

STAND UND ENTWICKLUNG ELEKTROCHEMISCHER STROMQUELLEN

K. WIESENER

Technische Universität Dresden, Sektion Chemie, Mommsenstrasse 13, 8027 Dresden (D.D.R.)

Summary

The research and development of electrochemical power sources in the 1970s and early 1980s was influenced by two factors, the rapid development of electrotechnology and electronics and the restriction of energy resources, especially of liquid fuels, raising the question of the use of electric vehicles.

In practice, there is only one new system on the market, the lithium cell with aprotic liquid and solid electrolytes.

In the development of storage batteries no new systems have been found for practical use, but some improvement in the properties and utility of commercial batteries has been made. Research on batteries and fuel cells, in particular in the field of the structure of porous electrodes, electrocatalysts and electrolytes, influenced the progress in electrolytic processes, such as water electrolysis and chloralkaline electrolysis; it also initiated fundamental research on solid state chemistry and physics, catalysis, organic electronic conductors and charge transfer processes.

The future task is to use the fundamental results of the above disciplines in battery research, by good cooperation between chemists, physicists, and experts in material sciences and process engineering, with the aim of introducing new approaches and materials into power sources technology.

1. Einführung

Die Forschung und Entwicklung elektrochemischer Stromquellen in der ganzen Welt ist im letzten Jahrzehnt entscheidend von zwei Tatsachen stimuliert worden:

(1) Die zunehmende Automatisierung und durchgreifende Elektrifizierungen aller technischen Prozesse, das immer stärkere Eindringen der Elektrotechnik und vor allem Elektronik in alle Bereiche der Wirtschaft und des gesamten gesellschaftlichen Lebens ist stets mit dem Einsatz adäquater Elektroenergiequellen verbunden. Für mobile Anwendungen mit eigenständigen Energieträgern im Bereich niedriger und mittlerer Leistung, für die vorzugsweise elektrochemische Stromquellen in Betracht kommen, sind

Systeme mit hoher Energie- und Leistungsdichte und langer Lebensdauer notwendig. Die zunehmende Minimierung der elektrochemischen Bauteile verlangt gleichzeitig eine Minimierung der dazugehörigen Energieträger; dieser Forderung nach immer kleineren Stromquellen kommt allerdings der zurückgehende Energiebedarf der mikroelektronischen Geräte entgegen.

(2) Der erhöhte Verbrauch der Energieresourcen hat zu einer Verknappung insbesondere der flüssigen Treib- und Brennstoffe geführt, wodurch alternative Energieträger für Traktionszwecke, speziell für den Strassenverkehr, stärker gefragt sind. Die Suche nach diesen neuen Energieträgern ist gleichzeitig mit der Forderung nach höherer Umweltfreundlichkeit der Verkehrsmittel besonders für den innerstädtischen Verkehr, d.h. verminderter Abgas- und Geräuschbelästigung verbunden. Im Hinblick auf die zuletzt genannten Aspekte sollte der Elektroantrieb mit elektrochemischen Stromquellen hoher Leistungs- und Energiedichte eine mögliche Lösung für bestimmte Anwendungsgebiete sein. Im Zusammenhang mit den dafür notwendigen elektrochemischen Energiequellen ist auch der Spitzenlastausgleich zu nennen, wenngleich diese Anwendung gegenüber der Elektrotraktion von geringer Bedeutung ist.

2. Gegenwärtiger Entwicklungsstand

Wenn man eine Bilanz über die Entwicklung kommerzieller elektrochemischer Stromquellen in den 70iger und 80iger Jahren zieht, so kann man nur bei den Primärzellen den Durchbruch einiger neuer Systeme, wie der alkalischen Zink-Braunstein-Zelle und der Lithiumzellen mit festen und aprotischen Elektrolyten feststellen; bei den Sekundärzellen, den Akkumulatoren, liegen die Fortschritte nur in der Verbesserung der herkömmlichen Stromquellen. Brennstoffzellen haben sich zwar technisch in der Weltraumforschung bewährt, konnten aber in den zivilen Sektor keinen Eingang finden; ihre Anwendung ist nicht ökonomisch, da die Gesamtaggregate einen komplizierten Aufbau haben und eine intensive Wartung erfordern.

2.1. Primärbatterien

Im einzelnen kann man zu den Primärzellen folgendes sagen:

(i) Die am stärksten verbreitete Leclanché-Zelle ist technisch weiter vervollkommenet worden, differenzierte Zellen je nach Anwendungsgebiet sind auf dem Markt, der Leckschutz und die Lagerfähigkeit sind weiter erhöht worden, durch qualitativ hochwertigere Aktivmaterialien, verbesserte, stärker automatisierte Produktionsmethoden und durch zusätzlichen Leckschutz, wobei neben den klassischen Stahlmänteln, Kunststoffmäntel und kunststoffverstärkte Zellulosemäntel eine Alternative darstellen. Der verschieden-seitig angekündigte stärkere Rückgang der Leclanché-Zelle, die Substitution dieser Zelle durch andere Typen, ist nicht eingetreten.

(ii) Die alkalische Zink-Braunstein-Zelle, technisch ausgereift, betriebs-sicher, ist wegen ihrer aufwendigen Herstellung (Zinkpulver, korrosiver alkalischer Elektrolyt) anwendungsseitig bereits voll eingepreist. Leider ist es

nicht gelungen, die Zelle wieder aufladbar zu machen, was ihre Bedeutung wesentlich erhöhen würde. Nicht unterdrückbare Sekundärreaktionen, zunehmend mit tieferer Entladung auftretend, sind die Ursache dafür. Für Geräte mit motorischen Antrieben mit erhöhter Leistungsaufnahme haben sich alkalische Zink-Braunstein-Zellen wegen ihrer höheren Energie- und Leistungsdichte einen festen Platz erobert.

(iii) Die Zink-Silberoxid-Zelle, die als Knopfzelle (Buttoncell) dominiert, ist soweit vervollkommen worden, dass die Selbstentladung sehr gering ist und sich die aktive Lebensdauer mehr und mehr erhöht hat. Der im letzten Jahrzehnt stark gestiegene Silberpreis stellt für die Ausweitung in der Anwendung, insbesondere bei grösseren Zellen, eine Barriere dar. Für den Einsatz in mikroelektronischen Geräten ist der Zink-Silberoxid-Zelle in der Lithiumzelle mit aprotischen und für spezielle Niederleistungsgebiete auch mit festen Elektrolyten eine starke Konkurrenz erwachsen. Die kostengünstige Zink-Quecksilberoxid-Zelle ist aus Umweltschutzgründen, aber auch wegen der etwas ungünstigeren elektrischen Parameter im Vergleich zur Zink-Silberoxid-Zelle weitgehendst als Knopfzelle verschwunden, was aus ökonomischer Sicht nicht ganz verständlich ist.

(iv) Bei der Zink-Luftsaauerstoff-Zelle konnte keine entscheidende Erhöhung der aktiven Lebensdauer über wenige Wochen hinaus erreicht werden, das ist insofern bedauerlich, da sie prinzipiell eine hohe Energiedichte besitzt. Die nichtbeherrschbare Zinkkorrosion sowie das Problem der Karbonatisierung des alkalischen Elektrolyten sind die Ursachen dafür. Eine gewisse Ausnahme bilden nahezu geschlossene Zellen mit niedriger Leistung (Hörbatterien) und grössere Batterien im Leistungsbereich von 0.1 - 1 kW, die durch spezielle konstruktive Massnahmen und Elektrodengestaltungen im Dauerbetrieb einige Monate arbeitsfähig sind, wie Versuche an Leuchtbojen und als Energiespender bei alpinistischen Expeditionen im Himalaja mit bulgarischen Prototypbatterien gezeigt haben.

(v) Die Lithiumzelle, das echte neue kommerzielle System des letzten Jahrzehnts, hat eine Tür zu einer neuen Richtung von Stromquellen, denen mit aprotischen flüssigen und festen Elektrolyten bei niedriger Temperatur, aufgestossen. Konnte doch gezeigt werden, dass solche extrem reaktiven Materialien wie Lithium, das mit Sauerstoff, Luftfeuchtigkeit und sogar Stickstoff spontan reagiert, industriell für die Herstellung von Stromquellen einsetzbar ist. Die Produktion erfolgt in 'dry-Räumen' oder Schutzgasboxen. Hinsichtlich der grossen Auswahl an Katodenmaterialien ist auch eine Konzentrierung eingetreten, Braunstein und fluorierter Kohlenstoff sind die aussichtsreichsten festen katodischen Reaktanten, während Thionylchlorid und Schwefeldioxid als nichtfeste Reaktanten sich durchgesetzt haben. Nicht voll geklärt sind einige grundlegende Fragen, die aber entscheidend die Anwendung beeinflussen, wie das Aktiv-Passiv-Verhalten, d.h. der Einfluss der Struktur und der Eigenschaften der Phasengrenzschicht auf dem Lithium auf die ablaufenden Reaktionen. Obwohl immer wieder von einzelnen Bearbeitern gesagt wurde, dass genügend Kenntnisse zur Schichtstruktur vorliegen, zeigt sich bei intermittierender Entladung von grösseren Lithium-

zellen mit Thionylchlorid nach wie vor ein unkontrollierter Anstieg des Innenwiderstandes, örtliche Erwärmungen in der Zelle und explosionsartige chemische Reaktionen als deren Folge. Die Lithiumprimärzelle als Kleinzelle, vorwiegend als Knopfzelle mit festen Katoden, ist demgegenüber betriebs-sicher, zuverlässig, mit hoher Energiedichte und niedriger Selbstentladung. Eine besondere Rolle spielen auch die Festelektrolytzellen, insbesondere mit Jod, gebunden als ein Charge-Transfer-Komplex, vorwiegend an Polyvinylpyridin als Stromquellen für Organstimulatoren (Herzschrittmacher). Die erhöhte Betriebsfähigkeit von ca. 10 Jahren — gegenüber Zink-Silberoxid-Zellen von 3 - 4 Jahren — hat erhebliche Vorteile in der medizinischen Anwendung, werden doch auf diese Weise die klinischen Behandlungskosten der Patienten erheblich geringer. Untersuchungen zum Ladungs- und Stofftransport, zur elektrochemischen und ionischen Leitfähigkeit in Charge-Transfer-Komplexen, ganz generell in ionenleitenden und elektronenleitenden anorganischen, organischen, flüssigen und festen Substanzen, vorwiegend auch Polymeren, haben zu Ergebnissen geführt, die die Entwicklung dieser Kategorie elektrochemischer Stromquellen ermöglichte. Aber auch umgekehrt hat diese erfolgreiche Anwendung einer Festelektrolytprimärzelle weitere Grundlagenuntersuchungen stimuliert, die bis hin zu Untersuchungen an neuen, rein organischen Ladungsträgern für Stromquellen wie Polyacetylen, geführt haben.

Bei den Primärzellen ist ein ungelöstes Problem die Rezyklisierung der Rohstoffe, denn sicherlich ist es langfristig unvertretbar, die immer rarer werdenden Rohstoffe wie Zink- und Braunstein nach einer einmaligen und auch nur teilweisen Ausnutzung zu verwerfen. Man muss sich fragen, ob aus dieser Sicht die Primärzelle überhaupt langfristig eine Zukunft hat. Eine Richtung zur Überwindung dieses Problems ist die weltweit — bisher allerdings wenig erfolgreich — versuchte Wiederaufladung der Zellen. Auch bei Lithiumzellen gelingt es bis jetzt noch nicht, eine glatte, gut elektronenleitende Wiederabscheidung des Lithiums an der negativen Elektrode aus den nichtwässrigen Elektrolyten zu ermöglichen. Dendritische, pulvrige Abscheidungen und Umsetzungen des Elektrolyten beim Wiederladeprozess sind die Ursachen. Auch gelingt die Deintercalation der Lithiumionen nicht aus den günstigen Katodenmaterialien Braunstein und fluoriertem Kohlenstoff.

Deshalb wird heute in stärkerem Masse an die Erfassung und industrielle Aufarbeitung verbrauchter Primärzellen gedacht, wobei für Zellen mit Silberoxid als Katoden schon technisch industrielle Silber-Rückgewinnungen an der Tagesordnung sind.

2.2. Sekundärbatterien, Akkumulatoren

Der Stand hinsichtlich verfügbarer Stromquellen ist:

Der *Bleiakkumulator* ist in seinen Gebrauchswerteigenschaften durch technische Weiterentwicklungen laufend verbessert worden, das betrifft die *Wartungsfreiheit* und *Lebensdauer*, erzielt durch Anwendung korrosionsfester Gitterlegierungen (geringerer Antimon Gehalt, Blei-Calcium-Legierungen)

in Verbindung mit verbesserten Formationstechnologien (Containerformation, dry-charge-Technik, durch Zusätze stabilisierte Aktivmasse), *höhere Energiedichte*, erreicht durch Verminderung des Bleieinsatzes (kürzere Elektronenleiter zwischen Zellen und Elektroden, leichtere optimierte Gitter, Erhöhung des Ausnutzungsgrades der Aktivmasse, leichtere Gefässe aus Polypropylen mit Monodeckel) und *optimiertem Säurehaushalt*. Ausserdem ist die Herstellungstechnologie im Umbruch begriffen. Der Einsatz von expandierten Gittern (Streckmetallgitter) in Verbindung mit einer Bandpastierung und anschliessende Auftrennung in Einzelelektroden oder die Substitution der Rütteltechnologie zur Einbringung des Bleistaubes in Panzerschalenelektroden durch Verwendung pastierter Elektroden mit anschliessender Umhüllung sind zwei Wege in dieser Richtung. Schliesslich soll durch Umwälzen des Elektrolyten eine weitere Erhöhung der Energiedichte bzw. Aktivmasseausnutzung erreicht werden. Prinzipiell andere technologische Wege wie der sogenannte Lösungsakkumulator haben bisher keinen Eingang in die Produktion gefunden. Beim Lösungsakkumulator ist die erzielbare Energiedichte nicht wesentlich gegenüber dem klassischen Bleiakкумуляtor gesteigert. Dem zwar erheblich niedrigeren spezifischen Bleibedarf beim Lösungsakkumulator stehen erhöhte apparative Aufwendungen und die unbefriedigende Lebensdauer gegenüber.

Der Bleiakкумуляtor als wichtigster elektrochemischer Stromspeicher der Vergangenheit hat also entgegen den Prognosen trotz seines ungünstigen theoretischen Masse-Energie-Verhältnisses seine Position verstärkt. Er ist die allumfassende Starterbatterie und wird in dieser Funktion wegen seiner robusten Arbeitsweise auch bis zum Jahre 2000 durch keine andere Stromquelle substituiert werden können, er ist z.Z. auch die wichtigste Traktionsbatterie. Die hermetisch geschlossenen Kleinstbleiakкумуляtoren haben bisher keine erweiterte Anwendung gefunden, könnten aber aus Rohstoffgründen in Zukunft stärkeres Interesse erwecken.

Beim *Nickel-Cadmium-Akkumulator* haben Sinterelektroden zu einer erhöhten Leistungsdichte geführt. Wegen der aufwendigen Herstellungstechnologie der Sinter- und Taschenelektroden werden schrittweise plastegebundene Elektroden (z.Z. als Cadmiumelektroden) eingeführt.

Von den Akкумуляtoren mit alkalisch wässrigen Elektrolyten hat der Nickel-Cadmium-Akkumulator in verschiedenen Ausführungsformen (offene und gasdichte Akкумуляtoren sehr verschiedener Grössen) eine dominierende Stellung. Einer Erweiterung bei den grösseren Typen steht der hohe Cadmiumpreis entgegen.

Alle anderen möglichen Elektrodenkombinationen für Akкумуляtoren mit wässrigen alkalischen Elektrolyten sind problembehaftet (siehe Tab. 1):

Die *Eisenelektrode* führt zu niedrigen praktischen Energie- und Leistungsdichten, besonders bei niedriger Temperatur, die Ladungserhaltung ist schlecht. Die wegen der niedrigen Materialkosten erneut durchgeführten Untersuchungen mit einer elektronenleitenden Matrix sind bisher nicht ausgereift.

TABELLE 1

Wichtigste Elektrodenkombinationen für Akkumulatoren mit wässrigen alkalischen Elektrolyten (Zahlen in den Feldern links unten sind die erzielten Energiedichten in W h/kg)

Positive Elektrode	Negative Elektrode					H ₂ /H ₂ O
	Cd/Cd(OH) ₂	Fe/Fe(OH) ₂	Zn/Zn(OH) ₂	Al/Al(OH) ₃		
Ag ₂ O bzw. Ag ₂ O ₂ /Ag	Technisch ausgereift Nicht kommerziell, da nicht ökonomisch 40 - 80	Keine technische Entwicklung	Kommerziell sehr teuer 60 - 120	Keine technische Entwicklung	Technisch ausgereift Nicht kommerziell, da zu teuer 60 - 100	
NiOOH/Ni(OH) ₂	Kommerziell 30 - 45	Früher kommer- ziell 30 - 45	Technische Forschung 40 - 80	Keine technische Entwicklung	Technisch ausgereift Nicht kommerziell, da zu teuer 50 - 80	
O ₂ /OH ⁻	Laborforschung 60 - 90	Technische Forschung 60 - 100	Technische Forschung 60 - 150	Technische Forschung 150 - 250	Keine technische Entwicklung als Sekundärzelle	

Die *Zinkelektrode* ist schlecht zyklisierbar, da die Entladeprodukte im Elektrolyten löslich sind und erst bei Übersättigung aus diesem wieder ausfallen. Daraus resultierend besitzt die Zinkelektrode eine schlechte Dimensionsstabilität (birnenförmige Verdickung nach unten hin und Dendritenbildung mit fortschreitender Zyklenzahl). Versuche durch Elektrolytzusätze (Herabsetzung der Löslichkeit der Zinkionen) oder durch Vibration der Elektrode (gleichmässige Abscheidung durch Mikroturbulenz) die Abscheidung zu verbessern, haben bisher nicht dazu geführt, die Elektroden produktionsreif zu machen. Alle Systeme mit Zinkelektroden sind besonders bei Kombination mit teureren positiven Elektroden wegen der niedrigen Lebensdauer des Gesamtsystems unökonomisch.

Da die *Aluminiumelektrode* aus wässriger Lösung nicht wieder aufladbar ist und die Wiedergewinnung über eine externe Schmelzflusselektrolyse nach vorheriger Abtrennung des Elektrolytwassers sehr energieintensiv erfolgen muss und ausserdem auch die Selbstentladung beim Stehen im Elektrolyten erheblich ist, sind trotz der imponierend hohen Energiedichten bei den Laborversuchen die praktischen Aussichten der Elektrode gering. Aufgrund dieser Aspekte ist lediglich die Kombination mit der Sauerstoffelektrode interessant.

Die *Wasserstoffelektrode* ergibt erhebliche Probleme bei der Gasspeicherung.

Die *Kadmiumelektrode* ist die einzige, der in Tab. 1 aufgeführten negativen Elektroden, die sich problemlos über lange Zeit im Lade-Entladebetrieb einsetzen lässt.

Das Problem der *Sauerstoffelektrode* liegt darin, dass die Elektrode über eine hohe katalytische Aktivität verfügen muss, um die gehemmte kathodische Sauerstoffreduktion zu beschleunigen, aber andererseits chemisch stabil gegen den naszierenden Sauerstoff beim Ladeprozess bleibt. Praktische Lösungen streben deshalb die Aufladung des negativen Aktivmaterials gegen eine dritte sauerstoffstabile Elektrode, meist ausserhalb der Stromquelle an, womit das Prinzip der Sekundärzelle verlassen ist.

Die *Silberelektrode* ist in ihrer Anwendung zu teuer.

Die *Nickelelektrode* ist die einzige Elektrode über gute elektrochemische Eigenschaften verfügend, die für kleinere und mittlere Zellen ökonomisch anwendbar ist.

Im einzelnen ist zu den durch Kombination dieser Elektroden erhaltenen Akkumulatoren festzustellen:

Der Silber-Zink-Akkumulator ist aus preislicher Sicht in der zivilen Anwendung sehr stark zurückgegangen.

Die im Vergleich zu Nickel-Cadmium- und Silber-Zink-Batterien kostengünstigeren Typen Nickel-Zink sowie Luft-Zink bzw. Luft-Eisen*

*Die häufig in diesen Zusammenhang auch genannte Luft-Aluminium-Batterie oder auch bestimmte Arten von Luft-Zink-Batterien mit mechanisch nachladbaren Zinkelektroden.
(Fortsetzung nächste Seite)

konnten sich bisher nicht durchsetzen und haben aus der Sicht des Autors auch in der Zukunft nur geringe Chancen. Auch der Nickel-Eisen-Akkumulator hat bisher keine Renaissance gefunden.

Bleibt als Resümee, dass neue Systeme mit wässrigen alkalischen Elektrolyten kaum in der Lage sind, Nickel-Cadmium zu ersetzen oder als Batterien für die Elektrotraktion Anwendung zu finden.

Halogen-Zink-Systeme (Zink-Cl₂, Zink-Br₂) mit 'flow-through'-Elektroden haben in den letzten 10 Jahren eine intensive technologische Bearbeitung erfahren, sind jedoch kommerziell noch nicht einsatzfähig. Sie können dann aussichtsreich für eine praktische Anwendung sein, wenn es gelingt, die Speicherung der positiven Aktivkomponenten optimal zu lösen und die umfangreichen verfahrenstechnischen Fragen zu beherrschen. Wie weit sich die Laborentwicklungen in eine Produktionspraxis überführen lassen, wird die Zukunft beweisen. Eine gewisse Hoffnung kann man aus heutiger Sicht haben. Aufgrund der Erfahrungen mit den Trendeinschätzungen bei den Hochtemperaturspeichersystemen Na-S und Li-FeS, wo eine Anwendung in der Elektrotraktion im Beginn dieses Jahrzehnts vorausgesagt wurde, sollte man auch hinsichtlich einer baldigen Praxiswirksamkeit der Flow-Systeme etwas zurückhaltend sein.

Bei den *Hochtemperaturakkumulatoren* sind nach wie vor trotz sehr intensiver Bearbeitung einige entscheidende Fragen nicht befriedigend gelöst. Das sind beim *Natrium-Schwefel-Akkumulator* der Temperaturzyklus der Batterie, die Beherrschung des Wärmehaushaltes, die qualitätsgerechte, kostengünstige Herstellung des β -Al₂O₃-Festelektrolyten, die Kontaktierung in den Phasengrenzen sowie Korrosions- und Materialfragen. Hinsichtlich der Rohstoffe für die Aktivkomponenten und der prinzipiellen elektrischen Daten ist der Natrium-Schwefel-Akkumulator trotzdem ausserordentlich interessant.

Der *Lithium-Eisensulfid-Akkumulator* benötigt nach wie vor eine Reihe teurerer Materialien für Elektroden, Separatoren und Zellen, ausserdem ist die Alterung der Elektroden mit zunehmender Zyklenzahl noch nicht sicher beherrscht.

Der Rückgang des Forschungspotentials bei diesen Hochtemperatur-Akkumulatoren in den letzten Jahren ist ein gewisses Signal und zeigt die Skepsis hinsichtlich der praktischen Realisierung. Bleibt zu hoffen, dass durch die jetzt wieder mehr grundlagenmässig durchgeführte Bearbeitung an

troden oder umgepumpten breiartigen Zinkpulver-Kalilauge-Gemischen sind im Sinne der Definition keine Akkumulatoren, sondern regenerative elektrochemische Stromquellen, eher zu den Brennstoffzellen gehörig. Das Aktivmaterial wird räumlich getrennt von den elektrochemischen Stromquellen, meist in grösseren Anlagen elektrochemisch hergestellt bzw. regeneriert, wie das z.B. auch bei der Kombination von Wasserelektrolyse mit Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen der Fall ist. Die Zink-Halogen-Batterien sind demgegenüber trotz Wegführung bzw. Zuführung der Reaktanten aber echte Sekundärzellen, da die Stromerzeugung und Wiederaufladung an den *gleichen* Elektroden erfolgt.

den Systemen noch Lösungen gefunden werden, die eine Anwendung möglich machen.

Eine generelle Diskussion der Sekundärbatterien hinsichtlich der neuen potentiellen Anwendungsgebiete Elektrotraktion und Spitzenlastausgleich muss an Hand des oben gesagten zu der Schlussfolgerung führen, dass in naher Zukunft nur der Bleiakkumulator trotz aller seiner Nachteile, wie der niedrigen Energiedichte, praktisch in Betracht gezogen werden kann. Die Akkumulatoren mit wässrigen alkalischen Elektrolyten stellen dafür keine echte Alternative dar, die Elektrodenmaterialien Silber, Cadmium und auch Nickel sind relativ zu dem Gewinn an Energiedichte zu teuer, die Sauerstoffelektrode ist als positive Elektrode im Zyklisierbetrieb nicht beherrscht, so dass auch für die kostengünstigeren negativen Elektroden (Tab. 1) keine Chance bleibt. Die externe Regenerierung ist beim Elektrofahrzeugantrieb organisatorisch und technisch unvertretbar aufwendig und damit für dieses Anwendungsgebiet ohne Bedeutung. Bleibt zu hoffen, dass die Zink-Halogen-Batterie sich zu einer echten Alternative für den Fahrzeugantrieb und den Spitzenlastausgleich entwickelt und die Probleme bei den Hochtemperatursystemen doch noch lösbar sind.

2.3. Elektrochemische Brennstoffzellen

Die nicht erfüllten Erwartungen aus ökonomischer und anwendungstechnischer Sicht haben dazu geführt, dass die Aktivität in der Brennstoffzellenforschung stark zurückgegangen ist. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Brennstoffzelle für den Elektrofahrzeugantrieb nicht in Betracht gezogen werden kann. Gewisse Überlegungen gehen in Richtung dezentraler Elektroenergieerzeugung vom kW ... MW-Leistungsbereich. Die Luft-Sauerstoff-Aluminium- und Luft-Sauerstoff-Zink-Brennstoffzelle mit intervallförmiger Zuführung bzw. breiförmiger kontinuierlicher Zuführung der Metalle als Brennstoffe ist bereits unter dem Punkt 2.2 mit diskutiert worden. Die klassische Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle hat nur noch eine gewisse Chance in Verbindung mit einem Wasserstoff-Energie-Konzept, um welches es in jüngster Zeit auch wesentlich ruhiger in der Literatur geworden ist. Die Erkenntnisse bei der Brennstoffzellenforschung, wie z.B. zur Struktur von porösen Zwei- und Dreiphasenelektroden, zur Elektrokatalyse, zur Verfahrenstechnik der Zellen und zu den Werkstoffen haben aber bei der Entwicklung technischer Elektrolysen, wie z.B. der Wasserelektrolyse oder der Chloralkalielektrolyse nach dem Membranverfahren, besonders hinsichtlich der Minimierung des spezifischen Energieeinsatzes ihren Niederschlag gefunden. Die gesamte elektrochemische Verfahrens- und Reaktionstechnik ist durch diese Forschung an Brennstoffzellen belebt worden.

3. Zukünftige Aufgaben

Aus technisch-ökonomischer Sicht ergeben sich für die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der elektrochemischen Stromquellen drei Orientierungen:

(a) Weitere Vervollkommnung herkömmlicher Stromquellen zur Erhöhung des Gebrauchswertes (Energiedichte, Lebensdauer, Energiewirkungsgrad, Wartungsfreiheit); Verbesserung der Technologie der Herstellung derselben.

(b) Substitution teurer, wenig verfügbarer Materialien durch kostengünstigere Materialien sowie bessere Ausnutzung der Aktivkomponenten, um den gestiegenen Rohstoffpreisen entgegenzuwirken.

(c) Erforschung neuer Systeme für Stromquellen mit neuen Eigenschaften.

Zur Vervollkommnung der herkömmlichen Stromquellen muss der begonnene Weg fortgeführt werden. Eine Aufgabe ist die weitere Optimierung der Elektrodenstruktur, des Elektrodenaufbaus und der gesamten Zelle, resultierend aus Grundlagenforschungsergebnissen zur Phasengrenzschicht an den Elektroden, zur Kristallstruktur der Komponenten sowie zur Verfahrenstechnik im Hinblick auf die Verwendung von bipolaren Elektroden, Einsatz von Kunststoff- und Leichtmetallgittern, Verwendung neuer Plastebinder und Scheidermaterialien, Umwälzung des Elektrolyten. Weiterhin gilt es, die Technologie der Produktion weiter zu verbessern hinsichtlich höherer Produktivität, Qualität und Umweltfreundlichkeit.

In engem Zusammenhang dazu stehen auch die unter (b) genannten Aspekte, z.B. durch eine verbesserte Struktur der porösen Cadmiumelektrode zu einer höheren Ausnutzung des Aktivmaterials zu kommen oder auch das Bemühen, das strategisch bedeutungsvolle Lithium durch andere Alkali- und Erdalkalimetalle, wie Calcium oder Magnesium zu ersetzen.

Das Feld der Forschung, um zu neuen Stromquellen zu kommen, ist sehr weit gespannt. Aprotische, flüssige und feste Elektrolyte bieten die Möglichkeit, völlig neuartige Aktivmaterialien in den Bereich der Möglichkeit zu ziehen. Neben den Leichtmetallen mit niedriger Äquivalentmasse und sehr negativen Elektrodenpotential sind das organische Substanzen mit elektronischer Leitfähigkeit, die imstande sind, Ladungen aufzunehmen und abzugeben, wie Polyacetylen, Thiavulvalene, aber auch Komplexe zwischen organischen und anorganischen Stoffen, die als Ladungsüberträger wirken können.

Hier wird in Zukunft eine enge Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen, wie Chemiker, Physiker, Werkstoffwissenschaftler und dann auch Technologen und Verfahrenstechniker notwendig sein, wobei Beiträge von solchen Gebieten, wie der Festkörperphysik und -chemie oder der Halbleiterphysik erwartet werden, um ausgehend von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zu neuen Lösungen zu kommen. Auf diese Weise sollte es auch möglich sein, herkömmliche Aktivmaterialien nach neuen Wirkungsprinzipien einzusetzen, wie das z.B. der Bleilösungsakkumulator zeigt.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit wird der Schlüssel zum Erfolg bei der weiteren Entwicklung elektrochemischer Stromquellen sein.