele traject stopcontact-uitgangbatterij zullen dus per kWh nog iets hoger zijn.

De verliezen zijn dus in beide gevallen (min of meer toevallig) even hoog. De verliezen voor het warmhouden van de batterij worden gecompenseerd door het hogere batterijrendement van de Na-S batterij. De verliezen van de Peugeot zijn hoog in vergelijking met in de literatuur gevonden waarden. In [9] wordt uitgegaan van een rendement van 70% procent 'tussen stopcontact en motor'. Op de verliezen bij de auto's met Na-S batterijen wordt teruggekomen in paragraaf 6.2.

Ten aanzien van de bestelauto's (Peugeot J5 en de Transporter) dient nog het volgende opgemerkt te worden. Door de aanwezigheid van een batterijpakket wordt de laadruimte en het toelaatbare laadgewicht aanzienlijk lager t.o.v. de dieserversie waarop deze elektrische auto's gebaseerd zijn. De elektrische Peugeot J5, bijvoorbeeld, heeft een laadgewicht van 700 kg tegen 1500 kg voor de dieserversie waarvan hij is afgeleid (het gewicht van de batterijen is bijna 900 kg). De energievergelijking zou aanmerkelijk ongunstiger uitvallen voor de elektrische auto indien het energiegebruik vergeleken zou worden met een (lichtere en dus zuiniger) dieselbestelauto met een overeenkomstige laadruimte en laadgewicht.

Ook op dit punt heeft de Na-S batterij een voordeel. Uitgaand van een vier keer zo hoge energiedichtheid van Na-S batterijen t.o.v. lood-zwavelzuur batterijen, zou de Peugeot J5 in plaats van bijna 900 kilo lood-zwavelzuur batterijen slechts 220 kg Na-S batterijen nodig hebben. Het laadvermogen zou daardoor met 650 kg toenemen.

4.4. Milieubelasting

Ten aanzien van de vergelijking tussen auto's met een interne verbrandingsmotor en elektrische auto's op het punt van geproduceerde luchtverontreiniging en CO₂-uitstoot is het grote voordeel van elektrische auto's het volledig ontbreken van uitstoot *tijdens* het rijden. Bij de productie van de benodigde elektriciteit voor de elektrische auto vindt echter wel uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en CO₂ plaats. Door deze uitstoot toe te rekenen aan de elektrisch gereden kilometers, kan een vergelijking gemaakt worden tussen de emissies op landelijke schaal van elektrische auto's en auto's met verbrandingsmotor. In deze paragraaf wordt een dergelijke vergelijking op ruwe wijze gemaakt, gebruikmakend van de elektriciteitsverbruikscijfers van de elektrische auto's in de praktijkproef en CBS-statistieken ten aanzien van de emissies als gevolg van elektriciteitsproductie en gemiddelde emissies door voertuigen met interne verbrandingsmotor. Deze vergelijking kan niet meer dan een indicatie zijn, aangezien:

- De gehanteerde cijfers niet betrekking hebben op een 'standaardrit' en dus slechts in beperkte mate onderling vergelijkbaar zijn;
- Het bij de elektrische auto's, met name bij de auto's met Na-S batterij, gaat om prototypes, waarvan het elektriciteitsverbruik een niet geheel reëel beeld geeft.

De vergelijking is gemaakt voor een 'gemiddelde' personenauto en een 'gemiddelde' bestelauto. Het verbruik van de elektrische auto's is gebaseerd op de tabellen 2 en 4 (0,35 kWh/km voor

² Voor de Peugeot die in gebruik is bij de PGEM is een gemiddelde van 2,42 Ah/km gevonden.

personenauto's en 0,60 kWh/km voor bestelauto's). De emissiecijfers voor de elektriciteitsproductie hebben betrekking op het jaar 1990 en zijn gebaseerd op [10]. De emissiefactoren voor auto's met verbrandingsmotor zijn de parkemissiefactoren (d.w.z. gemiddeld over het gehele personen- respectievelijk bestelwagenpark) voor 1990, afkomstig uit [11]. De uitstoot bij raffinage en distributie van autobrandstoffen is niet in de vergelijking meegenomen.

De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in tabel 6.

Tabel 6. *Vergelijking emissies elektrische auto versus auto met interne verbrandingsmotor in gram per kilometer*

Soort auto	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	VOS	Aërosolen
Personenauto						
Verbrandingsmotor	189	0,06	1,8	6,9	1,2	0,07
Elektrisch	233	0,29	0,43	0,01	0,002	0,01
Bestelauto						
Verbrandingsmotor	270	0,23	1,6	5,2	1,1	0,23
Elektrisch	400	0,50	0,73	0,02	0,003	0,02

De conclusie uit deze tabel is dat met de huidige elektrische auto's en het huidige (d.w.z. 1990) elektriciteitspark de uitstoot van CO₂ en SO₂ door elektrische auto's hoger is dan de uitstoot door auto's met interne verbrandingsmotor. De uitstoot van aërosolen en NO_x is beduidend lager voor elektrische auto's, terwijl de uitstoot van koolmonoxide en koolwaterstoffen voor elektrische auto's bijna verwaarloosbaar is vergeleken met de uitstoot door auto's met interne verbrandingsmotor.

Het voert te ver om hier in te gaan op de vraag hoe deze vergelijking in de toekomst zal veranderen. Zowel de elektriciteitscentrales als de auto met interne verbrandingsmotor zullen schoner worden. Er zijn op dit punt diverse studies uitgevoerd voor zowel Nederland als Europa ([3] respectievelijk [4]), die in het algemeen op een resultaat uitkomen dat gunstiger is voor de elektrische auto dan in bovenstaande tabellen.

5. HET OPLADEN VAN DE BATTERIJEN

Het opladen van de batterijen van elektrische auto's dient bij voorkeur 's nachts te gebeuren. Door het 's nachts opladen kan geprofiteerd worden van de lagere elektriciteitsstarieven tijdens de zogenaamde daluren (van 23.00 tot 7.00 uur op werkdagen en in de weekends). Bovendien worden daarmee, ook bij grootschalige inzet van elektrische voertuigen, capaciteitsproblemen bij de productie en distributie van elektriciteit vermeden.

Via de ingevulde formulieren is niet te achterhalen hoeveel kWh's in plateau-uren en hoeveel in daluren is opgeladen (de ritregistratie-apparatuur levert deze informatie wel, zie paragraaf 6). Wel is bijgehouden hoe laat de auto 's middags of 's avonds op het elektriciteitsnet wordt aangesloten. In veel gevallen is de auto alleen tijdens de normale werktijd gebruikt. Dit betekent dat de auto tussen 15.00 en 18.00 uur op het net wordt aangesloten, zodat de batterij grotendeels wordt opgeladen tijdens plateau-uren. Dit betekent ook dat in veel gevallen tijdens de gebruikelijke avondpiek in het elektriciteitsverbruik (tussen 18.00 en 19.00 uur) wordt opgeladen. Bij grootschalige introductie van elektrische voertuigen zou dit problemen geven (zie [3]), in de eerste plaats op lokaal niveau (de capaciteit van distributienetten) en in de tweede plaats op landelijk niveau (de totale productiecapaciteit).

Als gevolg van het meestal vroege tijdstip waarop de auto's aan het net 'gehangen' worden is de gemiddelde tijd die de auto's op het net zijn aangesloten vaak ongeveer 15 uur (grofweg van 's avonds 17.00 uur tot 's ochtends 8 uur). Alleen indien de auto ook 's avonds voor privédoeleinden wordt gebruikt, is de 'laadtijd' ongeveer 8 uur.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de gebruikers van de auto's met Na-S batterijen geadviseerd is om de auto zoveel mogelijk op het net aan te sluiten als er niet mee gereden wordt. Dit lijkt door veel gebruikers consequent te zijn uitgevoerd, waardoor het opladen automatisch hoofdzakelijk gedurende plateau-uren heeft plaatsgevonden.

Het is in principe heel goed mogelijk om het opladen pas om 23.00 uur te laten starten, ook al wordt de auto eerder op het net aangesloten. De vraag is dan wel of de tijd tussen 23.00 en 7.00 uur lang genoeg is om de batterij van voldoende energie te voorzien. De Peugeot, de Chrysler en de Jetta's hebben een batterij met een energie-inhoud van 20 à 22 kWh, de batterij van de Surya heeft een energie-inhoud van 13 kWh. Uit de data van Jetta nr. 8 blijkt dat de Na-S in een tempo van ongeveer 2,2 kWh per uur wordt opgeladen. Dit impliceert dat met 10 A wordt opgeladen (10 A bij 220 V levert 2,2 kW). Indien een laadstroom van 16 A zou worden toegepast (zoals is gebeurd bij de Transporter), dan zou het laadvermogen ongeveer 3,5 kW zijn, zodat het opladen van een batterij met een energie-inhoud van 22 kWh binnen 8 uur in principe ruimschoots mogelijk is. Bij lood-zwavelzuur batterijen zijn de oplaadkarakteristieken gecompliceerder. Peugeot rekent voor de J5 met een oplaadtijd van 7 à 8 uur, MTC rekent met 8 uur voor de Surya. De conclusie is dat afgezien van de Transporter (energie-inhoud 44 kWh) het vrijwel altijd mogelijk moet zijn om de batterij tijdens de daluren op te laden. Bij de Transporter ligt het voor de hand om een 3-fase laadapparaat te gebruiken, zodat ook bij deze auto opladen tijdens plateau-uren vermeden kan worden. Gezien het gebruik van de Transporter in de proef (gemiddeld 47 km/dag en een energiegebruik van 0,6 kWh/km), is overigens een 1-fase laadapparaat wel afdoende: opladen tijdens plateau-uren zal alleen noodzakelijk zijn als de auto ruim boven de 50 kilometer op een dag rijdt.

6. ANALYSE VAN DE UITKOMSTEN VAN HET RITREGISTRATIESYSTEEM

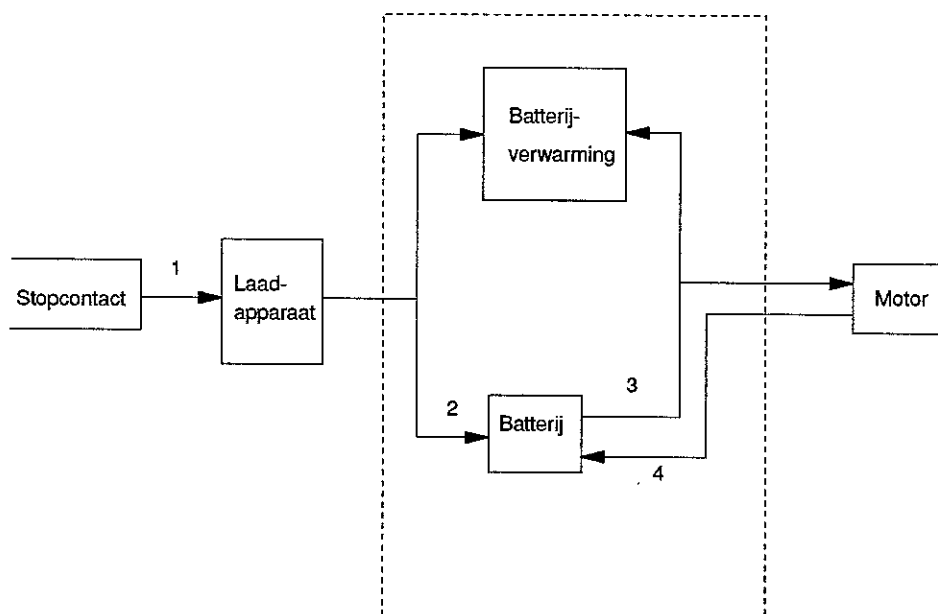
6.1. Beschrijving van het ritregistratiesysteem

Vanaf 10/7/1991 heeft voor Jetta nr. 8 dataverzameling door middel van een automatisch ritregistratiesysteem plaatsgevonden. Hiermee is veel extra informatie verkregen. Het gebruikte ritregistratiesysteem is gebaseerd op het 'conventionele' systeem ACM. Dit ACM-systeem registreert (o.a.):

- Het begin- en eindtijdstip van elke rit (begin rit = 'contact aan', einde rit = 'contact uit');
- Per rit de gereden afstand, de gemiddelde snelheid, en de snelheidsverdeling (tijdsduur waarin de snelheid tussen 0 en 20, 20 en 50, 50 en 80, 80 en 120 en hoger dan 120 was).

Dit systeem is uitgebreid met een aantal metingen specifiek voor de elektrische auto. Het betreft hier:

- De tijdstippen waarop de auto op het elektriciteitsnet wordt aangesloten en van het elektriciteitsnet wordt ontkoppeld;
- De tijdstippen waarop het laden van de batterij daadwerkelijk begint en eindigt;
- De energie (in Wh) die vanuit het net wordt betrokken (zie "1" in figuur 4);
- De energie die als gevolg van het laden de batterij ingaat (zie "2" in figuur 4);
- De energie die van de batterij naar de motor en/of het batterijverwarmingssysteem gaat (zie "3" in figuur 4);
- De energie die van de motor naar de batterij loopt (de 'teruggewonnen' remenergie, zie "4" in figuur 4).



Figuur 4. Schematisch overzicht elektrisch systeem

Bij de energiemetingen moeten de volgende kanttekeningen gemaakt worden.

1. De onnauwkeurigheid van de berekeningen wordt bepaald door de onnauwkeurigheid van de afzonderlijke onderdelen (sensoren, interface tussen sensoren en boordcomputer en de boordcomputer zelf). De onnauwkeurigheid van de sensoren en de interface is niet bekend, de onnauwkeurigheid van de boordcomputer is 1%. Het ontwerp van het systeem heeft er toe geleid dat er voor "3" en "4" ook kleine positieve waarden (ongeveer 0,3 Wh per minuut) geregistreerd worden als er *geen* stroom loopt. Deze waarden worden genegeerd. "Met de

- hand" uitgevoerde controlemetingen van gereden afstand en opgeladen kWh hebben geen onnauwkeurigheden van het systeem aan het licht gebracht.
2. De gereden afstand zonder energiegebruik ("rollen") staat altijd op nul. Het systeem registreert dat de auto geen energie verbruikt voor het rijden als de stroom naar de motor onder een bepaalde grenswaarde komt. Deze grenswaarde kan niet op nul worden gezet aangezien er altijd wel een kleine stroom loopt. In overleg met de heer Hornung van ABB is deze grenswaarde op 20 Ampère gezet. Aangezien in de data de gereden afstand zonder energiegebruik altijd op nul staat, kan geconcludeerd worden dat de stroom naar de motor nooit onder de 20 Ampère komt. Blijkbaar moet deze grenswaarde hoger gezet worden, hoewel 20 A al erg veel lijkt.
 3. Tijdens het rijden van de auto zijn de warmteverliezen zodanig dat het verwarmingssysteem niet hoeft bij te springen. De gemeten energiestroom "3" is dus de energie die in zijn geheel naar de motor loopt.

Ter voorkoming van misverstanden is het zinvol enige definities te expliciteren. Bij de energiemetingen is het erg belangrijk rekening te houden met de plaats van de meting. Zowel in het laadapparaat als in de batterij is er namelijk sprake van verliezen. Bijvoorbeeld: de energie die eerst in de batterij wordt opgeslagen en vervolgens van de batterij naar de motor loopt, wordt driemaal geregistreerd ("1", "2" en "3" in figuur 4). De eenheid van deze registraties is in alle gevallen Watt-uur (Wh). De drie geregistreerde waarden zullen verschillend zijn als gevolg van de verliezen in het laadapparaat en de batterij. Dit betekent dat grote zorgvuldigheid betracht moet worden indien gesproken wordt van "het elektriciteitsverbruik per kilometer". Bovendien zijn er nog twee complicerende factoren, namelijk:

- Is rekening gehouden met de terugwinning van remenergie?
- Is rekening gehouden met het elektriciteitsverbruik voor het warmhouden van de batterij?

In deze notitie worden de volgende definities gebruikt, alle uitgedrukt in Wh/km:

- *Netto* elektriciteitsverbruik per kilometer *zonder* terugwinning remenergie: energiestroom "3";
- *Netto* elektriciteitsverbruik per kilometer *met* terugwinning remenergie: "3" minus "4";
- *Bruto onzuiver* elektriciteitsverbruik per kilometer: stroom "1". Dit is dus inclusief het elektriciteitsverbruik voor warmhouden;
- *Bruto zuiver* elektriciteitsverbruik per kilometer: stroom "1" minus het verbruik voor warmhouden.

Het onderscheid bruto-netto slaat dus op de plaats van de meting: bij het stopcontact of bij de uitgang van de batterij. Het onderscheid zuiver-onzuiver slaat op het al dan niet meenemen van het verbruik voor warmhouden.

Ten aanzien van het netto elektriciteitsverbruik dient opgemerkt te worden dat het elektriciteitsverbruik via de 12 V accu (voor verlichting, ruitewisser etc.) daarin inbegrepen is. Het bruto zuiver elektriciteitsverbruik is met de huidige ritregistratie-apparatuur niet exact te bepalen. Tijdens het laden wordt de voor het verwarmingssysteem benodigde energie rechtstreeks uit het net betrokken. Deze energiestroom wordt niet apart gemeten (zie figuur 4). Het verbruik voor warmhouden tijdens laadperiodes zal niet gelijk zijn aan het wel te bepalen warmhoudverbruik tijdens niet-laadperiodes, aangezien tijdens het laden enig warmteverlies optreedt waardoor de batterij opgewarmd wordt. Het verwarmingssysteem hoeft dan dus niet permanent op volle kracht te werken. Zie verder paragraaf 6.2.5.

6.2. Resultaten

T.a.v. de 'conventionele' informatie betreffende gereden afstanden, snelheden, aantallen ritten etc. zijn data beschikbaar voor de periode 10/7/1991 tot en met 14/11/91. Op 14/11/1991 is de kilometerteller van de Jetta defect geraakt, zodat de informatie vanaf dat moment niet langer bruikbaar is. Ten aanzien van informatie betreffende de elektrische energiestromen in de auto zijn bruikbare data beschikbaar voor de periode 30/9/1991 tot en met 14/11/1991. In deze periode reed de auto hoofdzakelijk in Amsterdam, dus het betreft hier typisch stadsverkeer. In

de periode voor 30/9 werd het systeem voor wat betreft de elektrische stromen geplaagd door kinderziektes.

Een rit is gedefinieerd als de periode tussen "contact aan" en "contact uit". In de navolgende tabellen zijn ritten met een lengte minder dan 10 meter buiten beschouwing gelaten.

6.2.1. Afstanden en ritten

In de tabellen 7 en 8 zijn de gegevens betreffende de gereden afstanden en aantallen ritten samengevat. Hierin wordt bevestigd dat de gemiddelde ritlengte vrij kort is (5,6 km) en dat er een groot aantal ritten per dag wordt gemaakt (gemiddeld 9 met een maximum van 34). Uit de ritlengteverdeling in figuur 5a blijkt dat 68% van de ritten korter is dan 5 km. Uit figuur 5b blijkt dat de snelheid gedurende 45% van de tijd lager is dan 20 km/uur. De gemiddelde snelheid over de gehele periode is 30 km/uur. De gemiddelde rijduur per gebruiksday is iets minder dan twee uur. In principe is dus ruimschoots tijd beschikbaar voor het tussentijds bijladen van de batterijen.

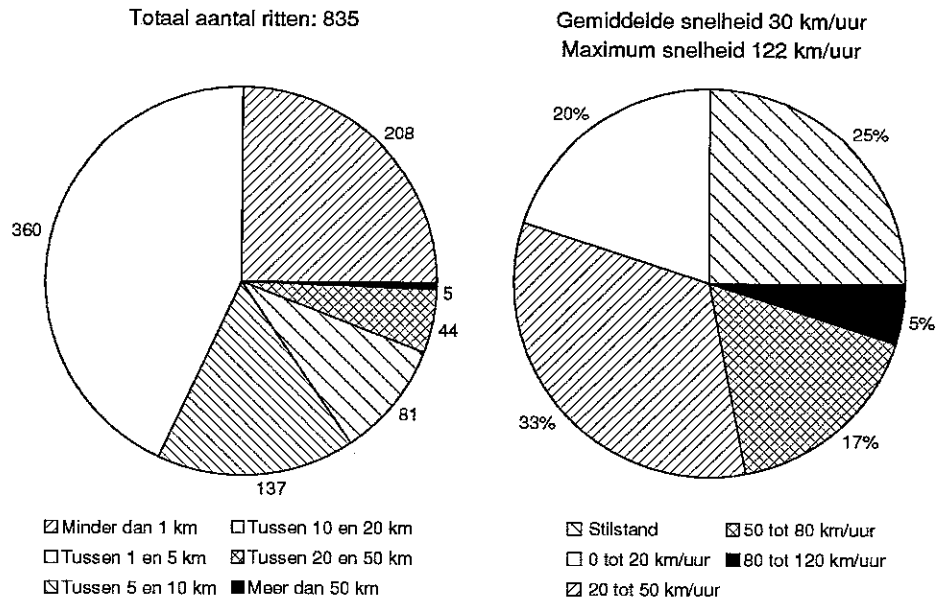
In de periode dat de auto in Amsterdam heeft gereden is de gemiddelde snelheid, zoals te verwachten, lager: 23 km/uur. De tijdsduur dat de snelheid lager is dan 20 km/uur is dan 56% van de gehele rijduur. De gemiddelde ritlengte ligt voor de Amsterdamse periode boven het gemiddelde: 6,3 km.

Tabel 7. Gereden afstanden

Periode	: 10/7 - 14/11
Totaal aantal dagen	: 128
Aantal gebruiksdagen	: 95
Totale afstand	: 4670 km
Gemiddelde afstand per rit	: 5,6 km
Gemiddelde afstand per gebruiksday	: 49 km
Maximale ritafstand	: 65 km
Maximale dagafstand	: 162 km

Tabel 8. Aantallen ritten

Periode	: 10/7 - 14/11
Totaal aantal ritten	: 835
Gemiddeld aantal ritten per dag	: 9
Maximaal aantal ritten per dag	: 34



Figuur 5. Ritlengteverdeling (linker afbeelding) en snelheidsverdeling (rechter afbeelding)

6.2.2. Netto energiegebruik

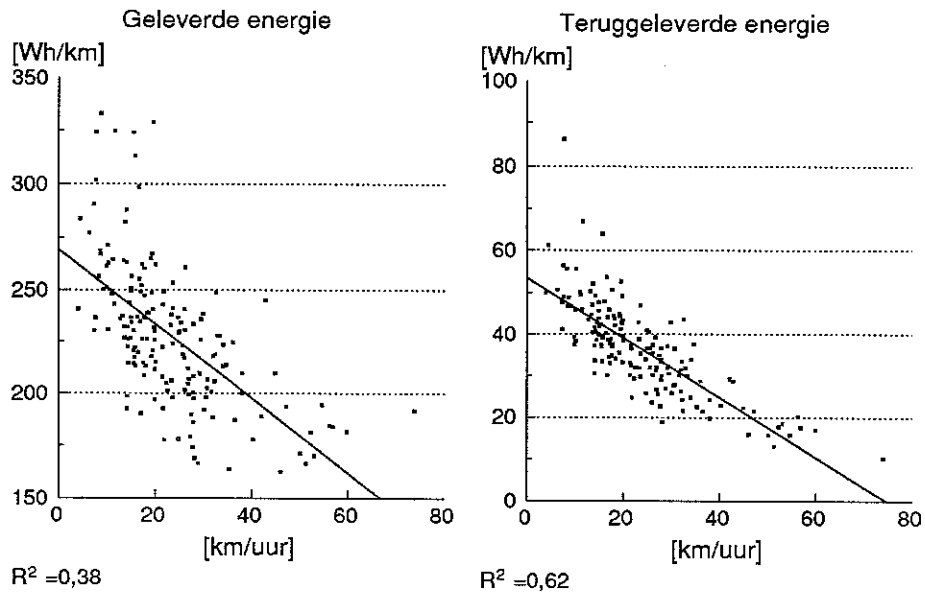
In het restant van deze paragraaf zijn alleen data uit de periode 30/9 t/m 14/11 gebruikt. Gedurende die periode heeft de auto voornamelijk in Amsterdam gereden. De getallen in de volgende tabel hebben betrekking op de energie die van de batterij naar de motor stroomt. Het gaat dus om het *netto* elektriciteitsverbruik (stromen 3 en 4 in figuur 4).

Tabel 9. Netto elektriciteitsverbruik

Gemiddelde ritwaarde afgegeven energie	: 209 Wh/km
Minimum ritwaarde afgegeven energie	: 163 Wh/km
Maximum ritwaarde afgegeven energie	: 302 Wh/km
Gemiddelde ritwaarde opgenomen energie	: 30 Wh/km
Minimum ritwaarde opgenomen energie	: 10 Wh/km
Maximum ritwaarde opgenomen energie	: 56 Wh/km
Netto verbruik met terugwinning remenergie	: 178 Wh/km

Uit deze tabel blijkt dat de terugwinning van remenergie aanzienlijk is, gemiddeld ruim 14% van de afgegeven energie. Dit is één van de factoren die het gebruik van elektrische auto's, met name in stadsverkeer, aantrekkelijk maakt. De terugwinning van remenergie is (vanzelfsprekend) sterk gecorreleerd met de tijdsduur per rit dat het rempedaal is ingedrukt. In totaal werd gedurende bijna 15% van de gereden afstand het rempedaal ingedrukt.

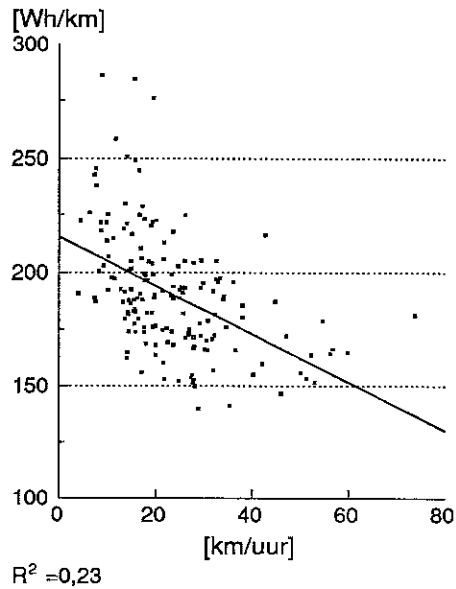
Zowel de afgegeven energie per kilometer als de opgenomen remenergie per kilometer blijken vrij sterk gecorreleerd te zijn met de gemiddelde snelheid: hoe lager de gemiddelde snelheid, des te hoger de afgegeven en opgenomen energie. Deze correlatie is onderzocht aan de hand van alle 167 ritten langer dan 1 km. Er is alleen gekeken naar lineaire verbanden. In figuur 6 zijn de uitkomsten per rit weergegeven en is lineaire regressie toegepast. De correlatiecoëfficiënt R^2 is tevens vermeld.



Figuur 6. Geleverde en teruggeleverde energie per kilometer als functie van de gemiddelde snelheid

Met name de teruggeleverde remenergie per kilometer is vrij sterk gecorreleerd met de gemiddelde snelheid. Lineaire regressie op de snelheidsverdeling geeft geen hogere correlatie dan de regressie alleen op de gemiddelde snelheid (de gemiddelde snelheid blijkt zeer sterk gecorreleerd te zijn met de tijdsduur dat de snelheid lager is dan 20 km/uur en nauwelijks gecorreleerd met de tijdsduur dat de snelheid tussen 20 en 50 of 50 en 80 km/uur ligt). Opgemerkt dient te worden dat er erg weinig ritten zijn met een hoge gemiddelde snelheid. Het geconstateerde lineaire verband mag niet zonder meer toegepast worden op hogere snelheden.

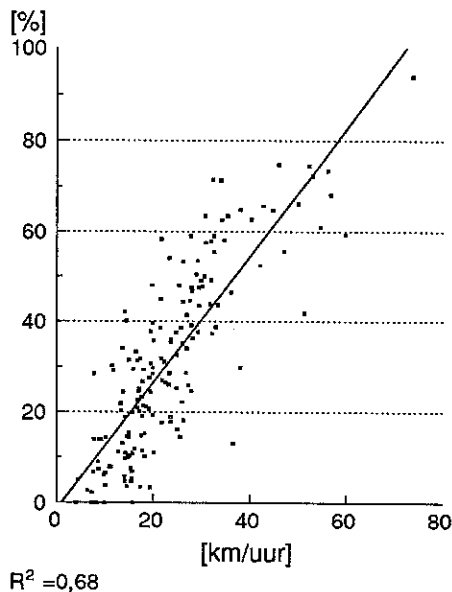
Het verband tussen het netto energiegebruik per kilometer, rekening houdend met terugwinning van remenergie, en de gemiddelde snelheid is weergegeven in figuur 7. Ook nu is er een lineair verband (de nulhypothese dat er geen lineair verband is wordt verworpen), maar het verband is duidelijk minder sterk. Ook nu geeft toevoeging van andere verklarende variabelen geen betere 'fit'. Opnieuw past de kanttekening dat er bijna geen ritten zijn met een hoge gemiddelde snelheid.



Figuur 7. Netto energiegebruik per kilometer als functie van de gemiddelde snelheid

6.2.3 Besturing van de motor

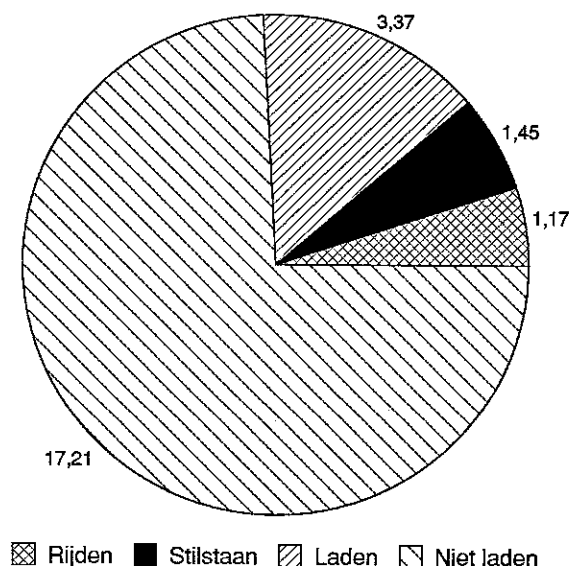
Ten aanzien van de besturing van de elektromotor is geregistreerd of er sprake is van 'veldmode' of 'ankermode'. In ankermode wordt de ankerstroom geregeld, in veldmode de veldstroom. Tijdens optrekken zal sprake zijn van ankermode, tijdens rijden met constante snelheid van veldmode. Om te komen tot een optimale besturing is het van belang te weten welk deel van de totale afstand in ankermode respectievelijk veldmode wordt afgelegd. In de periode 30/9 t/m 14/11 is 56,5% van de afstand afgelegd in ankermode, en 43,5% in veldmode. Het percentage gereden kilometers in veldmode is vrij sterk gecorreleerd met de gemiddelde snelheid: hoe hoger de gemiddelde snelheid, des te hoger de gereden afstand in veldmode. Dit verband is weergegeven in figuur 8.



Figuur 8. Percentage gereden kilometers in veldmode als functie van de gemiddelde snelheid

6.2.4. Bruto energiegebruik en oplaadtijden

In figuur 9 is weergegeven hoe de auto gebruikt is. Er zijn 3 mogelijkheden: er wordt gereden, de auto is aangesloten op het elektriciteitsnet, of geen van beiden. De periodes dat de auto is aangesloten op het elektriciteitsnet kan nog worden onderverdeeld in "laden" en "niet laden". Uit de figuur blijkt dat de auto gemiddeld bijna 21 uur per etmaal aan het stopcontact staat, terwijl de gemiddelde laadtijd per etmaal slechts ruim 3,5 uur is. Gegevens betreffende de opgeladen kWh's zijn weergegeven in tabel 10.



Figuur 9. Tijdsbesteding per etmaal in uren en minuten, gemiddeld over alle dagen (incl. weekends)

Tabel 10. Het opladen van de batterij

Opgeladen kWh tijdens plateau-uren	: 67%
Opgeladen kWh tijdens daluren	: 33%
Gemiddeld geladen per etmaal	: 11,6 kWh
Gemiddeld geladen tussen 7 en 23 uur op werkdagen	: 11,2 kWh
Gemiddeld geladen tussen 8 en 17 uur op werkdagen	: 6,9 kWh

Uit deze tabel blijkt dat twee derde van de benodigde elektriciteit wordt opgeladen tijdens plateau-uren. De opgeladen kWh's tijdens daluren komen vrijwel volledig voor rekening van het weekend. Op werkdagen wordt vrijwel alle elektriciteit opgeladen tijdens plateau-uren. Ook tijdens de gebruikelijke werktijden (8 tot 17 uur) wordt veel opgeladen. De oorzaak is reeds in paragraaf 5 vermeld: de gebruikers is geadviseerd om de auto zo veel mogelijk aan te sluiten op het net als er niet mee gereden wordt.

6.2.5. Bruto versus netto elektriciteitsverbruik; rendementen

In tabel 11 wordt een vergelijking gemaakt tussen het netto en het bruto elektriciteitsverbruik. Uit deze tabel blijkt dat slechts 48% van de elektriciteit uit het net wordt gebruikt voor het rijden, dus de 'verliezen' bedragen 52%. Dit is een vrij hoog verliespercentage, vooral gezien de eerder gedane constatering dat de elektrische auto het moet hebben van het gunstige rendement van de auto (om de verliezen bij de elektriciteitsopwekking te compenseren). De bepalende factor voor dit vrij lage percentage is het feit dat veel energie gebruikt wordt voor het warmhouden van de batterij. Het percentage kan dus verhoogd worden door de verwarmingsbehoefte te verlagen (betere isolatie van de batterij) en door zo veel mogelijk te rijden (zodat de warmhoudenergie over meer kilometers verdeeld wordt). Overigens is het gevonden percentage hoger dan het

verliespercentage van de Transporter in tabel 4. Enerzijds is dit het gevolg van het lagere gemiddelde dagkilometrage van de Jetta. Anderzijds heeft de Transporter een dubbele batterij met een navenant hoger warmhoudverbruik. De verliezen bij de Transporter zoals gemeld in tabel 5 lijken dus vrij laag. De gevonden waarden in tabel 5 zijn echter minder betrouwbaar dan de waarden in tabel 11.

Tabel 11. Netto versus bruto elektriciteitsverbruik

Netto verbruik met terugwinning remenergie:	178 Wh/km
Bruto onzuiver verbruik	: 372 Wh/km
Netto als percentage van bruto	: 48%

Ten aanzien van de vraag waar precies de verliezen optreden is geen volledig antwoord te geven. De verliezen in de elektrische aandrijving en regeling kunnen niet met het ritregistratiesysteem vastgesteld worden. Wel kan een indicatie gegeven worden van het warmhoudverbruik en de verliezen in het laadapparaat.

Ten aanzien van de verliezen in het laadapparaat zijn gedurende laadperiodes de stromen 1 en 2 in figuur 4 vergeleken. De gemiddelde efficiency (" $2/1$ ") bleek 78,7%³. Dit is aanzienlijk lager dan de efficiency van 90% of meer die dikwijls in de literatuur wordt genoemd (zie bijv. [9] en [12]). Evenals voor de warmhoudverliezen lijken op dit punt derhalve aanzienlijke verbeteringen mogelijk, waardoor het primair energiegebruik van elektrische auto's verder kan dalen.

Indien de batterij vol is en de auto nog wel aangesloten is op het elektriciteitsnet, komt de benodigde energie voor het warmhouden van de batterij rechtstreeks uit het stopcontact. De waarde van stroom "1" gedurende dergelijke periodes is derhalve een indicatie van het warmhoudvermogen. Over de gehele periode is de gemiddelde waarde voor het warmhoudvermogen 221 W⁴. De waarden per periode vertonen nogal wat uitschieters in beide richtingen (van 29 W tot 326 W). Rekening houdend met de verliezen in het laadapparaat betekent dit dat er 'netto' $221 \cdot 0,787 = 174$ W voor warmhouden nodig is.

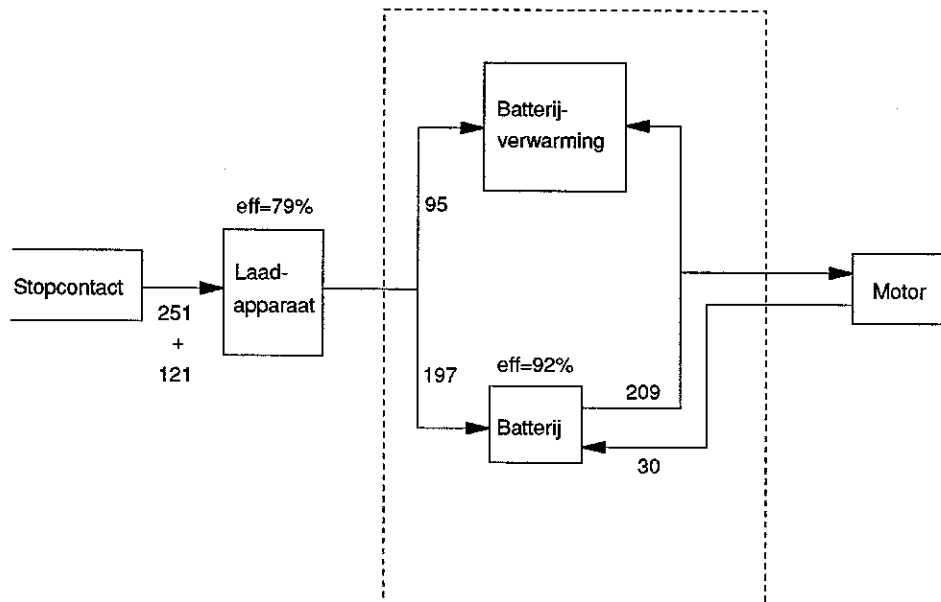
Uit de gevonden meetresultaten kan het gerealiseerde laad-ontlaad rendement van de batterij bepaald worden. Over de gehele periode gerekend heeft de auto gemiddeld 36,5 km/dag gereden. Indien het gevonden warmhoudvermogen van 221 W gedurende 20 uur per etmaal benodigd is, komt dat neer op 121 Wh/km. Van het bruto onzuiver verbruik van 372 Wh/km (zie tabel 11) blijft dus een bruto zuiver verbruik (d.w.z. puur voor het rijden) over van 251 Wh/km. "Achter" het laadapparaat is hier nog 197 Wh van over. Deze 197 Wh gaat de batterij in. Uit tabel 8 blijkt dat per km 209 Wh de batterij uit gaat, en 30 Wh/km de batterij in. Totaal gaat er dus $197 + 30$ de batterij in, en komt er 209 uit. De efficiency van de batterij is dus $209/227 = 92\%$. Dit komt vrij goed overeen met het rendement dat door ABB wordt opgegeven [12]. In figuur 10 zijn de grootte van de energiestromen en de rendementen weergegeven in het schema uit figuur 4.

Indien het warmhoudvermogen beperkt zou worden tot 90 W [7] en de efficiency van het laadapparaat 90% bedraagt, zou het bruto elektriciteitsverbruik bij het gegeven nettoverbruik, 274

³ Aangezien, zoals reeds eerder opgemerkt, de stroom die rechtstreeks uit het stopcontact naar de batterijverwarming gaat niet wordt gemeten, is " $2/1$ " slechts een benadering van de werkelijke efficiency: het gedeelte van de energie dat uit het laadapparaat komt en naar de batterijverwarming gaat wordt niet meegeteld. Dit leidt tot een onderschatting van de efficiency. Deze onderschatting zal klein zijn, aangezien tijdens laadperiodes veruit het grootste deel van energiestroom "1" naar de batterij zelf zal gaan.

⁴ Deze waarde is beduidend lager dan y-waarde in tabel 3 (paragraaf 4) voor deze Jetta nr. 8. Dit benadrukt eens te meer dat die y-waarde niet opgevat mag worden als een benadering van het warmhoudvermogen.

Wh/km bedragen, in plaats van het geregistreerde verbruik van 372 Wh/km. De verliezen, die volgens tabel 11 52% bedragen, zouden daarmee dalen tot 35%. Indien daarnaast het gemiddelde dagkilometrage wordt opgevoerd van 36,5 naar 60 km/dag, dan dalen de verliezen verder tot 30%.



Figuur 10. Energiestromen per kilometer en rendementen

Tot dusver is één verliespost niet genoemd. Indien de auto gedurende zeer lange tijd op het net is aangesloten, blijkt er om de 20 uur een kleine bijlading van ongeveer 1 kWh plaats te vinden. Er wordt echter geen uitgaande energiestroom ("3" in figuur 4) gemeten. Dit duidt op interne verliezen in de batterij, maar deze zijn bij de Na-S batterij verwaarloosbaar klein. Een mogelijke verklaring zou zijn dat er gedurende de stilstand een verbruik via de 12 V accu is. Deze accu wordt gevoed via de 'grote' batterij. Dit zou wel betekenen dat de energie van de grote batterij naar de 12 V accu niet in "3" vevat is. Het eigen verbruik van het ritregistratiesysteem is ongeveer 300 mili-ampère, via de 12 V accu, dus een vermogen van 3,6 W. Daarnaast is er nog het eigen verbruik, waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte, van de interface tussen sensoren en de boordcomputer. Dit verbruik is dus veel minder dan de 1 kWh per 20 uur. Het is dus niet met zekerheid te zeggen waar de bijladingen van 1 kWh voor nodig zijn.

