

CE

**Oplossingen voor
milieu, economie
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Accumateriaal verwerkt

Onderzoek naar de milieulast van
accu's voor elektrische en
hybride auto's

Rapport

Delft, december 2000

Opgesteld door: ir. B. Klimbie
ir. B. Kampman
drs. H. Croezen
H. van de Ploeg



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

Klimbie, ir. B., ir. B. Kampman, drs. H. Croezen, H. van de Ploeg
Accumateriaal verwerkt. Onderzoek naar de milieulast van accu's voor elektrische en hybride auto's
Delft: CE, 2000

Elektrische voertuigen / Accu's / Zware metalen / Toxiciteit / Productie / Consumptie / Milieu / Gezondheid / Effecten / Nikkel / Cadmium / Lithium / Regelgeving / Afvalinzameling / Afvalverwerking

Dit rapport kost f 27,50 (€ 12,48) (exclusief verzendkosten).
Publicatienummer: 00.4752.34

Verspreiding van CE-publicaties gebeurt door:

CE
Oude Delft 180
2611 HH Delft
Tel: 015-2150150
Fax: 015-2150151
E-mail: publicatie@ce.nl

Oprichtgever: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer
Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider ir. B. Klimbie

©copyright, CE, Delft

CE

Oplossingen voor milieu, economie en technologie

CE is een onafhankelijke onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

CE is onderverdeeld in vijf secties die zich richten op de volgende werkteerijnen:

- economie
- energie
- industrie
- materialen
- verkeer & vervoer

Van elk van deze secties is een publicatielijst beschikbaar. Geïnteresseerden kunnen deze opvragen bij CE tel: 015-2150150. De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: www.ce.nl

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	5
1.1 Achtergrond	5
1.2 Doel	5
1.3 Afbakening	5
2 De elektrische en hybride auto in 2005	7
2.1 Introductie	7
2.2 Welke elektrische en hybride auto's zijn er nu en in 2005 te koop?	8
2.3 Welke accu's in 2005?	10
2.3.1 Accu's voor de BEV	11
2.3.2 Accus voor de HEV	11
3 Gezondheid en regelgeving	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Zware metalen en andere gevaarlijke stoffen in accu's	13
3.3 Regelgeving	14
3.4 Vervoer van afgewerkte accu's	15
4 Recycling van accu's	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Loodzuur accu's	17
4.3 Nickel Cadmium Accu's	19
4.4 Nickel Metaalhydride Accu's	20
4.5 Lithium accu's	20
4.6 Emissies en energiegebruik recycling	21
5 Milieueffecten van elektrische en hybride voertuigen	23
5.1 Introductie	23
5.2 Volledig aangedreven voertuigen (BEV's)	23
5.3 Hybride voertuigen (HEV's)	24
5.4 Gevolgen accugebruik	25
5.4.1 Aantallen BEV en HEV in de nieuwverkoop	25
5.4.2 Inschatting accutechnologie.	26
5.4.3 Conclusie	26
6 Conclusies en aanbevelingen	29
6.1 Conclusies	29
6.2 Aanbevelingen	30
Literatuurlijst	31
A Eigenschappen en milieubelasting van accu's	35
B Financiële aspecten van elektrische en hybride auto's	39
C Emissies en energiegebruik accurecycling	41

Samenvatting

Elektrische auto's worden al langere tijd verkocht, de verkoop van hybride auto's in Nederland is pas net begonnen. Deze auto's hebben een 'schoon' imago, voornamelijk omdat ze in de stad emissievrij kunnen rijden, en omdat ze zuiniger zijn.

Het concept van de elektrische of hybride aandrijving heeft echter niet alleen voordelen. De energie die nodig is voor de verplaatsing van de auto wordt in accu's opgeslagen en juist deze accu's brengen nieuwe potentiële milieuproblemen met zich mee. Vrijwel alle accu types bevatten toxische zware metalen. Bij het maken, gebruiken en (her)verwerken van deze accu's kunnen deze metalen vrij komen en de gezondheid van de mens bedreigen. Zeker als de elektrische en hybride auto op grote schaal gebruikt gaan worden zou dit een nieuw milieuprobleem op kunnen leveren.

Het doel van dit onderzoek is daarom het beantwoorden van de vraag:

Is het gebruik van accu's in elektrische en hybride voertuigen een mogelijke bron van milieu- en gezondheidsproblemen?

Uit deze studie komt naar voren dat deze vraag ontkennend kan worden beantwoord.

Om tot dit antwoord te komen, is allereerst gekeken naar recente ontwikkelingen op het gebied van deze typen auto's en van de accu's die hiervoor gebruikt worden. Daarna zijn de gezondheids- en regelgevingsaspecten op een rij gezet, en is de stand van zaken bij het inzamelen, verwerken en hergebruiken van de accumaterialen vastgesteld. Uiteindelijk zijn aanbevelingen opgesteld die uit deze studie naar voren zijn gekomen. Het zichtjaar voor deze studie is 2005.

De beschikbare auto's en hun accu's

Er wordt op veel fronten aan de ontwikkeling van volledig elektrische voertuigen (BEV's) en hybride elektrische voertuigen (HEV's) gewerkt. Desondanks is niet te verwachten dat de BEV de komende jaren de nichemarkt ontgroeit, omdat de beschikbare accutypes een door het grote publiek acceptabel geachte actieradius niet mogelijk maken. De verwachting is dat in 2005 de meeste BEV's voorzien zijn van een loodaccupakket, vanwege de relatief lage kosten.

De HEV zal daarentegen op langere termijn wel een concurrent kunnen worden voor de auto met alleen een interne verbrandingsmotor. De huidige korting op de Belasting voor Personenauto's en Motoren en de lagere energiekosten zorgen voor een economisch acceptabele exploitatie.

De verwachting is, dat in 2005 de meeste HEV's zijn voorzien van een NiMh accupakket, vanwege de technisch goede prestaties en het ophanden zijnde verbod van NiCd accu's.

Daarnaast bieden lithium accu's goede perspectieven maar deze zijn vooralsnog niet commercieel verkrijgbaar. In 2005 zullen ze daarom naar alle waarschijnlijkheid nog geen noemenswaardig marktaandeel hebben.

Gezondheid en het milieu

De twee meest schadelijke accutypes zijn de loodzuur accu en de NiCd. De loodzuuraccu vanwege het lood, het antimoon en het arseen dat vrijkomt bij de recycling; de NiCd vanwege de het element cadmium.

De mogelijke schade voor de gezondheid ontstaat overigens alleen bij de productie en de recycling. Tijdens de gebruiksfase leveren geen van de onderzochte accutype gevaren op.

Regelgeving

De beschouwde accu's vallen onder het Meerjarenplan Gevaarlijk Afval II, en moeten gescheiden worden ingezameld en verwerkt. Over enkele jaren wordt verwacht, dat de Europese regelgeving aangescherpt wordt, waarmee het gebruik van zware metalen in batterijen aan banden wordt gelegd of zelf verboden word.

De accu-inzameling

Door de hoge waarde van lood is het commercieel aantrekkelijk om loodzuur accu's in te zamelen en te verwerken. Mede daardoor verloopt de inzameling goed. Vanwege de toxiciteit van het gebruikte cadmium worden vrijwel 100% van de afgedankte NiCd accu's ingezameld. De NiMh accu's bevatten weliswaar nikkel, maar zijn niet allemaal voorzien van dezelfde metalen in de elektroden, wat herverwerking moeilijk maakt.

De accuverwerking

In Nederland hebben we geen accuverwerkende industrie. De in Nederland gebruikte loodzuuraccu's worden verwerkt in België en Frankrijk. Er zijn nog weinig gegevens beschikbaar over de feitelijke emissies die plaats vinden bij de bedrijven die deze accu's verwerken. Wel zijn er sterke aanwijzingen dat de kwaliteit van de milieuzorg en van de emissies sterk verschilt tussen de verschillende verwerkers.

Nederlandse NiCd accu's worden in Frankrijk en Zweden verwerkt. Zowel het nikkel als ook het cadmium wordt daar hergebruikt.

De NiMh accu's zijn nog sterk in ontwikkeling, waardoor verschillende fabrikanten nog verschillende metalen in hun elektroden verwerken. Dat maakt uniforme verwerking van de hydride-elektrode onmogelijk.

Milieu en gezondheidsschade door gebruik BEV en HEV in 2005

Naar verwachting is in 2005 0,2 procent van de nieuwverkoop een BEV. De meeste hiervan beschikken dan over een loodzuuraccu. De hoeveelheid extra loodzuuraccu's die hierdoor in omloop komen is echter zo gering dat dit geen reden is tot aanvullend beleid.

De HEV heeft een geschatte penetratie van 0,8 procent van de nieuwverkoop en is voornamelijk uitgerust met een NiMh accupakket. Deze accu's zijn relatief milieuvriendelijk, al bevatten ze ook het zware metaal nikkel. De verwerking kan problemen opleveren omdat fabrikanten verschillende materialen in hun elektrodes verwerken. Het is daarom moeilijk om de inzameling en herverwerking van deze accu's te voorspellen.

Aanbevelingen

Voor het transport van accu's is een vergunning nodig. Het is in principe mogelijk om alleen vergunningen te verstrekken aan transporten die gaan naar bedrijven die voldoen aan lage emissie-eisen en 'good-housekeeping'. Hiervoor zou een monitorings- of controlesysteem moeten worden opgezet, liefst in Europees verband.

Er zijn inmiddels goede alternatieven voor NiCd accu's in elektrische voertuigen op de markt, toepassing zou daarom ontmoedigd kunnen worden.



Men zou ook kunnen denken aan registratie van deze accu's, om de inzameling en verwerking beter te kunnen controleren.

Om een betere verwerking van NiMh accu's mogelijk te maken, zou de overheid leveranciers van deze accu's kunnen verplichten om ze terug te nemen en voor de verwerking zorg te laten dragen. Hierdoor worden de 'stromen' van de verschillende soorten NiMh-accu dikker en zal een efficiënte verwerking makkelijker zijn.



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Energiebesparing in het verkeer en vervoer is lastig. Ondanks de toenemende efficiëntie van automotoren, is het verbruik per auto de afgelopen jaren vrijwel gelijk gebleven. Een belangrijke oorzaak hiervan is het alsnog toenemende gewicht van auto's. Het totale energiegebruik van het wegverkeer stijgt zelfs vanwege de groei van het autoverkeer.

Een grote stap voorwaarts in de efficiëntie van de autoaandrijving kan worden bereikt door deze niet alléén uit te rusten met een verbrandingsmotor. Hiervoor zijn op dit moment twee opties op de markt: de volledig elektrische en de hybride auto. Beiden hebben een hoger totaalrendement als het gaat om de omzetting van brandstof¹ in beweging.

Naast het voordeel van de toenemende efficiëntie bieden deze types aandrijvingen ook de mogelijkheid om (eventueel tijdelijk) emissieloos te rijden. Met name dit voordeel maakt ze zeer geschikt voor het gebruik in binnensteden, waar een verslechtering van de luchtkwaliteit ernstige gevolgen voor de gezondheid kan hebben.

Het concept van de elektrische of hybride aandrijving heeft echter niet alleen voordelen. De energie die nodig is voor de verplaatsing van de auto wordt in accu's opgeslagen en juist deze accu's brengen nieuwe potentiële milieuproblemen met zich mee.

Vrijwel alle accu types bevatten toxische zware metalen. Bij het maken, gebruiken en (her)verwerken van deze accu's kunnen deze metalen vrij komen en de gezondheid van de mens bedreigen. Zeker als de elektrische en hybride auto op grote schaal gebruikt gaan worden zou dit een nieuw milieuprobleem op kunnen leveren.

De Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat heeft het CE gevraagd om te onderzoeken hoe groot dit mogelijke probleem is.

1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is het beantwoorden van de vraag:

Is het gebruik van accu's in elektrische en hybride voertuigen een mogelijke bron van milieu- en gezondheidsproblemen?

1.3 Afbakening

Zichtjaar

Op dit moment begint de eerste verkoop van hybride auto's, elektrische auto's zijn al langer commercieel te verkrijgen. De hoeveelheden auto's die nu

¹ Met brandstof wordt in het geval van de puur elektrische auto de brandstof van de elektriciteitscentrale bedoeld.

worden afgezet zijn nog te klein om een potentieel milieurisico te vormen. Wel ligt het in de lijn der verwachting dat deze voertuigen de komende jaren snel hun intrede zullen doen in het Nederlandse wagenpark, omdat ze zuiniger zijn en dat een steeds belangrijker item wordt.

Het aanbod van elektrische en hybride auto's is nog in ontwikkeling. Hierdoor is het moeilijk om een uitspraak te doen over de mogelijke gevolgen voor mens en milieu van het gebruik van deze voertuigen in de verre toekomst.

Het zichtjaar dat daarom voor deze studie is gekozen is 2005. Dit is ver genoeg weg om nog een redelijke penetratie van deze voertuigen in de markt te krijgen maar ook nog dicht genoeg bij om een redelijk zekere uitspraak te kunnen doen over welke accu's dan zullen worden gebruikt.

Er wordt gekeken naar de accu's van elektrische en hybride auto's die worden verkocht in het jaar 2005 en wat de invloed van die accu's is op de gezondheid en het milieu.

Geen energiehuishouding

In dit onderzoek wordt niet gekeken naar de emissies die vrij komen tijdens de gebruiksfase van de elektrische en hybride auto's. De focus ligt op de gezondheidsaspecten van het gebruik en herverwerking van de accu's.

Veiligheid

Elektrisch aangedreven auto's hebben grote accupakketten nodig om in hun energiebehoefte te kunnen voorzien. Dit maakt dergelijke voertuigen zwaar en de kans dat bij een botsing de accupakketten openbreken neemt toe in vergelijking met een conventionele auto. In dit rapport is de verkeersveiligheid echter geen onderwerp van studie.



2 De elektrische en hybride auto in 2005

2.1 Introductie

Elektrische en hybride elektrische auto's zijn op dit moment nog volop in ontwikkeling. Steeds meer autofabrikanten brengen elektrische of hybride auto's op de markt, presenteren prototypes of melden bezig te zijn met ontwikkeling van nieuwe voertuigen die de komende jaren verwacht kunnen worden. De ontwikkelingen hebben ook betrekking op de milieueffecten van de voertuigen, bijvoorbeeld op de gebruikte accumaterialen, het voertuiggewicht of de zuinigheid.

Voor deze studie hebben we daarom allereerst gekeken naar het huidige aanbod van elektrische en hybride voertuigen. Vervolgens hebben we de ontwikkelingen in accu- en voertuigtechnologie in kaart gebracht. Hieruit hebben we een verwachting voor 2005 gedestilleerd voor de typen en eigenschappen van de accu's en voertuigen die omstreeks dat jaar in deze sector zullen worden verkocht.

Hoewel elektrische en hybride auto's bepaalde overeenkomsten hebben, zijn de verschillen zodanig dat we ze vaak apart zullen behandelen. Beide voertuigen hebben specifieke voor- en nadelen ten opzichte van elkaar en ten opzichte van voertuigen met alleen een verbrandingsmotor. Om verwarring te voorkomen, zullen we de volgende gangbare definities gebruiken:

BEV (battery electric vehicle)

Volledig elektrisch aangedreven voertuigen die hun energie in batterijen hebben opgeslagen.

HEV (hybrid electric vehicle)

Hybride voertuigen, die zowel door een verbrandingsmotor als ook door de energie die in een accu is opgeslagen (deels) kunnen worden aangedreven. In *seriehybride* uitvoering is, naast een accu, een (kleine) verbrandingsmotor toegevoegd om een elektromotor aandrijven, bij *parallelhybride* aandrijving worden de wielen ofwel direct door de verbrandingsmotor aangedreven, ofwel door een accu met elektromotor².

In dit hoofdstuk zullen we een kort overzicht van de status van de ontwikkeling van deze voertuigen geven. We zullen daarbij speciale aandacht geven aan de accu's die in deze voertuigen worden toegepast, omdat zij een potentieel milieurisico vormen vanwege de vaak schadelijke stoffen die erin verwerkt zijn, en de vaak beperkte levensduur. In hoofdstuk 4 zullen we de milieuaspecten van de verschillende accu's voor elektrische en hybride voertuigen in meer detail bespreken.

Het onderzoek naar accu's voor voertuigen is nog in volle gang, waardoor deze studie ook een enigszins verkennend karakter heeft gekregen.

Allereerst worden daarom in de volgende paragraaf de verschillende soorten elektrische en hybride voertuigen besproken die op dit moment op de markt zijn. Uit de recente ontwikkelingen zullen we een voorspelling van de markt

² De scheiding tussen parallel en serieel wordt steeds vager. De Toyota Prius is zo uitgevoerd dat deze zowel parallel als serieel kan werken.

in 2005 destilleren. In paragraaf 2.3 worden de financiële aspecten van deze voertuigen besproken, met name de meerkosten bij aanschaf, en de vrijstelling van heffingen zoals BPM en MRB.

2.2 Welke elektrische en hybride auto's zijn er nu en in 2005 te koop?

Ondanks dat elektrische auto's al een lange geschiedenis kennen die zelfs teruggaan tot vóór 1900, is het marktaandeel en de groei nog zeer beperkt gebleven. De huidige verwachting is dat de toepassing van BEV's zich voornamelijk zal beperken tot nichetoeepassingen. Ondanks een aantal voordelen van deze voertuigen, zoals lage emissies in stedelijk gebied en een laag geluidsniveau, zullen een aantal knelpunten moeten worden overwonnen om een groter marktaandeel te bereiken [TNO, 1997]:

- De hogere aanschafprijs (ongeveer een factor 3 hoger dan vergelijkbare conventionele voertuigen).
- De lagere vermogens bij een vaak hoger voertuiggewicht.
- De kleiner actieradius.

Zowel het lage vermogen, het hoge voertuiggewicht en de beperkte actieradius worden veroorzaakt door de relatief lage energiedichtheid van de beschikbare accu's - benzine of diesel zijn aanzienlijk efficiëntere vormen van energieopslag. De hoge aanschafprijs wordt ook voor een groot deel door de dure accu's veroorzaakt, als is de verwachting dat het prijsverschil met conventionele auto's kan dalen tot zo'n 20-25% bij grootschaligere productie van de voertuigen.

Hybride auto's zijn pas zeer recent op de markt gekomen, maar worden gezien als een kansrijk alternatief voor conventionele voertuigen. De potentiële brandstofbesparing en de mogelijkheid om in stedelijk gebied emissievrij te rijden worden in deze voertuigen gecombineerd met een (relatief zeer) grote actieradius en goede rij eigenschappen. Steeds meer autofabrikanten zijn daarom bezig met de ontwikkeling van prototypen en 'concept-cars' om ervaring met hybride aandrijvingen op te doen, en deze te optimaliseren.

Een technische innovatie die een kanshebber is op de hybride markt, is de Integrated Starter Alternator Damper (ISAD). Dit is een combinatie van een dynamo, startmotor en vliegwiel in een. Fysiek bestaat dit apparaat uit een grote elektromotor die op de krukas wordt bevestigd. Deze motor kan ook als generator dienst doen en wordt gebruikt bij het leveren van kort piekvermogen en lage langer durende vermogens.

Onder andere de Honda Insight is hiermee uitgerust.

In Tabel 1 en Tabel 2 zijn (onvolledige) overzichten gegeven van elektrische en hybride voertuigen die op dit moment te koop zijn, of die door autofabrikanten zijn gepresenteerd als prototype of conceptvoertuig. Zover mogelijk zijn ook de gegevens van de toegepaste accu's toegevoegd. Deze lijst is weliswaar niet compleet – vooral op het gebied van elektrische voertuigen zijn een groot aantal omgebouwde (zogenaamde 'converted') auto's op de markt - maar geeft toch een beeld van deze sectoren op dit moment en in de komende jaren.



Tabel 1 Lijst met de nieuwste typen elektrische voertuigen, op dit moment te koop of door de autofabrikanten gepresenteerd als testvoertuigen voor nieuwe technologie, zgn. 'concept cars'.

Merk	Type	Accu	Actieradius	Eigen- schappen	Status
General Motors	EV1 (2-persoons)	loodzuur optie: NiMh	loodzuur: 100- 150 km NiMh: >160 km		sinds 1996 te koop in de VS
Toyota	RAV4-EV (sport-utility vehicle)	NiMh	tot 200 km		sinds 1996 in Japan, sinds 1997 in VS te koop
Toyota	e-com (2-persoons)	NiMh			
Ford	Ranger EV (pick-up truck)	loodzuur optie: NiMh	loodzuur: 80 km NiMh: 130 km		
Crysler	EPIC (minivan)	NiMh	130 km	60 Wh/kg	
Peugeot	106 electrique	NiCd			in Duitsland te koop
Citroen	Saxo electrique				in Duitsland te koop
Fiat	Cinquecento Sol				in Duitsland te koop
Renault	Kangoo				in Duitsland te koop
Honda	EV Plus	NiMh	tot 200 km		sinds 1997 in VS
Concept-cars en prototypes, niet te koop					
Ford	e-Ka	Li-ion	150-200 km	280 kg 28 kWh	'technology test bed'
General Motors	Triax				concept-car
Mitsubishi	MEEV-II (2p-stadsauto)	Li-ion	tot 145 km	laden: 4,5 uur	concept-car

Tabel 2 Lijst met de nieuwste typen hybride voertuigen, op dit moment te koop of door de autofabrikanten gepresenteerd als testvoertuigen voor nieuwe technologie, zgn. 'concept cars'.

Merk	Type	Serie/ parallel	Accu	Accu- eigenschappen	Verbran- dingsmo- tor	Status
Toyota	Prius	parallel	NiMh	60 kg	Benzine 4 cilinder 1,5 liter	Japan: 35.000 stuks verkocht. VS: sinds 1996 te koop. Nederland: vanaf mid oktober '00.
Honda	Insight		NiMh		Benzine 3-cilinder 1 liter	te koop in VS
Test-voertuigen, in ontwikkeling – niet te koop						
Audi	Duo	parallel	loodzuur	330 kg 10 kWh 50 km elektrisch	Diesel 4 cilinder 1,9 liter TDI 66 kW	Testvoertuig, o.a. een aantal in Nederland. Accu's moeten worden opgela- den
Daim- ler- Crysler	ESX3					
Ford	Maverick				benzine	in ontwikkeling, productierijp in 2003

2.3 Welke accu's in 2005?

Het zichtjaar voor deze studie is 2005. Binnen deze termijn van 5 jaar verwachten we niet dat nieuwe accusoorten in grote aantallen op de markt komen, vanwege de over het algemeen grote onderzoeks- en ontwikkelingsinspanningen die daarvoor nodig zijn. We voorzien daarom, dat de huidige ontwikkelingen voldoende zicht bieden op wat er over 5 jaar zal gebeuren.

Zoals blijkt uit bovenstaande tabellen zijn nieuwe voertuigen die op dit moment op de markt komen voornamelijk uitgerust met loodzuur en NiMh accu's, een klein aandeel maakt gebruik van NiCd accu's. De huidige prototypen en concept-cars zijn voornamelijk uitgerust met Li-ion accu's. De verwachtingen van deze accu's zijn hoog maar ze leveren op dit moment nog niet voldoende prestaties om als tractieaccu te dienen. Er wordt echter goede voortgang geboekt op het gebied van Li-accu's, en de algemene verwachting is dan ook, dat deze accu's op termijn een groot marktaandeel zullen verwerven.

Elektrische en hybride voertuigen maken op verschillende manieren gebruik van accu's, het is daarom goed mogelijk dat in beide typen voertuigen verschillende typen accu's zullen worden toegepast. We zullen de accu's voor deze twee typen voertuigen kort apart bespreken. Een uitgebreide beschrijving van de eigenschappen van de verschillende accu's is gegeven in Bijlage A.



2.3.1 Accu's voor de BEV

Specificaties

De prestaties van elektrisch aangedreven voertuigen worden vrijwel geheel bepaald door de eigenschappen van de gebruikte accu: de kosten, actieradius, rijgedrag zoals acceleratievermogen en topsnelheid, en laadeigenschappen bepalen voornamelijk de kwaliteit van het voertuig.

De accu's in BEV's moeten daarom een zo groot mogelijke energie-inhoud hebben om een redelijke actieradius te leveren, voldoende vermogen kunnen leveren, goede laadeigenschappen en een lange levensduur hebben. Een grotere specifieke energiedichtheid heeft een gewichtsbesparing tot gevolg, waardoor de rijprestaties verbeteren en de actieradius vergroot. Vanwege de efficiëntere conversie van elektrische energie naar kinetische energie hoeft de energiedichtheid niet zo groot te zijn als bij een auto met verbrandingsmotor: terwijl de specifieke energie van een verbrandingsmotor zo'n 11.700 Wh/kg bedraagt, kan een klein elektrisch voertuig een vergelijkbare prestatie geven met ongeveer 200 Wh/kg [Cleaner Vehicles Task Force, 2000]. De levensduur is voornamelijk belangrijk uit kosten oogpunt.

Accutypes

Een groot aantal elektrische voertuigen is op dit moment uitgerust met loodzuur accu's. De energie-inhoud van deze accu's is weliswaar beperkt, ze zijn echter wel goedkoper dan de meer geavanceerde accu's. De prestaties zijn voor een aantal (stads)toepassingen voldoende, zodat we verwachten dat vanwege het kostenvoordeel de loodzuuraccu ook in 2005 nog een rol zal spelen. De NiCd accu heeft een hogere energie-inhoud, maar slechtere laadeigenschappen. Bovendien is het toegepaste Cadmium zeer schadelijk voor milieu en gezondheid (zie volgende hoofdstuk). Vanwege de opkomst van de milieuvriendelijkere NiMh-accu's verwachten wij dat het aandeel NiCd's de komende jaren sterk zal teruglopen. Li-ion accu's worden al wel in concept-cars toegepast, maar het is nog maar de vraag of de prestaties (met name de levensduur) en de prijs van deze accu's de komende jaren zodanig zal verbeteren dat zij daadwerkelijk al in volledig aangedreven elektrische auto's zullen worden toegepast. Gezien de grote inspanningen op het gebied van onderzoek en ontwikkeling van deze accu's, ook voor tractietoepassingen, is een technische doorbraak de komende jaren weliswaar niet uit te sluiten, maar moeilijk te voorspellen.

Samenvattend verwachten wij dat de elektrische auto's in 2005 voornamelijk zullen worden aangedreven m.b.v. loodzuur en NiMh accu's, met misschien nog een klein aandeel NiCd's en een kleine kans op een doorbraak voor de lithiumaccu's.

2.3.2 Accus voor de HEV

Specificaties

In hybride voertuigen worden de accu's op een andere manier gebruikt, waardoor zij ook aan andere specificaties moeten voldoen. Bij deze voertuigen kan de energie-inhoud van de accu beperkt blijven omdat de verbrandingsmotor de actieradius kan vergroten. Afhankelijk van het gebruikte aandrijfsysteem kunnen de accu's worden gebruikt om emissievrij te rijden in de stad, om remenergie op te slaan ('regeneratief remmen') en/of om kortstondig de (kleine) verbrandingsmotor te ondersteunen, bijvoorbeeld bij een sterke acceleratie. De benodigde componenten en regelsystemen van hybride voertuigen zijn nog volop in ontwikkeling, en worden op dit moment

door een groot aantal autofabrikanten ontwikkeld en getest, een aantal modellen zijn sinds kort als serievoertuigen verkrijgbaar.

Aanvankelijk werden hybride voertuigen voornamelijk ontworpen om de mogelijkheden van conventionele auto's te koppelen aan het grote voordeel van elektrische auto's, namelijk om emissievrij te rijden in stedelijk gebied. Dit resulteerde in een *parallel hybride aandrijving*, waarmee zowel een verbrandingsmotor het voertuig kan aandrijven, óf kan worden overgeschakeld op een volledig elektrische aandrijving. Dit concept leidt echter (op dit moment nog) tot een zwaar voertuig, met slechte prestaties in elektrische mode. De accu's van deze voertuigen moeten eigenschappen hebben die vergelijkbaar zijn aan die voor BEV's, al kan de totale energie-inhoud aanzienlijk kleiner zijn omdat de verbrandingsmotor voor een grotere actieradius kan zorgen.

De afgelopen jaren richt de ontwikkeling zich voornamelijk op een ander systeem, de *seriehybride aandrijving*. Hierin wordt de aandrijving verzorgd door een elektromotor, die zowel door een (kleine) verbrandingsmotor als ook door energie opgeslagen in een accu kan worden gevoed. Bij lage snelheden kan volledig elektrisch (op de accu) worden gereden, bij hogere snelheden kan de verbrandingsmotor het overnemen. Bij sterke acceleratie kan een regelsysteem ervoor zorgen dat beide energievoorzieningen worden gebruikt.

Voor beide soorten hybride auto's moet de accu geoptimaliseerd zijn voor de volgende taken:

- Bij afremmen van het voertuig kan de remenergie opgeslagen worden.
- De accu's moeten een hoog specifiek vermogen kunnen leveren

De energiecapaciteit kan aanzienlijk kleiner zijn dan bij volledig elektrische auto's. Daarnaast spelen ook bij deze auto's de kosten van de accu een rol.

Accutypes

Uit Tabel 2 blijkt, dat de twee hybride auto's die op dit moment op de markt zijn (de Toyota Prius en de Honda Insight) met NiMh accu's zijn toegerust. Alleen de Audi Duo, een testvoertuig, heeft loodzuuraccu's aan boord. De hogere kosten van NiMh accu's spelen bij deze voertuigen een kleinere rol dan bij de elektrische auto's omdat de hoeveelheid accu's beperkter is. Daarnaast is zowel de specifieke energie als ook het vermogen van de NiMh accu's hoger dan bij loodzuuraccu's, wat de prestaties van de hybride ten goede komt. Ook bij deze voertuigen lijkt de Lithiumaccu een goed alternatief voor de langere termijn, afhankelijk van de ontwikkelingen. In 2005 gaan wij er daarom vanuit dat voornamelijk NiMh-accu's worden toegepast, en dat er een kans is dat Lithiumaccu's doorbreken.



3 Gezondheid en regelgeving

3.1 Inleiding

Er zijn een groot aantal verschillende accu's op de markt, met ieder hun specifieke eigenschappen. Uit het vorige hoofdstuk blijkt, dat we ons in het kader van deze studie kunnen beperken tot 4 soorten accu's:

- de loodzuuraccu;
- de nikkel cadmium accu;
- de nikkel metaalhydride accu;
- de lithium-accu.

In Bijlage A is een gedetailleerde beschrijving gegeven van de eigenschappen van de verschillende soorten accu's.

Een nadeel van accu's is dat zij vaak zware metalen of andere gevaarlijke stoffen bevatten, en zo risico's voor het milieu en de gezondheid met zich meebrengen. Het in loodzuur accu's toegepaste lood, bijvoorbeeld, is neurotoxisch en leidt bij mensen tot verminderde hersenfuncties en gedragsproblemen, zelfs bij lage concentraties in het bloed. Dit was ook de voornaamste reden om in de jaren '80 loodhoudende benzine uit te faseren³.

In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de gezondheidseffecten die de verschillende stoffen uit de accu's hebben. Daarna wordt de bestaande regelgeving m.b.t. de verwerking van accu's beschreven en ten slotte wordt de verwerking zelf beschreven.

3.2 Zware metalen en andere gevaarlijke stoffen in accu's

Een groot gedeelte van loodzuur accu's bestaat uit lood, een zwaar metaal dat bij mensen leidt tot verminderde hersenfuncties en gedragsproblemen, als het in de bloedbaan komt. Het verbod op loodhoudende benzine (begin jaren '90) en het vervangen van loden drinkwaterleidingen heeft de afgelopen decennia geleid tot een sterke reductie van de loodemissies, waardoor de lichaamsbelasting met lood evenredig afgenomen is (75% over de afgelopen 20 jaar) [RIVM, 1998].

Zolang het lood in de accu opgesloten zit, levert het geen risico op. Bij loodproductie, verwerking en recycling kunnen echter wel loodemissies optreden. Lave et al. [Lave et al., 1995] schat voor de Verenigde Staten, dat tijdens de productie ongeveer 4% van het lood in het milieu vrijkomt, en tijdens herverwerking en recycling nog eens 2%⁴. Een groot gedeelte van deze emissies worden als afval gestort, ca. 15% ervan wordt in de lucht geëmitteerd. Uit deze gegevens volgt dat de gemiddelde lood-uitstoot van

³ Die uitfasering is bereikt door een accijnsverschil tussen gelode en ongelode benzine, sinds kort is loodhoudende benzine in Nederland verboden.

⁴ Uit een studie van de EPA (Environmental Protection Agency) blijkt dat maar liefst 12% van het lood als luchtmissie verspreidde, voordat de regelgeving werd aangescherpt [Lave, 1995].

elektrische voertuigen met loodaccu's 60 maal zo groot is dan bij vergelijkbare voertuigen die op *loodhoudende* benzine rijden [Lave 1995].⁵

Het loodzuur, de vloeibare elektrolyt in loodzuur accu's bestaat voor 15-35% uit zwavelzuur waarin loodverbindingen zijn opgelost [Afvalstoffengids].

Nikkel Cadmium accu's bevatten het zware metaal cadmium, dat zich opheeft in de bovenlaag van de bodem en in waterbodems. Onder bepaalde omstandigheden kan het cadmium dan vrij eenvoudig "mobiliseren" (loskomen), worden opgenomen in (voedings)gewassen en zo in de voedselketen terecht komen [RIVM].

Acute blootstelling middels van cadmium inademing leidt bij hoge doses tot beschadiging van de luchtwegen. Bij chronische blootstelling via lucht of water treedt schade aan de nieren en lever op. Chronische blootstelling kan verder leiden tot impotentie en tot aantasting van botten bij foetussen. Er is de verdenking dat cadmium carcinogeen is.

NiCd en NiMh accu's bevatten daarnaast het schadelijke nikkel. Acute blootstelling aan hoge doses nikkel leidt tot beschadigingen aan lever, nieren, bijniere, hersenen en milt. Chronische blootstelling leidt tot aantasting van neus en luchtwegen (astma, beschadigingen aan sinussen en neusschot). Nikkel veroorzaakt waarschijnlijk kanker in longen en neus.

Een nadeel van lithium is dat het kan exploderen als het in contact met water komt. Deze risico's zijn vergelijkbaar met de risico's van LPG tanks [pers. comm. Den Herder].

3.3 Regelgeving

Recycling of gecontroleerd storten zijn essentieel om de bovenstaande risico's te verminderen. De Europese Commissie (DG-XI) is daarom in overleg met de batterijfabrikanten, om het gebruik van zware metalen in batterijen aan banden te leggen, of zelfs te verbieden. De EC is daarnaast ook aan het onderzoeken in hoeverre de wetgeving kan worden aangepast zodat het aandeel gerecyclede batterijen en accu's kan worden verhoogd. De verwachting is, dat over enkele jaren nieuwe wetgeving van kracht komt.

Het Nederlandse beleid op het gebied van gevaarlijke afvalstoffen is uiteengezet in het Meerjarenplan Gevaarlijk Afval II (MJP-GA II, voor de jaren 1997-2007), dat ook de sectoren loodaccu's en batterijen bevat. Hierin is voor loodaccu's beschreven hoe de inzameling te werk gaat, en wat de eisen zijn voor de verwerking van oude accu's. Een vergelijkbare beschrijving is ook voor de sector batterijen opgenomen, die echter alleen op batterijen lichter dan 1 kg van toepassing is. Zowel accu's als batterijen moeten gescheiden worden ingezameld, en worden vervolgens door inzamelingsbedrijven naar recycling- of opslagbedrijven vervoerd.

Voor het inzamelen of bewaren van loodaccu's is een vergunning vereist en moeten meldingen worden gedaan omtrent de hoeveelheden. Het besluit stortverbod afvalstoffen verbiedt sinds 1 januari 1996 het storten van deze accu's, voor zover zij afzonderlijk zijn ingezameld of afgegeven.

⁵ Deze uitstoot vindt plaats in en rond de productie-, verwerkings- en recyclingbedrijven terwijl de looduitstoot van de conventionele voertuigen veel meer verspreid is, en voor een groot gedeelte binnen de bebouwde kom.



Vanwege het cadmium komt er mogelijk een verbod op NiCd-accu's voor toepassingen waarvoor alternatieve accutypen beschikbaar zijn. Dit betreft met name snoerloos gereedschap. Een algemeen EU verbod NiCd accu's is moeilijk haalbaar, met name vanwege hun toepassing in vliegtuigen. NiCd accu's vallen buiten het Cadmium-besluit van 1999.

Verder valt te verwachten dat voor accuhoudende producten in de toekomst zal worden geëist dat de producent de afvoer en herverwerking van de accu's regelt en garandeert.

3.4 Vervoer van afgewerkte accu's

De internationale regelgeving rond de afvoer van gevaarlijk afval is zo geregeld dat sluikhandel van aangemelde partijen gevaarlijk afval niet mogelijk is. De regelgeving is neergelegd in diverse internationale verdragen, zoals de Conventie van Basel. Binnen de E.U. is aanvullende regelgeving opgesteld. Het Nederlandse beleid volgt de E.U. regelgeving. Illegale dumping en handel is enkel mogelijk wanneer de vrijgekomen partij gevaarlijk afval niet door de aanbieder wordt gemeld.

Voor opslag en transport zijn aparte vergunningen nodig. Voor opslag zijn aangepaste verpakkingen en opslagruimten nodig.

Elk transport moet drie dagen vooraf worden aangemeld bij LMA (nationaal transport) of IMA (internationaal transport). Daarbij moet aangegeven worden

- de aard en omvang van de lading;
- de transportmiddelen (verpakking);
- wie de ontdoener c.q. aanbieder van de lading is;
- waar (op welk adres) de lading in opslag is (aanbieder);
- door wie afvoer wordt geregeld;
- door wie de afvoer wordt uitgevoerd (transporteur)
- waar de lading heen gaat.

Bij internationale transporten wordt ook aangegeven wie de chauffeur is en welke grensovergang zal worden gebruikt. Voor internationale transporten wordt per jaar en per afnemer een transporttoestemming gegeven. Daarbij wordt met nadruk aandacht besteed aan de afnemer. Nagegaan wordt:

- welk proces de afnemer toepast;
- wat de massabalans daarover is;
- welke emissies optreden.

Ook wordt bij de lokale autoriteiten geïnformeerd wat voor reputatie de afnemer bij de lokale vergunningverlener heeft. De transporteur dient aan te geven hoeveel transporten (bij benadering) zullen plaatsvinden en dient een bankgarantie te kunnen overleggen voor het eventueel terughalen van de lading.



4 Recycling van accu's

4.1 Inleiding

Om een compleet beeld te krijgen van emissies van verschillende stoffen die vrij komen tijdens de levenscyclus van een accu, moet er rekening worden gehouden met de winning van de grondstoffen, de gebruiksfase en de verwerkingsfase.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verwerking van gebruikte accu's. Over de winning van de materialen waarvan de accu wordt gemaakt, is weinig bekend. Het hangt af van welke producent de accu's maakt en waar deze zijn grondstoffen inkoop. Vaak gebeurt deze inkoop op de 'wereldmarkt' waardoor niet inzichtelijk is waar de grondstoffen zijn gewonnen. Doordat een groot percentage van de accu's wordt gerecycled, is de invloed van de winning van de nieuwe grondstoffen niet groot.

Tijdens de gebruiksfase van de accu vinden er geen emissies van de accu zelf plaats. Wel zijn er emissies die vrijkomen bij het genereren van elektrische energie, maar deze vallen buiten de scope van dit project.

4.2 Loodzuur accu's

In Nederland vindt geen verwerking van gebruikte loodaccu's⁶ plaats, alle ingezamelde accu's worden naar recyclingfabrieken in het buitenland afgevoerd. De meest recente cijfers over de verwerking van Nederlandse loodzuuraccu's gelden voor 1997 [Basisdocument, 1999]: in Nederland kwamen in dat jaar circa 32,2 kiloton accu's als afval vrij. Verwacht wordt dat deze hoeveelheid met zo'n 3 % per jaar stijgt. In totaal werden 38,9 kiloton accu's in 1997 naar het buitenland afgevoerd.

Van de totale hoeveelheid afgedankte accu's werden in 1997 circa 98% ingezameld door inzamelaars en bewaarders. De overige 2% werd rechtstreeks naar het buitenland afgevoerd voor verwerking [Basisdocument, 1999]. De belangrijkste ontdoeners en (buitenlandse) verwerkers van loodaccu's in 1997 en '98 zijn opgesomd in Tabel 3⁷.

⁶ Een loodzuuraccu bestaat uit een bak van polypropyleen, waarin zich een hoeveelheid platen bevindt, waartussen zwavelzuur aanwezig is. Deze platen bestaan uit lood met een antimoon- of cadmiumlegering. Een accu in een conventionele personenauto-accu weegt 12 tot 16 kilo, waarvan ca. 35 gew.% lood en 45 gew.% loodpasta is [Afzetdocumenten, 2000]. In een elektrische personen- of bestelauto met loodaccu's kan het totale accugewicht oplopen tot ruim 500 kg, bij een stadsbus tot ruim 1000 kg. De samenstelling van deze accu's is vergelijkbaar met die van de startaccu.

⁷ De informatie omtrent de hoeveelheden accu's die zijn ingezameld en de hoeveelheden die zijn geëxporteerd is gebaseerd op de gegevens van meldingen bij het Landelijk Meldpunt Afvalstoffen (LMA) en bij het Internationaal Meldpunt Afvalstoffen (IMA). Doordat een beter monitoringsysteem ontbreekt, zijn de werkelijke hoeveelheden naar alle waarschijnlijkheid groter dan de gemelde hoeveelheden.

Tabel 3 De belangrijkste ondoeners en verwerkers van loodaccu's, met hoeveelheden per jaar in kton [In-, uit- en doorvoer, 1999].

	1997	1998
Ondoeners		
Van Peperzeel	16,6	18,1
Terlouw Metaalrecycling	7,8	8,3
JCA Blom	3,0	3,4
Verwerkers		
Campine (Belgie)	23,4	15,2
FMM (Belgie)	8,9	13,2
Metal Blanc (Frankrijk)	3,0	5,3

In het Meerjarenplan Gevaarlijk Afval II [MJP-GA II] wordt als knelpunt ge-signaleerd, dat een aantal bedrijven accu's bewaart zonder te beschikken over de vereiste bewaarvergunning, en derhalve vaak zonder de daarvoor verplichte milieuvorzieningen.

Er zijn twee verschillende processen die worden gebruikt om de loodzuuraccu's te verwerken (voor een uitgebreide beschrijving van deze twee processen zie Bijlage C). Globaal komen beide processen op het volgende neer.

Bij de verwerking van de loodaccu's worden de accu's gebroken, en het accuzuur gescheiden van de rest. Ook de overige fracties worden gescheiden waarna het lood wordt omgesmolten in een oven. Het gesmolten lood wordt in blokken gegoten en hergebruikt. Het accuzuur wordt in de meeste gevallen geneutraliseerd, wat soms moeilijk is vanwege verontreinigingen. Het bedrijf in Frankrijk wint daarnaast ook het kunststof terug door het polypropyleen te granuleren zodat het eveneens kan worden hergebruikt [Afzetdocument]. Hierdoor ontstaan nauwelijks reststoffen [MJP-GA II, 1997]. Dit laatste uitgangspunt heeft geleid tot een minimumstandaard voor verwerkingsbedrijven: alle samenstellende componenten van de accu's dienen nuttig toegepast te worden [MJP-GA II].

Doordat het lood kan worden hergebruikt is de economische waarde van afgedankte accu's positief, dat wil zeggen dat het financieel gunstig is om de accu's te recyclen. Dit verklaart o.a. ook het grote aandeel ingezamelde accu's. De te behalen winst is wel sterk afhankelijk van de loodprijs. Recycling van het accuzuur is een kostenpost, en niet winstgevend.

Ook al gaat het in het huidige systeem voor het grootste deel om startaccu's uit conventionele voertuigen, is er geen reden om aan te nemen dat de inzamelings- en verwerkingssituatie voor grotere hoeveelheden loodaccu's uit BEV's of HEV's anders zal zijn.



Er zijn daarnaast ook twijfels over de verwerking van het afval in het buitenland, en met name over de milieuschade die daar is ontstaan rond verwerkingsfabrieken. Een aantal bodemonsters die vlak bij de recyclingfabriek FMM in Brussel waren genomen, vertoonden sterke verontreiniging met lood, en er zijn beschuldigingen geuit dat bijvoorbeeld het geneutraliseerde accuzuur het riool in wordt gepompt. De Belgische milieu-inspectie acht de maatregelen die de fabriek afgelopen jaar heeft genomen om verdere verontreiniging te voorkomen afdoende.

Ook het Franse verwerkingsbedrijf Métal Blanc wordt beschuldigd van onzorgvuldig omgaan met de giftige afvalstoffen. Onderzoek heeft aangetoond dat vervuilde vrachtwagens het lood buiten het fabrieksterrein verspreiden, en dat de arbeiders het met hun kleren mee naar huis nemen. Accuzuur werd direct in een riviertje gedumpt, dat in de Maas uitkomt. De loodvervuiling in de omgeving van de fabriek heeft geleid tot loodvergiftiging bij ruim een kwart van de kinderen in het dorp. Zomer '99 verbood de Franse rechter de opslag en verwerking van loodaccu's bij deze fabriek. Na felle protesten, waaronder een actie van het fabriekspersoneel die duizenden kilo's loodaccu's met zuur en al in de voortuinen van de activisten en ex-werknemers hadden gegooid, is de fabriek even later heropend. Ook Nederland stuurt er nog steeds accu's heen.

Bronnen:

'Giftige afdankertjes', Milieudefensie, 1999-9

'Export oude accu's gaat gewoon door', Milieudefensie 2000-1

Conclusie

Op dit moment zijn er niet genoeg gegevens beschikbaar om een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de emissies die vrijkomen bij de verwerking van loodzuuraccu's. De gegevens die wel beschikbaar zijn, komen uit internationale literatuur en zijn niet direct van toepassing op de bedrijven die de Nederlandse accu's verwerken.

Wel zijn er sterke aanwijzingen dat niet alle accuverwerkende bedrijven even secuur met de emissies omgaan. Vaak kan door eenvoudige maatregelen⁸ de totale emissie worden verminderd.

4.3 Nickel Cadmium Accu's

Een NiCd accu bestaat uit een nikkelbevattende anode, een cadmiumbevattende katode en kaliloog (kaliumhydroxide) als elektrolyt. De gemiddelde samenstelling is: 8-20 gew.% cadmium, 10 gew.% nikkel, 33 gew.% kaliloog en verder staal en kunststof [CBS, 1993].

Net als bij de loodzuuraccu's, zal een totaal accugewicht bij een elektrische personen- of bestelauto met NiCd-accu's ruim 500 kg bedragen, bij een stadsbus tot ruim 1000 kg. Een NiCd accu voor een elektrische personenwagen bevat dus zo'n 40-100 kg cadmium en rond de 50 kg nikkel.

De NiCd accu- en batterijenmarkt verschilt van de loodzuur accumarkt doordat zowel grote aantallen kleine batterijen voor consumentenelektronica verkocht worden als ook een groot aantal industriële, grote accu's. De productieprocessen van deze twee soorten NiCd accu's is vrijwel hetzelfde,

⁸ Deze maatregelen kunnen bestaan uit 'good housekeeping' zoals het afspoelen van de banden van de wagens die het terrein verlaten en het aanbrengen van een onderdruk in de verwerkingsruimten, zodat er geen vervuilde lucht weglekt.

maar zowel de inzameling als ook de recycling is bij de grotere accu's aanzienlijk makkelijker dan bij de kleine batterijen. Terwijl het bij de grote accu's goed mogelijk is om de meeste onderdelen los te halen en weer te gebruiken (bijvoorbeeld de elektroden, separatoren en het elektrolyt), moeten de kleinere batterijen gebroken worden waardoor de verschillende materialen mengen. Een groot aandeel van deze batterijen wordt daarom gestort en niet gerecycled [IEA].

Van Peeperzeel in Ermelo zamelt vrijwel 100% van de afgedankte NiCd accu's in Nederland in, en zet ze af bij fabrieken van Saft in Zweden en Frankrijk [pers. com.]. Daar worden de accu's eerst opgewarmd tot 380 graden C, waardoor eventueel aanwezige plastic behuizingen verdampen. Het overblijvende metaal wordt tot 680-900 graden verhit, waardoor het cadmium verdampt. Overblijvend nikkel en staal wordt afgezet bij de staalindustrie voor de productie van roestvrij staal. Het cadmium verwerkt Saft zelf in nieuwe accu's en batterijen. In dit proces wordt 99,5% van het cadmium teruggewonnen.

NiCd-accu's zullen naar verwachting eveneens met een rendement van 100% kunnen worden ingezameld ten behoeve van hergebruik. Dit percentage wordt momenteel al gerealiseerd voor NiCd-accu's voor industriële toepassingen. Daarbij speelt de marktprijs van nikkel (10.000 NLG/ton) een rol, maar ook de onderkende gezondheidsrisico's van het cadmium.

4.4 Nickel Metaalhydride Accu's

De samenstelling van NiMh accu's is vergelijkbaar met NiCd accu's, behalve dat de cadmium elektrode is vervangen door een metaalhydride die waterstof kan opslaan. De samenstelling van deze elektrode kan verschillen, maar bestaat in het algemeen uit elementen zoals o.a. lanthanum, nikkel, vanadium, zirconium, titanium en mangaan [IEA].

Doordat de samenstelling van de metaalhydride elektrode varieert, is een universele recyclingsmethode niet goed mogelijk [IEA]. Een aantal recyclingbedrijven die ook NiCd-accu's verwerken, kunnen vermoedelijk de nikkel uit de elektroden verwerken en afzetten bij de roestvrij staal industrie. Zover bekend, worden de metalen uit de hydride-elektrode nog niet gerecycled, waardoor ze als restafval worden gestort.

4.5 Lithium accu's

Er zijn op dit moment twee soorten lithium-accu's voor elektrische voertuigen in ontwikkeling: de lithium-ion en de lithium-polymeer accu. Deze accu's zijn nog volop in ontwikkeling en pas sinds kort op de markt, er is daarom nog weinig bekend over de milieubelasting van deze accu's.

Li-Ion accu's zijn opgebouwd uit een koolstof kathode en een Lithium-metaaloxide anode. Als metaaloxide wordt in kleine batterijen cobaltoxide gebruikt, in accu's voor voertuigen worden vaak goedkopere nikkeloxide of mangaanoxide toegepast [Varta, '98].

Lithium-polymeer accu's bestaan uit een lithiumanode en een kathode van mangaandioxide [IEA]. De vaste-stof elektrolyt is een polymeer.

De milieu-, gezondheids- en veiligheidsaspecten van de lithium polymeer accu zijn onderzocht door het National Renewable Energy Laboratory in de Verenigde Staten [Corbus, Hammel, 1995], waaruit in de IEA studie [IEA,



1999] is geciteerd. Hieruit blijkt, dat er in Europa vrijwel geen recyclingfaciliteiten voor deze accu's bestaan, in Noord Amerika zijn drie bedrijven actief. Deze bedrijven recyclen bij lithium polymeer accu's alleen de lithium, ongeveer 5 kg bij een 25 kWh accu. De rest van de accu, voornamelijk metaal en kunststoffen, brengt te weinig op om te recyclen, en wordt afval.

4.6 Emissies en energiegebruik recycling

Ondanks dat verreweg het grootste gedeelte van de loodzuuraccu's ingezameld en gerecycled wordt, brengen productie en recycling van deze accu's toch potentiële milieu- en gezondheidsrisico's met zich mee. In de vorige paragraaf werden de milieueffecten van recycling kwalitatief beschreven voor de recyclingbedrijven waar een groot gedeelte van de Nederlandse accu's naartoe gaan. Het daadwerkelijk kwantificeren van de emissies en de risico's is moeilijker omdat gegevens hierover ontbreken. Ondanks bestaande regelgeving zullen de emissies sterk afhangen van de faciliteiten van de fabriek, bijvoorbeeld op het gebied van nabehandeling van de verbrandingsgassen of de procedures voor het schoonmaken van de vrachtwagens op het fabrieksterrein.

Resultaten van metingen van de bodem-, lucht- en watervervuiling rondom de fabrieken lijken goede indicatie te kunnen geven van de milieuschade, aangezien deze fabrieken echter in het buitenland staan, worden zij niet door de Nederlandse overheid gemonitord. Onderstaande gegevens zijn daarom gebaseerd op informatie uit de literatuur, die veelal is gebaseerd op buitenlandse studies.

In bijlage C staat een samenvatting van emissies over de verwerking van accu's.



5 Milieueffecten van elektrische en hybride voertuigen

5.1 Introductie

Elektrische en hybride voertuigen worden vaak op de markt gebracht als 'schone' technologie. Het grootste voordeel op milieugebied is dan ook duidelijk: de mogelijkheid om 'emissievrij'⁹ te rijden. De potentieel schadelijke milieueffecten moeten echter niet over het hoofd worden gezien. De auto's zijn vaak relatief zwaar vanwege de grote hoeveelheid accu's of een gecompliceerde aandrijflijn, de energievraag voor de aandrijving is daarom hoger dan voor een vergelijkbare auto met een verbrandingsmotor.

Ook de accu's zelf leveren potentieel een milieuprobleem op vanwege de schadelijke stoffen die erin zitten zoals in het vorige hoofdstuk is besproken, en de beperkte levensduur. Daarnaast worden de emissies en het energiegebruik van conventionele voertuigen steeds verder beperkt door Europese regelgeving.

5.2 Volledig aangedreven voertuigen (BEV's)

Een groot voordeel van volledig elektrische voertuigen is de eigenschap dat tijdens het rijden geen emissies worden uitgestoten. Daar staat tegenover dat de gebruikte energie ergens anders wel moet worden opgewekt. Dit biedt de mogelijkheid om van duurzame energie gebruik te maken, waardoor er CO₂-neutraal kan worden gereden. In verreweg de meeste gevallen zal echter gebruik worden gemaakt van elektriciteit die wordt opgewekt door fossiele brandstoffen zoals kolen en gas, of van kernenergie. Het milieueffect van elektrisch vervoer hangt daarom ook af van de stroom die wordt gebruikt.

Naast de mogelijkheid om van 'groene' energie gebruik te maken, kunnen volledig elektrische auto's ook andere voordelen bieden ten opzichte van auto's met een verbrandingsmotor:

- elektriciteitscentrales bieden vaak een hoog rendement, o.a. door gebruik te maken van warmtekrachtkoppeling;
- vaak worden de emissies van de centrales sterk beperkt door optimalisatie van het (verbrandings)proces en toepassing van nabehandelingstechnologieën¹⁰;
- elektriciteitscentrales staan vaak buiten de bebouwde kom, waardoor emissies niet direct in de bebouwde omgeving terecht komen;
- de accu's kunnen worden geladen tijdens daluren (bijvoorbeeld 's nachts), en zo gebruik maken van de dan aanwezige overcapaciteit van elektriciteitscentrales.

Mogelijke nadelen zijn echter ook aanwezig:

- door de liberalisering van de elektriciteitsmarkt kan stroom worden ingekocht uit centrales die (nog) sterk vervuilen;

⁹ De emissies vinden plaats op een andere locatie en tijd.

¹⁰ Hetzelfde geldt echter ook voor moderne voertuigen, waarin verbrandingsprocessen en nabehandelingstechnologieën ook steeds verder ontwikkeld.

- de verliezen tussen de centrale en de auto kunnen aanzienlijk zijn;
- er treden verliezen op als de auto niet wordt gebruikt, door zelfontlading van de accu's.

Om de emissies van de elektriciteitsvoorziening voor elektrische auto's in 2005 te bepalen, moet met deze punten rekening worden gehouden.

Energiegebruik van de elektrische auto

Er worden twee soorten elektromotoren in BEV's gebruikt, waarvan de eigenschappen enigszins verschillen. De eerste generatie elektrische voertuigen hadden vooral gelijkstroom (dc) motoren die goedkoop waren maar niet meer dan 80-85% rendement hadden, met een specifiek vermogen van 150-200 W/kg. Een alternatief is de wisselstroom motor die duurder en complexer is, maar een hoger rendement haalt [Cleaner Vehicles Task Force, 2000]. Elektrische auto's hebben, naast het hogere rendement van de motor, nog verdere mogelijkheden om energie te besparing. Als het voertuig stil staat, bijvoorbeeld voor een verkeerslicht, kan de motor eenvoudig worden uitgeschakeld. Door bovendien gebruik te maken van regeneratief remmen, waarbij remenergie wordt opgeslagen in de accu, kan tot 10 - 20% van de energie worden bespaard. De winst van deze energiebesparingsmogelijkheden is uiteraard het grootst in stedelijk verkeer.

5.3 Hybride voertuigen (HEV's)

Hybride voertuigen zijn pas sinds kort op de markt, en nog volop in ontwikkeling. Uitspraken over de mogelijke brandstofbesparing en emissiereductie van hybride voertuigen in 2005 zullen daarom vrij onzeker zijn. Praktijkervaring die bijvoorbeeld met de Toyota Prius in Japan of de Verenigde Staten is opgedaan, is helaas niet goed te gebruiken voor de Nederlandse (of Europese) situatie omdat voor de Europese markt een sterkere motor wordt toegepast, en de ritten vaak anders zijn.

Daarnaast ontbreekt er nog een goede meetcyclus voor deze voertuigen, en juiste procedures om de verschillen in lading van de accu correct mee te nemen. Volgens recent TNO-onderzoek [TNO, 1999; De Ingenieur, 2000] is het daarom nog niet duidelijk hoeveel zuiniger de hybride auto's daadwerkelijk zijn, en welke emissies zij veroorzaken. Naar aanleiding van dit onderzoek doet TNO wel voorstellen om deze problemen te overkomen, zodat de typekeuring van hybriden op een juiste manier kunnen worden uitgevoerd.

Het brandstofverbruik zal vermoedelijk lager zijn dan van een vergelijkbare, conventionele auto op de volgende redenen:

- remenergie wordt in de accu opgeslagen en vervolgens weer gebruikt voor de aandrijving;
- de verbrandingsmotor kan continu op een optimaal toerental opereren;
- de motor wordt uitgezet als deze niet nodig is;
- een kleine verbrandingsmotor (met minder vermogen) is voldoende omdat de accu kan meehelpen als dat nodig is.

Daartegenover staan het relatief hoge voertuiggewicht vanwege de accu's en de aandrijflijn.

Onderzoek in de VS laat een reductie van het brandstofverbruik zien van rond de 26-30% voor stadsritten, en rond de 18 en 24% voor gecombineerde stads- en snelwegritten.

Deze voordelen leiden ook tot een emissiereductie, al zijn de gegevens hierover beperkt. Vergeleken met een conventionele benzineauto zijn de reducties voor CO 40-77%, voor HC tot 67% en voor NO_x 33-70% [Cleaner



Vehicles Task Force, 2000]: De Toyota Prius en Honda Insight voldoen al aan de Californische ULEV normen, het is echter nog niet duidelijk of de Europese uitvoeringen van deze voertuigen al aan Euro 4-normen voldoen.

Het is echter nog wel de vraag, of deze sterke reducties ook ten opzichte van conventionele voertuigen die aan Euro-4 normen voldoen worden gehaald. In 2006 worden de Euro 4 emissie-eisen voor alle voertuigen verplicht, waardoor ook de conventionele voertuigen nieuwe voertuig- en nabehandelingstechnieken moet toepassen. Dieselauto's zullen dan aanzienlijk schonere worden door toepassing van technieken zoals common rail, en benzineauto's zullen steeds meer worden uitgerust met zuinige DI lean burn motoren. Deze motoren hebben een hoog rendement over een groter toerentalbereik, waardoor een voordeel van seriehybride aandrijving vervalst: bij deze hybriden kan de motor continu op zijn optimale belastingspunt opereren, waardoor bij huidige motoren een emissie- en verbruiksreductie bereikt wordt. De voordelen van het mogelijke opslaan van remenergie, en toepassing van een kleinere motor zullen wel blijven bestaan. Daarnaast zijn hybride voertuigen nog in het ontwikkelingsstadium, en zou door verdere optimalisatie van de aandrijfsystemen en regelingen nog meer winst geboekt kunnen worden op het gebied van emissies en verbruik.

5.4 Gevolgen accugebruik

De uiteindelijke invloed van de accu's uit de BEV en HEV op de gezondheid en het milieu is afhankelijk van de hoeveelheid gebruikte accu's en de wijze waarop deze worden verwerkt. In deze paragraaf wordt een schatting gemaakt van de hoeveelheden BEV's en HEV's die in het zichtjaar 2005 zullen worden verkocht. Daarbij wordt ook aangegeven welke accutypes in deze wagens worden verwacht en of dit problemen op gaat leveren bij de verwerking.

5.4.1 Aantallen BEV en HEV in de nieuwverkoop

Op dit moment worden de eerste commerciële hybride voertuigen aangeboden op de automarkt. Er worden al enige tijd elektrische auto's aangeboden, maar deze kunnen technisch nog niet concurreren met auto's met een verbrandingsmotor, waardoor ze zijn aangewezen op een nichemarkt.

Ook in het in deze studie gebruikte zichtjaar verwachten wij niet dat de BEV een positie heeft verworven waarin deze de nichemarkt ontstijgt. Van de hybride auto wordt dit wel verwacht. De kosten zullen weliswaar nog aanzienlijk hoger zijn dan die van hun concurrenten. Maar door de vrijstelling van de BPM¹¹, het lagere benzineverbruik en dalende kosten bij de productie zal naar waarschijnlijkheid een rendabele exploitatie van deze wagens mogelijk zijn.

Toch gaat het voor de BEV en de HEV om een relatief nieuwe technologie die zich voor veel consumenten eerst zal moeten bewijzen in de markt. Een voorzichtige schatting is dat in 2005 1% van de nieuwverkoop van alle personenauto's een BEV of een HEV zal zijn¹².

¹¹ BPM: Belasting op Personenauto's en Motoren, ongeveer 45% van de cataloguswaarde.

¹² Deze schatting is voorgelegd aan RIVM en TNO, die het ook een aannemelijk percentage vonden.

Van deze ene procent wordt geschat dat 20% elektrisch aangedreven auto's zijn en 80% hybride. Dit wil zeggen dat van de totale nieuwverkoop in Nederland in 2005 0,2 procent een BEV is en 0,8 procent een HEV.

5.4.2 **Inschatting accutechnologie.**

Een BEV heeft een grote hoeveelheid accu's nodig om genoeg energie (kWh) mee te kunnen nemen om een voldoende actieradius te hebben. De kwaliteit (vermogen, energetisch rendement) van deze accu's hoeft echter niet zeer hoog te zijn, omdat ze worden geladen uit het elektriciteitsnet, waar de energie ruim voorradig en goedkoop is. Wij verwachten dat de overgrote meerderheid van elektrisch aangedreven auto's zal zijn voorzien van loodzuur accu's, omdat deze goedkoop te leveren zijn.

De accu die in een HEV wordt gebruikt moet aan andere eisen voldoen dan die voor een BEV. Zo hoeven deze accu's niet zo groot te zijn omdat het voertuig een eigen generator aan boord heeft om de accu bij te laden. Wel is van belang dat deze accu's snel vermogen kunnen opnemen en afgeven en dat het energetische rendement hoog is. Door deze combinatie van behoeften - relatief klein maar wel kwalitatief goede prestaties - loont het in deze voertuigen de moeite om duurdere types te gebruiken.

De NiCd accu heeft op zich goede specificaties, maar last van het 'geheugeneffect'¹³ waardoor deze niet goed te gebruiken is in HEV's. Bovendien is het waarschijnlijk (gezien de aankomende regelgeving) dat deze accutypes worden verboden doordat ze cadmium bevatten.

De NiMh accu voldoet aan de eisen die een HEV stelt, en worden ook in huidige hybriden toegepast. Daar komt bij dat het een relatief milieuvriendelijke accu is. Wij verwachten dat de overgrote meerderheid van de in 2005 op de markt aangeboden HEV's een NiMh accupakket zal hebben.

De Lithiumaccu's zijn veelbelovend wat prestaties betreft en waarschijnlijk ook de opvolger van de NiMh. Op dit moment is het echter niet te verwachten dat dit accutype in 2005 al commercieel zal worden toegepast.

5.4.3 **Conclusie**

In 2005 zal 0,2 procent van de verkochte auto's voorzien zijn van een puur elektrische aandrijving, die zijn energie haalt uit loodaccu's. Zelfs al heeft een loodaccu 10 keer zoveel accu's aan boord dan een gewone auto, dan nog zal hierdoor het totale aantal loodaccu's in het personenvervoer maar met ongeveer 2% toenemen. Op het totaal van de te verwerken accu's (inclusief vrachtverkeer en alle andere toepassingen) is dit een verwaarloosbaar klein aantal en geen reden tot extra zorg.

De groei van het gebruik van NiMh accu's is wel significant. Alhoewel het in absolute getallen om kleine aantallen gaat, is dit wel een categorie die aandacht behoef.

De relatieve milieuvriendelijkheid van deze accu zorgt ervoor dat er geen grote milieuproblemen te verwachten zijn bij de verwerking van deze accu's. Maar zoals is opgemerkt, gebruiken verschillende fabrikanten andere meta-

¹³ Om te voorkomen dat de accucapaciteit terugloopt, moet deze accu in elke laad/ontlaadcyclus volledig worden ontladen, wat het gebruik in een dynamische omgeving vrijwel onmogelijk maakt.



len in de elektroden van deze accu's, wat een éénduidige verwerking onmogelijk maakt. Ook als de verwerkingsindustrie weet om wat voor een type accu het gaat (met de samenstelling van de elektroden) dan nog is de verwerking duurder doordat voor elke elektrode een andere verwerkingsmethode moet worden toegepast.

Een oplossing hiervoor kan zijn dat de leveranciers van de accu's de accu's terugnemen en zelf voor de verwerking zorgdragen. Hierdoor wordt de stroom accu's van één type groter en daardoor het financiële rendement van de verwerking.

Een andere oplossing zou zijn om maar één type NiMh accu's toe te laten op de Nederlandse markt, maar dat brengt concurrentievervalsing met zich mee en belemmert de ontwikkeling van betere accutypes.

Over de verwerking van Lithium accu's is nog zo weinig bekend dat daar geen zinvolle uitspraak over is te doen. Deze accu's bevatten geen zware metalen, en zijn daardoor in potentie minder milieubelastend dan de huidige alternatieven.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt dat (zoals is gebleken bij de bespreking van de recycling) er grote verschillen zijn in de rendementen en emissies bij de verwerking van de loodaccu's, ook al vallen de genoemde processen allemaal binnen de betreffende wetgeving. Deze grote verschillen zouden toch aanleiding kunnen zijn voor de Nederlandse overheid om bewuster met deze verwerking om te gaan en een voorschrift te maken dat de accu's alleen met de modernste techniek en met een zekere zorgvuldigheid mogen worden verwerkt.



6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek is het beantwoorden van de vraag:

Is het gebruik van accu's in elektrische en hybride voertuigen een mogelijke bron van milieu- en gezondheidsproblemen?

De resultaten van deze studie laten zien dat dit in principe niet het geval is, vanwege de volgende aspecten:

- De inzameling en recycling van loodzuuraccu's is goed georganiseerd.
- De hoeveelheid te recyclen loodaccu's van elektrische en hybride voertuigen is maar een klein aandeel van de totaal te verwerken loodaccu's vanwege de grote hoeveelheden die afgedankt worden door conventionele voertuigen. Dit zal de komende jaren niet veranderen. Specifiek beleid voor loodzuuraccu's in elektrische of hybride voertuigen is daarom niet nodig.
- Vrijwel 100% van de afgedankte NiCd accu's worden ingezameld in verwerkt¹⁴.
- De verwachting is dat milieuvriendelijkere accu's zoals NiMh en lithiumaccu's de cadmium-bevattende NiCd accu's van de markt verdringen.

Er zijn echter ook een aantal potentiële knelpunten gesignaleerd:

- De meest gebruikte accu's bevatten aanzienlijke hoeveelheden zware metalen zoals lood, cadmium of nikkel. Tijdens productie en verwerking van deze accu's komen deze stoffen (over het algemeen in beperkte mate) vrij, en brengen zo milieu- en gezondheidsrisico's met zich mee.
- In Nederland hebben we geen accuverwerkende industrie, alle afgedankte accu's worden naar buitenlandse verwerkers getransporteerd. De (milieu)kwaliteit van de buitenlandse verwerking kan sterk variëren tussen verwerkers. Nederland heeft echter geen mogelijkheid om de verschillende verwerkers te controleren of monitoren.
- Er bestaan nog geen goede faciliteiten om NiMh accu's, zoals die bijvoorbeeld in de Toyota Prius worden toegepast, te recyclen. Nu wordt alleen de nikkel hergebruikt. De metaalhydride elektrode bevat weliswaar vrij kostbare componenten, de variërende samenstelling van deze elektrode maakt recycling onaantrekkelijk.
- Lithium accu's voor voertuigen zijn volop in ontwikkeling, en komen misschien de komende jaren op de markt. Ondanks dat de in deze accu's gebruikte materialen waarschijnlijk minder milieubelastend zijn dan de nu gebruikte zware metalen, lijkt het zinvol om op dat moment de risico's in kaart te brengen.

¹⁴ Dit geldt alleen voor de grotere NiCd accu's die gebruikt worden voor industriële toepassingen, voertuigen, e.d. Inzameling en verwerking van kleine NiCd batterijen is aanzienlijk moeilijker.

Aanbevelingen

Om de gesignaleerde knelpunten aan te pakken, stellen wij de volgende mogelijke oplossingen voor.

Verwerking loodaccu's

Voor het transport van accu's is een vergunning nodig. Het is in principe mogelijk om alleen vergunningen te verstrekken aan transporten die gaan naar bedrijven die voldoen aan lage emissie-eisen en 'good-housekeeping'. Hiervoor zou een monitorings- of controlesysteem moeten worden opgezet, liefst in Europees verband.

Aanscherping wetgeving gebruik en verwerking NiCd-accu's

Nederland wacht op dit moment aanscherping van de Europese wetgeving op het gebied van NiCd accu's af. Voor elektrische auto's zijn op dit moment goede alternatieven beschikbaar, een verbod in deze sector zou daarom weinig negatieve gevolgen hebben. Het gebruik van deze accu's zou daarom ontmoedigd kunnen worden.

Als mogelijke tussentijdse maatregel zou men kunnen denken aan verplichte registratie van deze grote NiCd accu's, zodat de inzameling en verwerking beter gecontroleerd wordt. Het gaat hierbij om enkele tienduizenden per jaar.

Stroomlijnen verwerking NiMh accu's

Verschillende fabrikanten gebruiken verschillende materialen voor de metaalhydride elektroden, waardoor de gemeenschappelijke recycling onmogelijk (ofwel te duur) wordt.

Dit probleem kan op twee manieren worden ondervangen. De eerste is om maar één type elektroden in deze accu's toe te laten. Dit belemmert echter zowel de concurrentie als ook de technische ontwikkeling van deze accutypes.

Een betere oplossing is om de leveranciers van deze accu's te verplichten om ze terug te nemen en voor de verwerking zorg te laten dragen. Hierdoor worden de 'stromen' van elk type accu dikker en zal een efficiënte verwerking makkelijker zijn.



Literatuurlijst

Afvalstoffengids, Ministerie van VROM, 1995

Afzetdocument Afzet Secundaire Afvalstoffen, Ministerie van VROM, 2000.

Basisdocument gevaarlijk afval 1995-1997, Ministerie van VROM, 1999.

CBS, 'Cadmium in Nederland, 1990', 1993.

Cleaner Vehicles Task Force, Department of Transport and Industry, UK, 'An Assessment of the Emissions Performance of Alternative and Conventional Fuels', 2000.

Erasmus Studiecentrum voor Milieukunde, 'Nikkel-cadmium batterijen, recycling', 1988.

IEA Technical Report, International Energy Agency, 'Assessment of Electric Vehicle Impacts on Energy, Environment and Transportation Systems', 1999.

De Ingenieur, nummer 20, november 2000.

Kampman, B., Dings, J., Gense, R. en van de Burgwal, E., CE en TNO, 'Vervroegde introductie van schonere benzine en diesel in Nederland', 2000.

Koontz, M.D., Burruss, R., Nagda, N.L., Norvell, M.J., GEOMET Technologies Inc., 'Lead Acid Batteries for Electric Vehicles – Life-Cycle Environmental and Safety Issues', 1993.

Acute blootstelling aan hoge doses Nikkel leidt tot beschadigingen aan lever, nieren, bijniere, hersenen, milt.

Chronische blootstelling leidt tot aantasting van neus en luchtwegen (astma, beschadigingen aan sinussen, neusschot. Nikkel veroorzaakt waarschijnlijk kanker in longen en neus.

Rondel, M., 'Report on the project "Pragmatic Measureing Procedures Hybrid Electric Vehicles"', TNO Automotive, 2000.

Lave, B.L., Hendrickson, C.T., McMichael, F.C., 'Environmental Implications of Electric Cars', Science, Volume 268, pp.993-995, 1995.

Meerjarenplan Gevaarlijke Afvalstoffen II, 1997 – 2007, 1997

RIVM, 'Milieubalans 1998', 1998

Smokers, R.T.M., et.al., TNO, 'Elektrische en hybride voertuigen, Een Quick Scan van de stand van zaken en trends', 1997

Valkhoff, H., 'Giftige afdankertjes', Milieudefensie 99-9.

Varta Special Report 5, 'Nickel-Metal-Hydride and Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications', 1998.



VROM, 'Jaaroverzicht gevaarlijk afval 1997', 1999.

Wolbers, A.A.M., de Vos, F.E.M., 'In-, uit- en doorvoer van afvalstoffen, Jaaroverzicht 1998', 1999.

persoonlijke communicatie met
De heer K. den Herder, Ministerie van VROM.



CE

**Oplossingen voor
milieu, economie
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Accumateriaal verwerkt

Onderzoek naar de milieulast van accu's
voor elektrische en hybride auto's

Bijlagen

Delft, december 2000

Opgesteld door: ir. B. Klimbie
ir. B. Kampman
drs. H. Croezen
H. van de Ploeg





A Eigenschappen en milieubelasting van accu's

A.1 Eigenschappen van accu's

Belangrijke eigenschappen waar de accu's op worden beoordeeld zijn:

- kosten (per kWh);
- energetisch rendement (rendement laad/ontlaad cyclus);
- levensduur – aantal cycli dat de accu kan worden opgeladen, evt. beperkt aantal jaren;
- specifieke energie (Wh/kg);
- energiedichtheid (Wh/l);
- specifiek vermogen (W/kg);
- laadeigenschappen – wat is de laadtijd, is er een geheugeneffect, kan regeneratief remmen worden toegepast?;
- zelfontlading;
- bedrijfstemperatuur;
- (bots)veiligheid;
- milieuaspecten.

In het volgende worden de eigenschappen van de in deze studie beschouwde accu's nader besproken.

A.1.1 Loodzuur accu's

Het grote voordeel van loodzuur accu's zijn de lage kosten bij een redelijke prestatie, in vergelijking met de andere accu's. Groot nadeel van loodzuur accu's is echter de lage energiedichtheid, waardoor bij een volledig elektrische aandrijving een groot gewicht en volume accu's moet worden meevervoerd om een redelijke hoeveelheid energie beschikbaar te hebben. Het grotere gewicht veroorzaakt weer een grotere energiebehoefte per kilometer. De lage energiedichtheid resulteert in een beperkte actieradius, vaak tussen 30-70 km.

Kosten:	400 Euro/kWh [IPTTS, '99], 150 Euro/kWh [TNO, 97]
Specifieke energie:	30 tot 40 Wh/kg [Cleaner Vehicles Task Force, 2000]
Specifiek vermogen:	± 100 W/kg
Levensduur:	300 – 400 cycli (3-5 jaar in een conventionele auto, bij gemiddeld gebruik, maximaal 3 jaar in een elektrische auto)
	600 cycli [IEA]
Energie efficiency:	70-80%
Actieradius:	maximaal 70-90 km, voor een kleine, compacte auto
Laadtijd:	6-8 hr
Voordelen:	Betrouwbaarheid, duurzaamheid en goede onderhouds- en recyclingvoorzieningen.

Een loodaccu bestaat uit een bak van polypropyleen, waarin zich een hoeveelheid platen bevindt, waartussen zwavelzuur aanwezig is. Deze platen bestaan uit lood met een antimoon- of cadmiumlegering. Een accu in een conventionele personenauto-accu weegt 12 tot 16 kilo, waarvan ca. 35 gew% lood en 45 gew.% loodpasta is [Afzetdocumenten, 2000].

In een elektrische personen- of bestelauto met loodaccu's kan het totale accugewicht oplopen tot ruim 500 kg, bij een stadsbus tot ruim 1.000 kg. De samenstelling van deze accu's verschilt echter niet van de startaccu.

A.1.2 Nickel Cadmium Accu's

Nickel Cadmium accu's (NiCd's) worden al sinds langere tijd toegepast in elektrische auto's. Vergeleken met de loodzuur accu hebben NiCd's circa 30% hogere specifieke energie, en een 2-3 maal zo grote levensduur. De toepassing van NiCd's is echter beperkt gebleven, onder andere omdat ze ongeveer 5x zo duur zijn als loodaccu's, en het gevaarlijke zware metaal Cadmium bevatten.

Kosten:	800 Euro/kWh, 200 Euro/kWh [TNO '97]
Specifieke energie:	50 tot 60 Wh/kg [Cleaner Vehicles Task Force, 2000] (IPTS: 1.000 Wh/kg?)
Specifiek vermogen:	± 50 W/kg
Levensduur:	1.000 – 3.000 cycli
Energie efficiency:	60-85%
Laadeigenschappen:	Een geheugeneffect zorgt voor de eigenschap dat de batterij niet verder kan worden 'geleegd' dan de lading waarbij oplading plaats gevonden heeft. Dit effect kan pas teniet worden gedaan door enkele keren zoveel mogelijk te laden en ontladen.
Laadtijd:	6,5 hr [Saft]
Milieuaspecten:	Cadmium is toxisch

Een NiCd accu bestaat uit een nikkelbevattende anode, een cadmiumbevattende katode en kaliloog (kaliumhydroxide) als elektrolyt. De gemiddelde samenstelling is: 8-20 gew.% cadmium, 10 gew.% nikkel, 33 gew.% kaliloog en verder staal en kunststof [CBS, 1993].

Net als bij de loodzuuraccu's, zal een totaal accugewicht bij een elektrische personen- of bestelauto met NiCd-accu's ruim 500 kg bedragen, bij een stadsbus tot ruim 1000 kg. Een NiCd accu voor een elektrische personenwagen bevat dus zo'n 40-100 kg cadmium en rond de 50 kg nikkel.

A.1.3 Nickel Metaalhydride Accu's

Nikkel Metaalhydride (NiMh) accu's zijn nog volop in ontwikkeling. Er zijn verschillende varianten mogelijk met ieder hun specifieke eigenschappen. Zo worden er specifiek NiMh-accu's ontwikkeld voor elektrische auto's, die naast een lange levensduur een grote energie-inhoud moeten hebben. Andere NiMh accu's worden speciaal ontwikkeld voor hybride voertuigen, waar ook hoger vermogens en snelle laadeigenschappen van belang zijn [Varta, 98]. Dit heeft bijvoorbeeld geleid tot toepassing van NiMh-accu's in de hybride Toyota Prius.



Kosten:	1.200 Euro/kWh
Specifieke energie:	50 tot 60 Wh/kg [Cleaner Vehicles Task Force, 2000] (IPTS: 100 Wh/kg? Saft: 55), 80 Wh/kg [Varta, '98]
Specifiek vermogen:	± 200 W/kg
Levensduur:	500-2.000 cycli
Laadtijd:	11 hr [Saft]
Energie efficiency:	75-80%

De samenstelling van NiMh accu's is vergelijkbaar met NiCd accu's, behalve dat de cadmium elektrode is vervangen door een metaalhydride die waterstof kan opslaan. De samenstelling van deze elektrode kan verschillen, maar het bevat meestal elementen zoals o.a. lanthanum, nikkel, vanadium, zirconium, titanium en mangaan [IEA].

A.1.4 Lithium accu's

De huidige verwachting is dat twee typen lithium accu's de potentie hebben om succesvol te worden toegepast in auto's: de Li-polymeer en de Li-ion accu's. Deze accu's zijn pas sinds kort op de markt, en worden bijvoorbeeld toegepast in videocamera's en dergelijke. Vanwege de vele verschillende typen die op dit moment in onderzoek of ontwikkeling zijn, zijn de volgende gegevens alleen indicatief.

Ook hier richt het onderzoek zich op verschillende accu-ontwerpen die ofwel geoptimaliseerd zijn voor elektrische dan wel voor hybride voertuigen.

Kosten:	2.000 Euro/kWh
Specifieke energie:	tot 200 Wh/kg [IPTS], tot 130 Wh/kg [Varta]
Specifiek vermogen:	± 300 W/kg
Levensduur:	vaak nog een probleem, de meer geavanceerde accu's: > 1.000 cycli
Energie efficiency:	98%

De Li-ion accu's zijn opgebouwd uit een koolstof kathode en een Lithium-metaaloxide anode. Als metaaloxide wordt in kleine batterijen cobaltoxide gebruikt, in accu's voor voertuigen worden vaak goedkopere nikkeloxide of mangaanoxide toegepast [Varta, '98].



B Financiële aspecten van elektrische en hybride auto's

B.1 Meerkosten elektrische auto's

De aanschafkosten van elektrische auto's zijn aanzienlijk hoger dan van conventionele auto's, voornamelijk vanwege de hoge kosten van de accu's. Het gebruik van de voertuigen is wel vaak goedkoper omdat de energiekosten per kilometer lager zijn dan de brandstofkosten die voor conventionele auto's moeten worden gemaakt. Als echter na enkele jaren de accu's moeten worden vervangen, is opnieuw een grote investering nodig.

Een overzicht van de huidige meerkosten van elektrische auto's wordt gegeven in [Cleaner Vehicles Task Force, 2000].

Een aantal praktijkvoorbeelden laten zien dat de aanschafkosten tussen de 50 en 100% hoger liggen dan vergelijkbare conventionele auto's. Batterijen kunnen vaak geleast worden, tegen jaarlijkse kosten van zo'n £600-700, of rond de 0,06-0,07 £/km. Al met al worden de meerkosten over de totale levensduur geschat op zo'n 32-54%, al is de basis voor deze berekeningen nog vrij beperkt.

Naast de kosten voor de voertuigen, moeten er nog kosten gemaakt worden voor de laadstations. Een gewoon stopcontact voldoet, maar zal niet altijd aanwezig zijn.

B.2 Meerkosten hybride auto's

Ook hybride auto's zijn op dit moment nog aanzienlijk duurder dan conventionele voertuigen. Deze auto's zijn pas sinds kort op de markt, en dienen in veel gevallen nog als testvoertuigen om ervaring op te doen. De huidige verkoopprijs van bijvoorbeeld de hybride versie van de Toyota Prius in Japan was ongeveer £2,750 hoger dan een vergelijkbare conventionele auto, maar het is zeer de vraag of deze meerprijs de meerkosten dekt [Cleaner Vehicles Task Force, 2000]. In Nederland is de prijs van de Prius te vergelijken met die van een conventionele auto, doordat voor de Prius geen BPM hoeft te worden betaald. Naast hogere aanschafkosten moeten ook onderhoudskosten worden meegenomen in de overwegingen. Hierover is nog zeer weinig bekend. In elk geval moet er ook bij hybriden rekening gehouden worden met regelmatige vervanging van het accupakket.

Tegenover de hogere aanschafkosten staat een brandstofbesparing van maximaal 30%, afhankelijk van het systeem en het aandeel stadsritten in het totaal. De Britse overheid heeft berekend dat de meerkosten van een hybride auto zo'n 50% bedragen, over de totale levensduur van de auto.

Op dit moment staat de hybride auto nog duidelijk in de kinderschoenen, wat een vergelijking met de conventionele automarkt moeilijk maakt. De eerste serieproductie-hybride is pas sinds kort op de Nederlandse markt, en een groeiend aantal autofabrikanten kondigt aan, de komende jaren een hybride voertuig te introduceren. Door onderzoek en groeiende productieaantallen zullen de meerkosten per voertuig ongetwijfeld afnemen, maar de snelle

ontwikkelingen maken het moeilijk om tot een bruikbare schatting van de meerkosten in 2005 te komen.

B.3 Financiële voordelen elektrische en hybride auto's

Tegenover de hogere aanschafkosten van BEV's en HEV's zijn de energielasten een stuk lager dan bij vergelijkbare auto's met een verbrandingsmotor. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de efficiëntere werking van de aandrijflijn, anderzijds kan de energie die nodig is om de accu's op te laden uit het elektriciteitsnet gehaald worden, wat relatief goedkoop is. Deze energie is per kWh goedkoper dan vloeibare brandstof bij de pomp, waar een hoge accijns op moet worden betaald.

Daarnaast zijn de heffingen op BEV's en HEV's aanzienlijk lager dan op conventionele voertuigen. Op dit moment zijn BEV en HEV voertuigen vrijgesteld van de bijzondere belasting op personenauto's en motoren (BPM), die bijna 1/3^{de} van de aankoopkosten kan bedragen¹⁵. Voor deze voertuigen hoeft ook geen motorrijtuigenbelasting (MRB) betaald worden, een voordeel van tussen de f 500,00 tot f 1.500,00 per jaar.

¹⁵ De BPM is vastgesteld op 45,2% van de netto catalogusprijs, min.



C Emissies en energiegebruik accurecycling

C.1 Loodaccu's

Afgedankte loodaccu's uit elektrische voertuigen zullen naar verwachting voor 100% kunnen worden ingezameld ten behoeve van hergebruik. Momenteel wordt al 90% tot 95% van de vrijkomende reguliere loodaccu's uit voertuigen ingezameld. Verwacht wordt dat dit percentage voor accu's uit elektrische voertuigen alleen al vanwege het gewicht van het accupakket nog hoger zal zijn.

Herverwerkers van loodzuur accu's zijn grofweg onder te verdelen in twee categorieën:

- herverwerkers, die shredderen (proces van Metal Blanc);
- herverwerkers, die de integrale batterij verwerken (proces van Campine).

Herverwerking met shredderen

Bij shredderen wordt de accu gemalen en wordt het vaste materiaal uit de accu gescheiden in PP, loodelektroden, zwavelzuur, pasta en overig vast materiaal. PP wordt afgezet bij herverwerkers.

Het overige vaste materiaal is finaal afval. Bij een enkele herverwerker (bijvoorbeeld Berzelius Metal GmbH) wordt deze reststroom in een eigen aparte, verbrandingsinstallatie benut voor het opwekken van procesenergie. Bij andere herverwerkers (bijvoorbeeld voormalige installatie van Billiton in Arnhem) wordt het materiaal bij derden afgezet voor verwerking

Massief lood wordt omgesmolten. Pasta (PbSO_4) wordt of samen met massief lood direct omgesmolten of wordt eerst ontzwaveld door reactie met Na_2CO_3 . Daarbij wordt afzetbaar Na_2SO_4 gevormd. De verdere verwerking van zwavelzuur hangt af van de verwerking van de pasta. Wanneer ontzwaveling van pasta wordt toegepast, wordt het zwavelzuur meestal ook omgezet in Na_2SO_4 . Bij direct omsmelten van pasta wordt het zwavelzuur elders afgezet voor hergebruik of geneutraliseerd met kalk, waarna het gevormde CaSO_4 wordt gestort.

Metallisch lood (de elektroden) en pasta worden in een draaitrommeloven gesmolten onder toevoeging van cokes, soda (Na_2CO_3) en ijzer. Het smelten vindt batch-gewijs plaats. Cokes dient als reductiemiddel, soda wordt toegevoegd om zwavel te binden en ijzer dient als fluxmiddel bij de vorming van slak en voor het binden van zwavel. De oven wordt ondervuurd met aardgas. Door toevoeging van soda wordt minstens 98% van het in de pasta aanwezige zwavel gebonden in de slak.

In de oven gevormd ruw lood (bullion) en slak worden apart afgetapt. De slak wordt gestort. De afgassen worden gereinigd met een doekfilter, afgevangen vlieggas wordt teruggevoerd naar de oven.

Het ruwe lood wordt in een aantal stappen ontdaan van andere metalen en verontreinigingen. Gezuiverd en eventueel gelegeerd lood wordt vervolgens gegoten tot ingots. Bij raffinage vrijkomende slak (dross) en vlieggas worden teruggevoerd naar de draaitrommeloven.

Bij Metal Blanc komen bij dit proces de volgende emissie vrij (zie Tabel 4).

Tabel 4 Emissies naar compartimenten lucht, water en bodem voor Métal-Blanc (uit opname van 1999)

emissies lucht			kwaliteit binnenlucht		gemiddeld		volume binnenlucht		totaal
rookgas	87500 Nm ³ /h								
stof	2	mg/Nm ³							
Pb	0,06	mg/Nm ³	60 - 2000	10 ⁻⁶ g/m ³	500	10 ⁻⁶ g/Nm ³	60000	Nm ³	30 g
Hg	0,01 - 0,02	mg/Nm ³							
Cd	0,01 - 0,02	mg/Nm ³							
As	0,01 - 0,02	mg/Nm ³							
Sn	0,01 - 0,02	mg/Nm ³							
Sb	0,01 - 0,02	mg/Nm ³							

Indien lekkagefactor 0,175 Nm³/h is, zijn de diffuse emissies hoger dan rookgasemissies

emissies water na zuivering		
Pb	0,2	mg/l
Cd	500	mg/l
SO ₂	500	mg/l
emissies naar bodem*		
Pb	> 500	mg/kg

* concentratie voor 2 hectares tussen 0 en 0,1 m diepte.

Een belangrijke opmerking is de potentiële invloed van diffuse emissies op de totale milieubelasting van het bedrijf. De loodconcentratie in de lucht van de werkruimte van Métal-Blanc kan immers leiden tot extra vervuiling indien lekkage plaatsvindt. Dit is echter niet makkelijk te meten, maar kan wel ingeschat worden. In de hieronder gepresenteerde berekening (zie Tabel 1) zou een lekkage van ca. 1/6 van het totale luchtvolume van de binnenwerkruimte per uur voldoende zijn om meer loodemissies naar de lucht te veroorzaken dan de loodemissies via de rookgassen. Een dergelijke lekkage is gering op een fabriek. Dat wil zeggen dat de diffuse emissies een relatief grote bijdrage leveren aan de totale milieubelasting, die met directe metingen niet makkelijk waar te nemen is.

Herverwerking zonder shredderen

Bij integrale verwerking van accu's wordt de accu bij aflevering en bij bedrijfsinterne overslag ruw behandeld, met als doel om de behuizing te breken zodat zwavelzuur kan wegstromen. De accu's worden bijvoorbeeld van grote hoogte op een vloer gestort, waardoor de behuizing meestal breekt. Het zwavelzuur wordt elders afgezet voor hergebruik of geneutraliseerd met kalk.

De gehele accu wordt vervolgens in een hoogoven gestort en verwerkt tot metallisch lood. Cokes wordt toegevoegd als reductiemiddel. De kunststof behuizingen en andere kunststof en rubberen onderdelen dienen als secundaire reductiemiddelen. IJzer wordt toegevoegd om zwavel te binden. Als flux wordt kalksteen toegevoegd. Het ruwe lood wordt vervolgens in meerdere stappen geraffineerd (ontdaan van verontreinigingen).

De afgassen van de hoogoven worden in een thermische naverbrander behandeld om resterende koolmonoxide en organische verbindingen af te breken en om te zetten in waterdamp en kooldioxide. Daartoe wordt aardgas in de rookgassen verbrand, zodat de temperatuur toeneemt tot circa 1.100°C. De rookgassen worden vervolgens afgekoeld en samen met de afgassen van de raffinagestappen gereinigd met een doekfilter. De afgevangen vlieggas wordt teruggevoerd naar de hoogoven.



De slak wordt grotendeels teruggevoerd. Circa 5% moet worden onttrokken aan het proces. In de slak achtergebleven lood is aanwezig in de vorm van loodsulfide. Het is mogelijk de loodverbinding als matte af te scheiden van de rest van de slak door gecontroleerd koelen. De rest van de onttrokken slak is inert en kan worden gebruikt als funderingsmateriaal in de wegenbouw.

Emissies bij recycling

In [IEA], een studie van de International Energy Agency naar de milieueffecten van elektrische voertuigen worden cijfers gepresenteerd met betrekking tot de vervuiling bij productie en recycling van verschillende soorten voertuigaccu's. Deze cijfers zijn gebaseerd op een levenscyclusanalyse van loodzuur accu's van elektrische voertuigen, uitgevoerd door Koontz [Koontz, '93] voor de Verenigde Staten.

Bij de productie en recycling van loodzuuraccu's zijn vooral emissies van lood, antimoon en arseen gevaarlijk. Lood is neurotoxisch en vermoedelijk kankerverwekkend, antimoon en arseen zijn beide toxisch, en arseen is daarnaast kankerverwekkend. Blootstelling van de arbeiders aan deze stoffen en het vrijkomen in de omgeving moet daarom voorkomen worden. De door Koontz berekende emissies van deze stoffen zijn gegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Hoeveelheden lood, antimoon en arseen die vrijkomen bij productie en recycling van loodzuur accu's [IEA, 1999]

Emissies [kg/kWh]	Lucht	Water	Land
<i>Productie</i>			
Lood	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-5}$	sporen
Antimoon	$3,8 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-7}$	sporen
Arseen	$5,0 \times 10^{-9}$	$4,2 \times 10^{-9}$	sporen
<i>Recycling</i>			
Lood	$1,6 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-2}$
Antimoon	$4,2 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-4}$
Arseen	$1,0 \times 10^{-6}$	$9,9 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-4}$

Het grootste milieuprobleem bij NiCd batterijen is het toxische zware metaal cadmium. Hoewel cadmium onschadelijk is zolang het in de batterij zit opgesloten, kan het vrijkomen tijdens de productie en recycling van de batterij. Daarnaast moet de emissie van nikkel, ook een zwaar metaal, worden voorkomen.

De emissies van toxische stoffen bij productie en recycling zijn vrij beperkt, volgens [IEA, 1999], dat zich baseert op een studie door Morrow en Cook, 1996, zie Tabel 6.

Tabel 6 Emissies die vrijkomen bij productie en recycling van NiCd accu's [IEA, 1999]

Emissies [kg/kWh]	Lucht	Water	Land	Totaal
<i>Productie</i>	$2,2 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$
<i>Recycling</i>	$1,9 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$

NiMh accu's leveren een betere prestatie dan NiCd accu's, terwijl het weglaten van het toxische cadmium ook nog duidelijke milieuvoordelen oplevert. Toch zijn elektrische voertuigen met dit type accu's volgens de milieuregels van de Europese Unie ook gevaarlijk afval [IEA, 1999].

Er zijn echter geen aanwijzingen dat bij de productie, het gebruik of het eventueel recyclen van deze accu's gevaarlijke stoffen vrijkomen. Recycling zal hoogstwaarschijnlijk bij hoge temperaturen plaats vinden, wat energiegebruik met zich mee zal brengen.

De lithium accu is een relatief nieuwe ontwikkeling, waarvan de gegevens over emissies bij productie en recycling (nog) niet bekend zijn. Omdat deze accu's nog volop in ontwikkeling zijn, is het moeilijk om uitspraken te doen over de milieu en veiligheidsaspecten ervan. De gebruikte materialen zijn in elk geval minder toxisch dan de zware metalen uit de ander accu's. Aangezien er nog geen recyclingsfaciliteiten zijn voor deze accu's, kunnen we aannemen, dat de afgedankte accu's als afval worden gestort.

Naast deze emissies van toxische en kankerverwekkende componenten van de accu's, is ook energie nodig voor het productie- en recyclingproces. Het recyclingproces van loodzuuraccu's, bijvoorbeeld, is gebaseerd op verhitting tot 1.200°C. Een overzicht van het energiegebruik en de emissies die optreden bij de productie en recycling van enkele veel voorkomende soorten accu's, is gegeven in [IEA, 1999], en is gegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Emissies en energiegebruik tijdens de productie en recycling van batterijen voor elektrische voertuigen [IEA, 1999]

Emissie [g/kWh]	Loodzuur	NiCd	NiMh	Lithium Polymeer
CO ₂	50.000	170.000	120.000	101.000
SO _x	180	480	340	800
NO _x	58	170	121	60
HC	160	370	260	-
CO	30	70	50	30
Energie [kWh]	1.000	2.900	2.100	2.000
Energiedichtheid [Wh/kg]	35	50	70	135
Levensduur: aantal cycli	600	1.750	800	1.000

De gegevens van loodzuur en NiCd accu's zijn gebaseerd op een studie van het Duitse Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), die zowel de emissies van de productie als ook van de recycling hebben meegenomen. De gegevens over de NiMh en lithium polymeer accu's is uit een andere, minder uitgebreide studie overgenomen [Garcia, 1996], waar de recycling emissies van de lithium polymeer batterijen niet waren meegenomen wegens gebrek aan data.

De gemiddelde jaarlijkse emissies van de verschillende types accu voor een elektrische personenauto zijn samengevat in Tabel 8. Hierbij is uitgegaan van bovenstaande gegevens, een gemiddelde accucapaciteit van zo'n 12 kWh per voertuig [TNO, '97], en een levensduur van de accu's gebaseerd op 200 cycli per jaar.



Tabel 8 Gemiddelde jaarlijkse emissie van accu's van 12 kWh

Emissie [gram]	Loodzuur	NiCd	NiMh	Lithium Polymeer
CO ₂ [kg]	150	250	360	242
SO _x [gram]	720	720	1000	1900
NO _x [gram]	232	255	363	144
HC [gram]	640	555	780	-
CO [gram]	120	105	150	70
Energie [kWh]	4.000	4.300	6.300	4.800
Levensduur [jaar]	3	8	4	5