

## Navorsings- en oorsigartikels

# Die Zebra-battery - 'n Suid-Afrikaanse aanspraakmaker in die elektriesevoertuigbedryf

J. Coetzer en M.J. Nolte\*

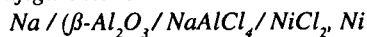
Zebra Power Systems, Posbus 7255, Hennopsmeer, 0046

Ontvang 2 Januarie 1996; aanvaar 8 Februarie 1996

### UITTREKSEL

*Die Zebra-battery is 'n sterk aanspraakmaker daarop om voor die einde van die eeu wêreldwyd die energiebron van elektriese voertuie te word. Dit is 'n Suid-Afrikaanse ontwikkeling wat by die Wetenskaplike en Nywerheidsnavorsingsraad (WNNR) begin het en tans deur die Anglo American Korporasie van S.A. en die Duitse maatskappy, A.E.G., bestuur word.*

*Die selreaksie vind plaas tussen gewone tafelsout en nikkeltaal tydens die laaiproses om natriummetaal en nikkelsel te vorm. Die selkonfigurasie is:*



*en werk tussen 270 en 350 °C. 'n Silindriese selontwerp word gebruik, waar die katodiese poeiermengsel met 'n stroomgaarder binne die vaste elektroliet-keramiekbuis ingelaai en met vloeibare elektroliet gevul word. Tussen die keramiekbuis en selomhulsel word die vloeibare natrium tydens die laaiproses gevorm. Die sel word van die atmosfeer afgesluit deur 'n glas-alumina-nikkel-seël.*

*'n Sel met 'n oopstroomspanning van 2,58V funksioneer normaalweg in die spanningsgebied tussen 1,6V en 2,9V. Die natriumaluminiumchloried-elektroliet tree op as buffer teen oorlading of oorontlading, deurdat of aluminium (by 1,58V), of natrium (by 3,05V) gevorm word. As die keramiekbuis sou breek, reageer die natrium en natriumaluminiumchloried direk met mekaar. Aluminium word gevorm, die sel sluit kort na nulspanning en 'n onbeduidende weerstand.*

*Die batteryhouer het 'n dubbele buitewand wat geëwakuëer is om die hitteverlies van binne (300 °C) na buite (30 °C) te beheer. Die interne temperatuur word bereik deur verhittelemente in 'n statiese toestand te gebruik. Gedurende ontlading voorsien die battery self hitte as gevolg van verhoogde interne weerstand.*

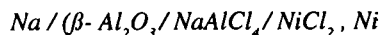
*Zebra-batterye word al etlike jare in verskillende omstandighede getoets en die groeiende statistiek is baie bemoedigend. 'n Mercedes Benz-motor het reeds 100 000 km gedurende drie jaar op Duitse paaie afgelê en die battery is al meer as 1000 keer gelaai. In 'n ongeluksituasie hou die batteryhouer en selomhulsel die hoëtemperatuureffekte van die chemiese reaksie in toom en min lekkasie vind plaas. Die battery is bewys as veilig en betroubaar en het van al die batterytipes wat vir voertuigaandrywing oorweeg word, een van die heel beste rekords.*

### ABSTRACT

#### **The Zebra Battery: a South African contender for electric vehicle application**

*The Zebra battery is one of the most promising power sources for electric vehicles which might be on sale before the year 2000. It is a South African development which started at the CSIR and is at present jointly managed by the Anglo American Corporation of S.A. and the German company A.E.G.*

*The chemical reaction converts common salt and nickel to nickel chloride and sodium during the charging phase. The cell configuration is*



*and operates between 270 and 350 °C. The positive electrode, containing a central current collector, is located inside the cylindrical solid electrolyte beta alumina tube. A second liquid electrolyte is impregnated into the porous cathode mixture. Liquid sodium is formed between the cell casing and the ceramic tube during charging. The seal which isolates the electrode compartments from the atmosphere, utilizes a glass-alumina-nickel component.*

*At 2,58V OCV (open circuit voltage), cell voltages range between 1,6V and 2,9V. Sodium aluminium chloride offers an overcharge and overdischarge mechanism. Reduction to aluminium (at 1,58V) or sodium (at 3,05V) are the possible secondary reactions. In case of fracture of the beta alumina tube, the two liquids, sodium and sodium aluminium chloride, will react. Formation of aluminium causes a short circuit and the electrochemical cell changes into an electrical conductor.*

*Thermal control by the battery box with its vacuum insulated double wall, maintains an internal temperature of 300 °C compared to an external temperature of 30 °C. Heat is supplied by a built-in electrical heating system when on operational standby, and when in operation, by internal resistance increases.*

*The growing volume of statistics gleaned from various tests, is quite encouraging. Zebra batteries installed in converted Mercedes Benz 190 saloon cars, have been tested on public roads in Germany. One of these cars has been driven for more than 100 000 km during a period of three years and has undergone more than 1000 charging cycles. When electrode materials are forced into contact, such as in an accident, the heat generation inside the battery is contained by the thermal insulation and no sodium escapes. The battery has proved to be safe and reliable and of the various battery types boasts one of the best records.*

\* Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word

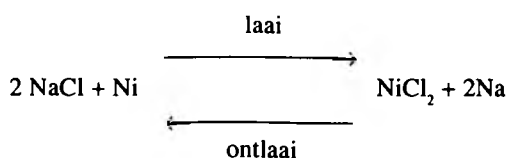
## 1. INLEIDING

Die Zebra-battery het sy bestaan te danke aan 'n verskeidenheid faktore wat gelyktydig 'n invloed op die navorsingsontwikkeling uitgeoefen het. Gedurende die sewentigerjare is daar by die WNNR begin om meer klem te plaas op toegepaste eerder as basiese navorsing. In dié tyd het die Afdeling Elektrometallurgie binne die destydse Nasionale Fisiese Navorsingslaboratorium (NFNL) ontstaan onder die leiding van dr. Johan Coetzer met as mikpunt om hoë-energie-digtheid elektrochemiese selle te ontwikkel waaruit allerlei nywerheidstoepassings kon spruit. Gelyktydig hiermee het die wêreld etlike oliekrisis beleef en Suid-Afrika veral is grootliks geraak deur die oliesanksies. Dit was 'n tyd van geweldige skommelings in brandstofpryse, verskillende maatreëls om brandstof te bespaar en groot belangstelling in alternatiewe brandstowwe of ander energiebronne. Dit was ook in dié jare dat 'n "groen" wêreldbewussyn ontstaan het, asook drukgroepe wat begin aandring het op oplossings vir verskillende vorms van mensgemaakte besoedeling, onder andere die toenemende volume van motoruitlaatgasse. Die omstandighede was dus bevorderlik vir gunstige belangstelling van ontwikkelaars in 'n belowende elektrochemiese sisteem met die potensiaal om oplossings te bied vir bestaande probleem-situasies. Alhoewel dit nie noodwendig die aanvanklike mikpunt was nie, het dit mettertyd begin duidelik word dat die Zebra-battery 'n moontlike kandidaat vir elektriese voertuigaandrywing kon wees.

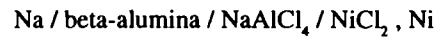
Die projek het deur verskeie ontwikkelingsfasies gevorder. Dit het begin as 'n gewone navorsingsprojek by 'n afdeling van die WNNR en gegroei tot 'n onderneming met ruimer befondsing en onder die gesamentlike beheer van Saidcor (namens die WNNR), die Anglo American Korporasie en De Beers. Kontrakinsette is ook gelewer deur buitelandse en ander plaaslike instansies. Die akroniem ZEBRA dateer uit hierdie tydperk en is saamgestel uit Zeolite Battery Research Africa. Vandag verteenwoordig Zebra Power Systems die Suid-Afrikaanse been van 'n veel groter internasionale onderneming wat deur die Anglo American Korporasie tot stand gebring is. Daar bestaan ook tans 'n samewerkingsooreenkoms met maatskappye in Duitsland. Hierdie konsortium is besig om op 'n groot skaal batterye op aanvraag te vervaardig by 'n gesamentlike loodsaanleg in die buiteland en dit beskikbaar te stel aan verskillende motormaatskappye vir toetsdoeleindes. Die aktiwiteit begin nou saamval met die naderende 1998-keerderdatum in die Amerikaanse staat Kalifornië wanneer 2% van alle nuwe motorverkope slegs met emissievrye aandrywingstelsels toegerus mag wees om lugbesoedeling te beperk. Markklaar elektriese voertuie sou, indien beskikbaar, die 2%-aandeel kon opraap. Die groot vraag is dus of die Zebra-battery sy vurige en ontombare naamgenoot in die diereryk waardig sal kan wees.

## 2. SELREAKSIE

Die chemiese reaksie vind plaas tussen gewone tafelsout en nikkelmetaal tydens die laaiproses om natriummetaal en nikkelchloried te vorm. Die omgekeerde reaksie verloop as die sel ontlai word.



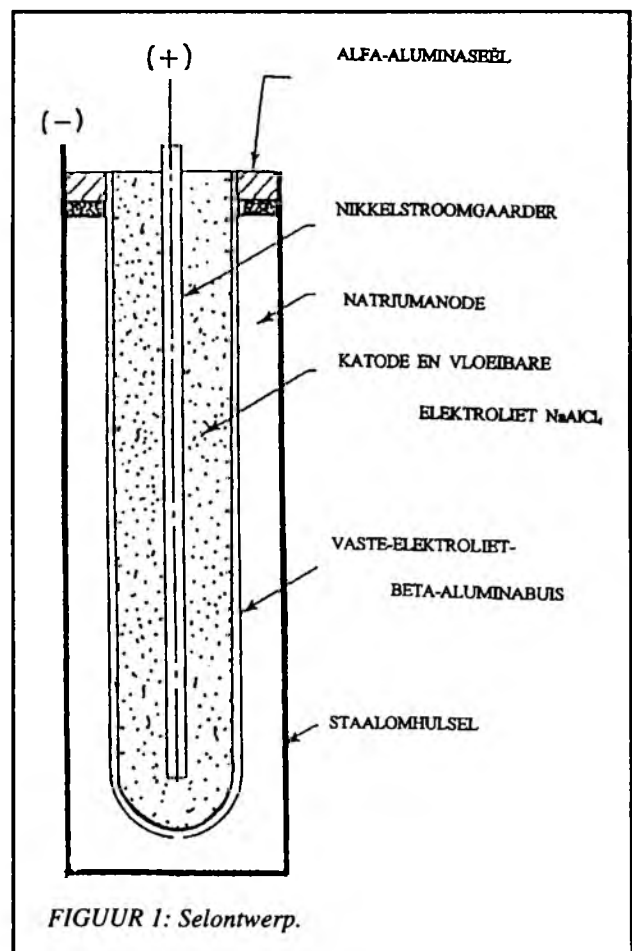
Die twee elektrodes  $\text{NiCl}_2$  en Na word van mekaar geskei deur 'n beta-alumina keramiese elektroliet ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) wat natriumione maar nie elektrone nie, gelei. Vir goeie kontak tussen die soliede nikkelchloried en beta-alumina, word gebruik gemaak van neutrale natriumaluminiumchloried ( $\text{NaAlCl}_4$ ) wat bokant  $154^\circ\text{C}$  smelt. Die ioniese weerstand van beta-alumina is egter hoog by hierdie temperatuur sodat die voorkeurgebied vir 'n werkende sel tussen  $270^\circ\text{C}$  en  $350^\circ\text{C}$  is. Natriummetaal is ook onder hierdie omstandighede vloeibaar. Die selkonfigurasie kan dan geskryf word as :



Nikkel is nie die enigste metaal wat geskik is vir 'n elektrochemiese koppel nie. Die aanvanklike ontwikkelingswerk is trouens met ysterkatodes gedoen<sup>2</sup> en is weens finansiële oorwegings verkieslik bo nikkel. Yster se oopstroomspanning is egter laer as dié van nikkel (2,35V in vergelyking met 2,58V) en vorm energeties 'n swakker kombinasie. Daarby is ysterselle nie so robuust soos nikkel-selle by langdurige hoë temperature ( $>370^\circ\text{C}$ ) en hoë spannings ( $>2,75\text{V}$ ) nie. Daarom word hoofsaaklik nikkel in die huidige proses gebruik.

## 3. SELONTWERP

'n Skematiese voorstelling van 'n Zebra-sel word in figuur 1 getoon. Die negatiewe natriumelektrode is aan die buitekant van 'n beta-aluminabuis. Binne dié vaste elektroliet is die positiewe elektrode wat in die selmonteringsfase 'n mengsel is van nikkel en sout. Die poreuse poeiermatriks word in die sel volledig versadig met gesmelte  $\text{NaAlCl}_4$ -elektroliet. 'n Nikkelstroomgaarder is in die katode gesentreer en neem normaalweg nie aan die selchemie deel nie. Gevolglik ontstaan



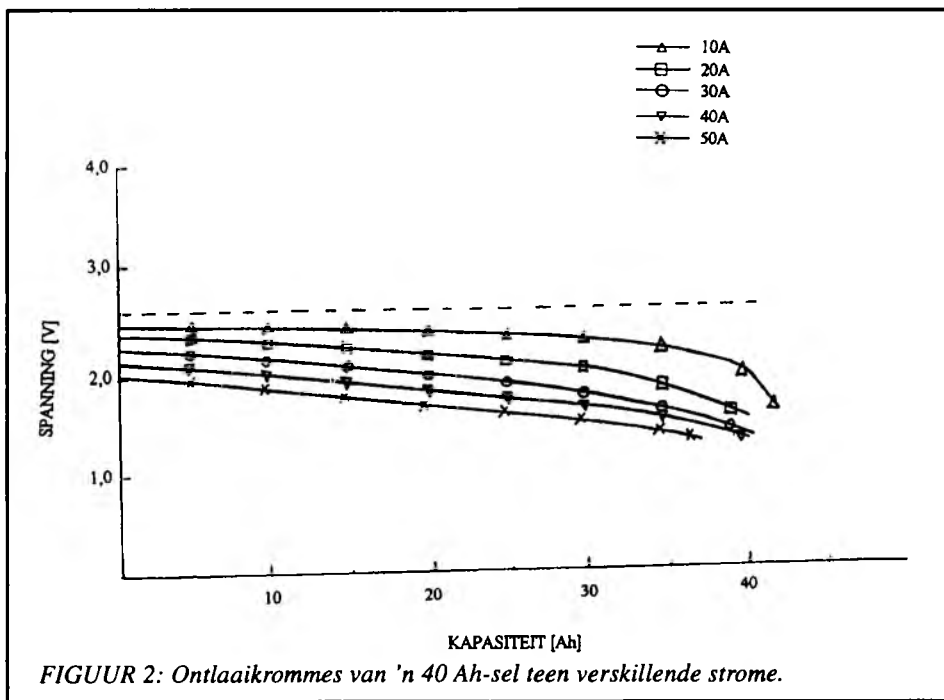
daar ook nie korrosieprobleme nie. Elektriese kontak word bewerkstellig met die selomhulsel van sagte staal met behulp van die vloeibare natrium wat 'n dun laag vorm dwarsoor die hele keramiekbuis deur die gebruik van wigplaatjies wat volledige benutting aan die negatiewe kant (anode) verseker. Aan die positiewe kant is die metaalstroomgaarder weer in verbinding met saamgepakte nikkelmetaalpoeier waarvan uiters 30% gechlloreer kan wees na 'n volledige laaifase. Die oorblywende 70% metaalpoeier tree op as 'n elektriesgeleidende ruggraat. Massa- en ladingoordrag tussen die beta-aluminabuis en die katodemengsel word bewerkstellig deur middel van natriumkatione wat deur  $\text{NaAlCl}_4$  as tussenganger migreer. Die seël wat die anode- en katodekompartemente van mekaar en van die atmosfeer isoleer, word vervaardig deur die termiese samepersing van nikkel op 'n alfa-alumina-substraat. Die alfa- en beta-aluminakomponente word met behulp van glas aan mekaar gesinter, terwyl die metaal-

gedeeltes deur sweistegniek verseël word. Die voltooide Zebra-sel is hermeties afgesluit en onderhoudvry.

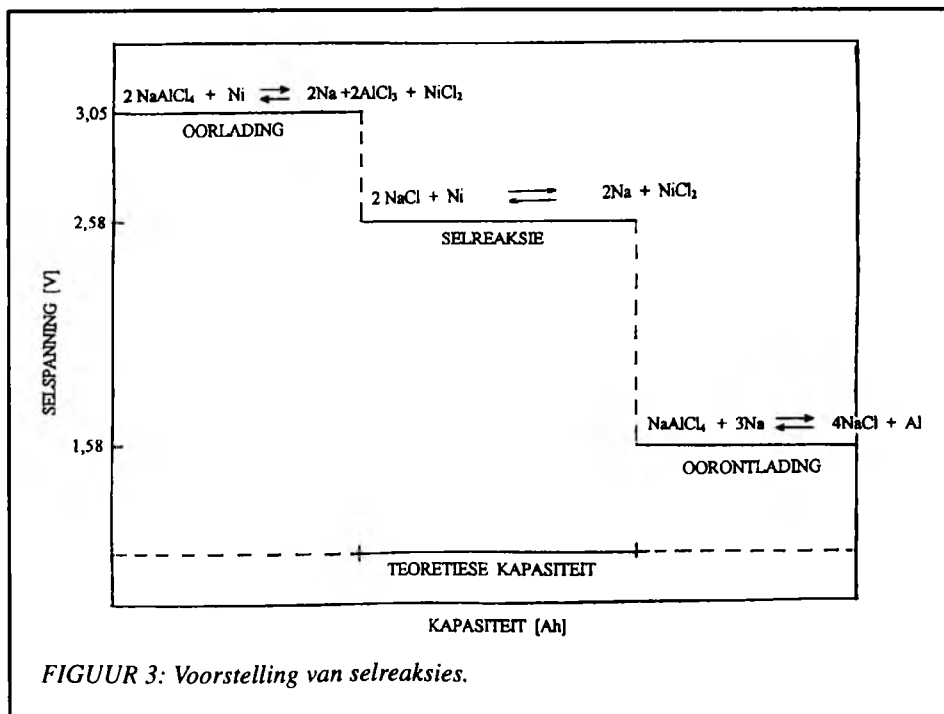
**4. WERKVERRIGTING EN EIENSKAPPE**

Tydens die laai- én ontlaai-prosesse begin die chemiese reaksie by die beta-alumina-oppervlak en beweeg na die middel van die katode. 'n Steeds groeiende ring van gereageerde materiaal word dus buite-om die katode gevorm en daarmee saam verhoog die selweerstand. Die vorm en afmetings van die katodeprofiel het 'n groot invloed op die drywing en energie-inhoud van elke sel en word beplan volgens die funksie van die battery. Selgroottes wat wissel van 100 tot 500 Wh is al vervaardig en getoets. Kenmerkende ontlaaikrommes teen verskillende strome vir 'n 40 Ah-sel word in figuur 2 geïllustreer.

Die spanningsgebied waarbinne die sel funksioneer, word in figuur 3 uiteengesit. Hieruit blyk dit dat selle oor 'n



FIGUUR 2: Ontlaaikrommes van 'n 40 Ah-sel teen verskillende strome.



FIGUUR 3: Voorstelling van selreaksies.

ingeboude buffer teen oorlading en oorontlading beskik. Wanneer 'n sel se normale kapasiteit ontlai is (dit wil sê al die beskikbare nikkelchloried gereduseer is), kan die proses steeds voortgaan deurdat die  $\text{NaAlCl}_4$ -elektroliet ontbind word met die vorming van aluminium. Dié reaksie word dan gekenmerk deur 'n spanningsverandering vanaf 2,58V na 1,58V. Wanneer al die natrium in die anode gereageer het, sal die keramiekbuis breek as gevolg van die hoëstroom-konsentrasie, maar weens die teenwoordigheid van gedeponeerde aluminium sal die sel steeds geleidend bly. Dit is 'n belangrike eienskap in battery-ontwerp, want dit laat toe dat selle in lang seriekettings in 'n battery verbind kan word. 'n Sel wat in dié opsig faal, verminder die batteryspanning, maar onderbreek nie die stroombaan nie. Aan die ander kant word selle teen oorlading beskerm, ook deur die teenwoordigheid van  $\text{NaAlCl}_4$ . In hierdie geval vind verdere oksidasie van nikkel plaas by 3,05V met die vorming van nog natrium in die anode. Dit veroorsaak dat die neutrale ekwimolare  $\text{NaAlCl}_4$  suur word as gevolg van 'n oormaat aluminiumchloried wat vir die sel nadelig is. Sulke situasies ontstaan egter gewoonlik deur foutiewe instrumente en die selle se vermoë om 'n periode onder ongunstige omstandighede te oorleef, beteken dat daar dan wel 'n geleentheid is om 'n fout reg te stel, sonder om al die selle prys te gee. Dit is nie alleen belangrik vir die navorsers nie, maar veral ook vir die motoris!

## 5. BATTERYKENMERKE

Om praktiese spannings en kapasiteite te verkry vir voertuigaandrywing, word etlike honderde selle benodig wat saam in die temperatuurgebied 270 °C tot 350 °C funksioneer. Die selle word vertikaal in 'n termies geïsoleerde batteryhouer gepak om temperatuurverliese te beperk. Die buitekant van die battery oorskry nie 30 °C nie, terwyl die binnetemperatuur wat deur verhittelemente in stand gehou word, omtrent 300 °C is. Selfs wanneer die elemente afgeskakel word, verminder die interne temperatuur stadig en verloop etlike dae voor volledige afkoeling. As die battery in die tussentyd gebruik word, neem die temperatuur weer toe as gevolg van die hitte wat tydens die ontlaiingsproses vrygestel word. Batterie kan afgekoel en opgewarm word sonder nadelige effekte en sonder dat die battery se leeftyd beïnvloed word.

Batteryspesifikasies kan grootliks varieer, maar vir kompeterende elektriese voertuigaandrywing bestaan daar sekere drempelwaardes. Die reikafstand van 'n voertuig hou verband met die energie-inhoud van sy battery. So is daar reeds in die tagtigerjare afstande van 250 km met 'n 50 kWh-battery<sup>3</sup> behaal en 230 km met 'n 40 kWh-battery teen snelhede tussen 50 en 80 km/u. Die ander belangrike kriterium vir 'n battery is die drywing wat versnelling teen steiltes moontlik maak. Om met 'n moderne, ligte petrol-aangedrewe voertuig te kompeteer, word 'n drywingsdigtheid van 100 W/kg-battery as die minimum vereiste deur motormaatskappye gevra. Laboratoriumtoetse van enkel selle en verskillende groottes batterye duur al etlike jare; tydens die toetse word die selle onafgebroke gelaai en ontlai en duisende siklusse word in vier jaar voltooi. Ook voertuigtoetse word onderneem en meer as 60 batterye word tans op verskillende plekke wêreldwyd en in verskillende voertuie getoets. 'n Mylpaal is vanjaar bereik toe 'n Mercedes Benz 190-model die 100 000 kilometer kerf verbygesteek het na drie jaar se konstante normale gebruik op die paaie tussen Stuttgart en Ulm in Duitsland. Gedurende hierdie tydperk

het die battery meer as 1100 laai- en ontlaiingsiklusse ondergaan. Die reikwydte is ongeveer 160 km en 'n maksimumsnelheid van 130 km/u is behaal. Dit beskik oor 'n 17 kWh-battery met energie- en drywingsdigthede van 88 Wh/kg en 77 W/kg. Tydens die Olimpiese Spele in Barcelona in 1992, was een van die busse wat deelnemers vervoer het, ook met 'n Zebra-battery toegerus.

## 6. VEILIGHEIDSASPEKTE

Die beweeglikheid van 'n pertolvoertuig is te danke aan die hoë energie wat uit die verbrandingsproses in die enjin verkry word. Die gepaardgaande gevaar is natuurlik dat in onbeheerde toestande petrol aan die brand kan slaan. 'n Soortgelyke situasie bestaan by hoë-energiesdigtheid-batterie. Die materiale wat gebruik word, mag op hulle eie of in kombinasie met mekaar potensieel gevaarlik wees. Dit is een van die grootste nadele van die natrium-swaelsisteme wat vir baie jare as die eerste aanspraakmakerbattery vir elektriese voertuie beskou is. Die beter veiligheid van die Zebra-battery is juis een van sy vernaamste voordele.

Daar is alreeds gemeld dat in gevalle van oorlading of oorontlading, die selchemie in 'n groot mate moontlike katastrofes verhoed, bloot deur 'n sekondêre chemiese reaksie. As die keramiekbuis uiteindelik breek, reageer die twee vloeistowwe natrium en natriumaluminiumchloried direk met mekaar. Dit is 'n eksotermiese reaksie met stabiele produkte, naamlik natriumchloried en aluminium. Die dampdruk hiervan is laag en dit is nie korroderend nie. Toetse op volgelaide selle toon 'n temperatuurverhoging van tot 400 °C binne 10 minute. Selomhulsels en sweisnate kan egter temperature tot 600 °C oorleef. In geval van 'n botsing, kan selle in hulle geheel oopgebreek word. Die effekte hiervan is in nabootsingstoetse bestudeer waar volgelaide 25 kWh-batterie by 300 °C van 'n 10 m-hoogte is op verskillende versperrings laat val teen 50 km/u. Stomp voorwerpe het batterye erg laat verwring, terwyl 'n meterlange priem die batteryhouer twee derdes binnegedring het. In albei gevalle is die geakkumuleerde battery-energie in hitte omgesit en die interne temperatuur het tot 700 °C gestyg sonder dat chemikalieë uitgelek het. Die effektiewe termiese ontwerp van die batteryhouer het uitwendige temperature goed onder beheer gehou en die reaksie was na 'n uur uitgewoed. Wit rook (bestaande uit soutuurgas en aluminiumhidroksied) was die enigste sigbare gevolg van die "ongeluk". Mercedes Benz C-klas motors is teen 55 km/u trompop (40% oorvleueling) laat bots en teen 50 km/u van agter (50% oorvleueling) sonder nagevolge deur die battery veroorsaak. Die positiewe uitslag van gevorderde veiligheidsstoetse is 'n goeie aanduiding van die intrinsieke veiligheid en betroubaarheid van die Zebra-battery.

## 7. ONKOSTE EN HERWINNING

Die materiale wat vir die vervaardiging van Zebra-batterie nodig is, is alles in groot maat vrylik beskikbaar en hiervan is nikkelmetaal die duurste. Produksiekoste sal grootliks deur die omset bepaal word. Daarom word daar op hierdie stadium hard gewerk aan kostebesparing deur prosesontwikkeling. Sekere selkomponente is tans nog duur omdat gesofistikeerde tegnieke nodig is vir die produksie daarvan. Om 'n vastrapplek in die voertuigmark te verkry, sal elektriese voertuie egter ook teen vergelykbare verkooppriese aangebied moet word.

In 'n wêreld wat deur sy eie afval gepootjie word, is dit belangrik om reeds aan die begin van elke nuwe ontwikkeling te beplan hoe om ook daarvan ontslae te raak. 'n Relatief

eenvoudige herwinningsproses is moontlik vir volledig ontlaaide selle. Die wateroplosbare natriumchloried en natriumaluminiumchloried kan sonder moeite van die nikkelmetaal geskei word. Nikkel, die duurste komponent, kan dan weer in die volgende produksiekringloop teruggevoer word. Dit behoort weer 'n gunstige uitwerking op die koste te hê.

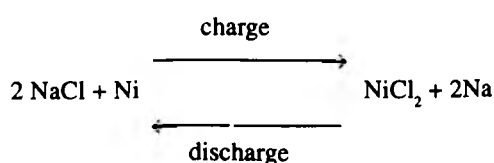
## 8. ANDER BATTERYE

Een van die laaste oorblywende vrae is waar die mededingers met hulle batterye staan. Bekende soorte sluit in: lood-suur; nikkel-kadmium; nikkel-yster; sink-broom en natrium-swael. Die hoë drywings- en energievereistes wat aan 'n battery gestel word in vergelyking met 'n petrolvoertuig, diskwalifiseer egter die meeste hiervan, behalwe natrium-swael wat baie goeie werkverrigting lewer. Die natrium-swael-battery is al dekades lank in 'n ontwikkelingstadium, maar kon tot dusver nog nie bemark word nie. As gevolg van die selchemie is natrium-swael 'n veiligheidsrisiko (by 800 °C is die dampdruk van swael meer as 20 bar) en moet beveilig word deur middel van battery- en selontwerp. Goeie vordering is al hiermee gemaak, maar dié tipe battery sal altyd in beginsel gevaarlik wees bloot vanweë die komponente waaruit dit bestaan. Temperatuurbeheer, korrosie en selfaling in die oopstroomtoestand is die ander groot probleme wat die sisteem kortwiek, ook grootliks op grond van die aard van die anode- en katodemateriale. Die geheim van die Zebra-battery se vinnige vordering en goeie aansprake daarenteen is juis geleë in die verenigbaarheid van die verskillende verbindings. Verbeterings kan veranderings in selontwerp behels of klein aanpassings in chemiese samestelling. Die basiese sel is egter reeds 'n stabiele en betroubare sisteem wat vaste werkverrigting waarborg. Hierdie faktor mag die sleutel wees wat die elektriesevoertuigmark vir die Zebra sal oopsluit.

## SUMMARY

Development of the Zebra battery since 1975 came at the time of the world oil crisis when a new interest was generated in alternative power sources. It all began as a novel research project of the CSIR, into the electrochemical properties of a sodium-iron chloride couple at high temperatures. Over the next decade the Anglo American Corporation and De Beers supported the project and research input was received from abroad as well as locally. At this stage the Zebra acronym was coined, viz. Zeolite Batteries Research Africa. Zebra Power Systems (Pty) Ltd was established in 1983 by the Anglo American Corporation and continues to this day in its research role for the battery project. The main production activities are presently centred in Europe and England where a pilot plant was set up in 1993. The first major target for the Zebra battery is the 1998 California initiative requiring 2% of all news cars sold in that State in 1998 to be of the "zero emission" variety.

The Zebra cell reaction converts common salt and nickel to sodium and nickel chloride during the charging phase.



The characteristic open circuit voltage (OCV) is 2,58V at 300 °C. The negative electrode, liquid sodium, is separated from the positive electrode, nickel chloride, by a ceramic electrolyte, beta alumina, which is a good sodium ion conductor. A second liquid electrolyte, sodium aluminium chloride, is the ionic conductor between nickel chloride and beta alumina. The cell operates in the temperature range between 270 °C and 350 °C. Both nickel and iron are suitable cathode materials, but the advantages which nickel has of better energy and stability make it the preferred electrode at present.

The positive electrode is contained inside the beta alumina tube, together with a central nickel strip current collector. The porous metal mixture is saturated with liquid sodium aluminium chloride. The sodium metal is kept in contact with the whole beta alumina surface by steel shim wicks. Only about 30% of the nickel in the cell is utilised in the cell reaction, leaving a conducting backbone of 70% unreacted metal in the positive electrode. The seal which separates the two electrode compartments and isolates them from the atmosphere, utilises a nickel/alumina thermocompression bonded component. The cell is hermetically sealed and maintenance free.

The charge and discharge reactions start at the beta alumina surface and move towards the centre. As the reaction moves deeper into the electrode, an ever increasing annulus of reacted electrode is left behind and cell resistance increases. Power and energy depend largely on the cathode profile and cells are designed according to the battery application. Cells of sizes between 100 and 500 Wh have already been assembled and tested. The cell is capable of some overcharge and overdischarge because the liquid electrolyte develops a protective reaction. In the case of overcharge, when the available salt is exhausted, NiCl<sub>2</sub> continues to be produced at 3,05V by reaction of the nickel with NaAlCl<sub>4</sub>. Continued overcharge makes the molten salt electrolyte more acidic which is undesirable for the cell. In the case of overdischarge, NaAlCl<sub>4</sub> is reduced to aluminium at a voltage of 1,58V. Continued overdischarge will cause the beta alumina tube to fracture due to the high localised current density when the available sodium is exhausted. The presence of aluminium assures the conductivity of the cell even in a failed condition. This is an important factor in battery design where long-series chains of cells can be used. Cell failure will diminish the battery voltage, without interruption of current flow.

Several hundred cells are needed in a battery with enough energy and power to drive a car. Because the cells operate at high temperature, a double walled vacuum insulated battery box is used to minimise thermal losses between the inside (300 °C) and the outside (30 °C). Resistance heaters maintain the operating temperature when not in use on board. During operation, heat is generated internally through a rise in resistance.

For each application, cell and battery design should be optimised. There is a direct relationship between the energy of a battery and the travelling range of the car. Thus, during the 1980's, ranges of 250 km with a 50 kWh battery and 230 km with a 40 kWh battery, were achieved at velocities of between 50 and 80km/h. Power is the other criterion for evaluation of a battery. A gravimetric power density of 100W/kg battery is required by motorcar companies. Cycle lives of many thousands of cycles during a four year period, have been achieved for single cells as well as for batteries on bench tests. A converted Mercedes Benz 190 saloon car has been tested for three years on public roads in Germany. During

this time, it has driven more than 100 000km and the battery has undergone more than 1100 charging cycles. A top speed of 130 km/h and a range of 160km were recorded. The battery is 17 kWh and the power and energy densities are 77 W/kg and 88 Wh/kg.

Extensive safety testing of a battery is necessary to qualify the product for the commercial market. In the case of a ceramic fracture, inside a cell, the molten sodium electrode comes into contact with the molten secondary liquid electrolyte. The reaction is exothermic, the products are not corrosive and their vapour pressure is low. The cell temperature increases to 400 °C after ten minutes. Cell casings will normally remain intact, even up to temperatures of 600 °C. In order to determine the effect when they are ruptured, as might result from a crash, fully charged 25 kWh batteries at 300 °C were dropped onto crash barriers from a height of 10 m at an impact speed of 50 km/h. In the case of a blunt object, the battery box was deformed, whereas a spike penetrated the box and destroyed the cells in the penetration zone. In both cases the stored energy was converted to heat and internal temperatures rose to 700 °C. The reaction was completed after one hour. No sodium escaped from the battery and only white smoke (aluminium hydroxide and traces of hydrochloric acid) was observed.

The materials required for the manufacture of the batter-

ies are freely available in large quantities. Of these, nickel is the most expensive component. The production cost is, therefore, largely dependent upon the scale of manufacture. The recycling of batteries will be both necessary to prevent pollution, as well as profitable for reclamation of nickel. In a fully discharged cathode a simple washing procedure separates the nickel from the other water-soluble compounds.

Other batteries under development include lead-acid, nickel-cadmium, nickel-iron, zinc-bromine and sodium-sulphur. The latter is universally favoured for its excellent performance. The main disadvantages, however, are safety, thermal management, corrosion and its open circuit cell failing mode. For many battery experts, the Zebra system remains a relatively dark horse due to its long history of secrecy, but it will be no surprise when it earns its stripes by virtue of its safety factors, stable performance and environmental friendliness.

## LITERATUURVERWYSINGS

1. Coetzer, J. (1986). A New High Energy Density Battery System, *J. Power Sources*, 18, 377-380.
2. Coetzer, J., Meintjes, A. A., Nolte, M. J. & Van Niekerk, H. (1987). An Electric Vehicle Range Test Using a Sodium-Iron Chloride Battery in a Converted Minibus, Fall Meeting of Electrochem. Soc. (Hawaii).