Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 82 (1991)

Heft: 4

Artikel: Die Natrium-"Dampfmaschine" : eine saubere Stromquelle

Autor: Weber, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902934

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Natrium-«Dampfmaschine» – eine saubere Stromquelle

R. Weber

Eine Keramik von ganz besonderen Eigenschaften ergibt im Verein mit Natriumdampf eine neuartige Stromquelle mit einer überzeugenden Summe attraktiver Eigenschaften: einfach, bei gleicher Leistung viel kompakter und leichter als andere Direktumwandler, dauerhaft, preiswert, hoher Wirkungsgrad, mit konzentrierter Sonnenenergie, aber auch mit beliebigen Brennstoffen relativ sauber zu betreiben. Allerdings harren noch etliche Werkstoffprobleme einer Lösung, ehe die «Natrium-Konzentrationszelle» marktreif ist.

La combinaison d'une céramique particulière avec de la vapeur de sodium permet d'obtenir une nouvelle source d'électricité présentant bon nombre de caractéristiques intéressantes. Elle est simple, plus compacte et plus légère que les autres sources à réaction électrochimique de même puissance et peut être chauffée au moyen de rayonnement solaire focalisé ou tout autre combustible. Toutefois, avant de pouvoir lancer la «pile compacte au sodium» sur le marché, on devra résoudre d'importants problèmes de matériaux.

Elektrischen Strom zu erzeugen, ist auf der Grundlage unterschiedlicher physikalischer und chemischer Erscheinungen möglich, am einfachsten und elegantesten in einem einzigen Schritt durch Direktumwandlung von Wärme oder chemischer Energie – beispielsweise mit dem Thermoelement, bei dem zwischen unterschiedlich warmen Lötstellen verschiedener Metalle oder Halbleiter eine elektrische Spannung besteht. Sieht man einmal von den Batterien ab, die chemische Energie direkt in elektrische umwandeln, hat jedoch keine dieser Methoden grössere Verbreitung gefunden, sei es, weil die Wirkungsgrade zu klein sind, sei es wegen unüberwindlicher Werkstoffprobleme. Zur Stromerzeugung im grossen durchgesetzt hat sich allein die indirekte, mehrere Stufen erfordernde und daher aufwendige Energieumwandlung, bei der eine Wasser- oder Dampfturbine einen Generator antreibt.

Im Wärmekraftwerk, dem weltweit vorherrschenden Kraftwerktyp, wird zunächst mit Hilfe einer Wärmequelle Wasserdampf erzeugt, dieser versetzt die Turbine in Drehung und sie wiederum den Generator. Seit rund einhundert Jahren kommt also der meiste Strom aus einer riesengrossen Dampfmaschine, der inzwischen die höchsten Wirkungsgrade aller Wärmekraftmaschinen – in den modernsten Gas-Kombianlagen über 50% – anerzogen worden sind.

An einer «Dampfmaschine», die allerdings auf gänzlich anderen Prinzipien und Materialien beruht und direkt wirkt, hinsichtlich Wirkungsgrad jedoch an sehr gute Wärmekraftwerke heranzukommen verspricht und damit alle anderen Verfahren der Direktum-

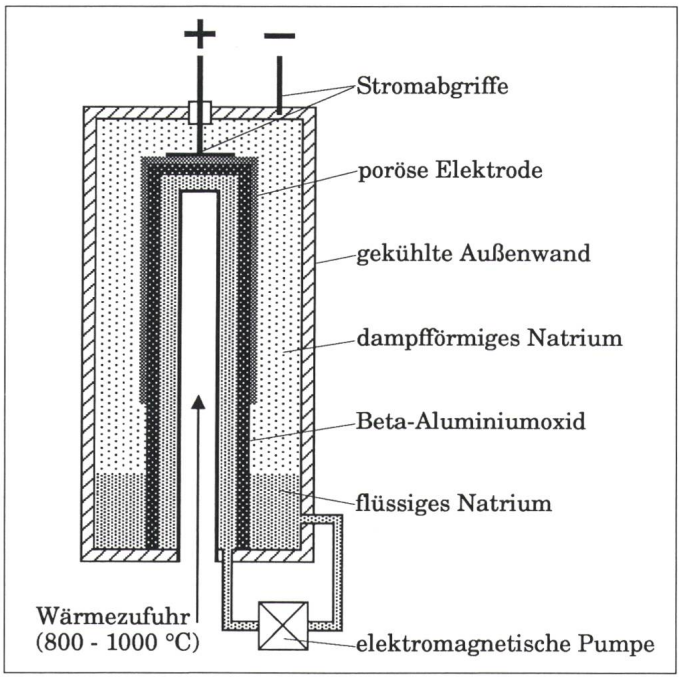

Bild 1
Der Schnitt durch eine Natrium-Konzentrationszelle, wie sie im Forschungslaboratorium von Ford-USA bereits Anfang der 80er Jahre betrieben wurde, zeigt den grundsätzlich einfachen Aufbau. Die Wärme zum Erhitzen des Natriums auf 800 bis 1000 °C wird durch ein zentrales Rohr zugeführt, die Kühlung der äusseren Kammer erfolgt an deren Aussenwand, dem «Kondensator»
Graphik R. Weber

Adresse des Autors
Dr. *Rudolf Weber*, 5225 Oberbözberg

wandlung weit in den Schatten stellt, wird nunmehr in etlichen Laboratorien gearbeitet. Ein neuer keramischer Werkstoff und eine brillante Idee stehen ihr Pate.

Zwei Natrium-Kammern ...

Anfangs der 60er Jahre arbeiteten die amerikanischen Physiker J.T. Kummer und N. Weber in den Forschungslaboratorien des Ford-Konzerns an der Natrium/Schwefel-Batterie. Deren Herzstück ist ein Becher aus Beta-Aluminiumoxid, der den flüssigen Schwefel vom flüssigen Natrium trennt. Dieses keramische, allein durch Sintern aus Pulver herstellbare Material ist zwar ein Nicht-Leiter für Elektronen und gegenüber Flüssigkeiten und Gasen vollkommen dicht, leitet jedoch Natrium in Gestalt einfach positiv geladener Natrium-Atome bzw. -Ionen. Die Kenntnis dieser Eigenschaften brachte die beiden Wissenschaftler auf die Idee, die sie in den folgenden Jahren in Labormustern zum Funktionieren brachten und zum Patent anmeldeten:

Man nehme einen Hohlzylinder von der Grösse einer Konservendose aus hochtemperatur- und korrosionsbeständigem Material, z.B. aus Edelstahl. Dann teile man den Zylinder in eine innere und äussere Kammer, indem man ein konzentrisches Rohr aus Beta-Aluminiumoxid von etwa einem Millimeter Wandstärke einzieht. Nun fülle man die innere Kammer mit Natrium und bringe dieses auf rund 1000 °C. Die äussere Kammer halte man durch Kühlung des Aussenmantels – z.B. mit Wasser – auf ungefähr 300 °C; Natrium, das von der inneren in die äussere Kammer dringt, wird sich dann an diesem gekühlten Mantel niederschlagen. Da Natrium schon bei 98 °C schmilzt, befindet es sich in beiden Kammern sowohl im flüssigen wie im dampfförmigen Zustand. Nun beträgt aber der Dampfdruck bei 1000 °C rund 2,5 bar, bei 300 °C aber nur ein Zehnmillionstel bar, gleichbedeutend mit einem enormen Konzentrationsunterschied.

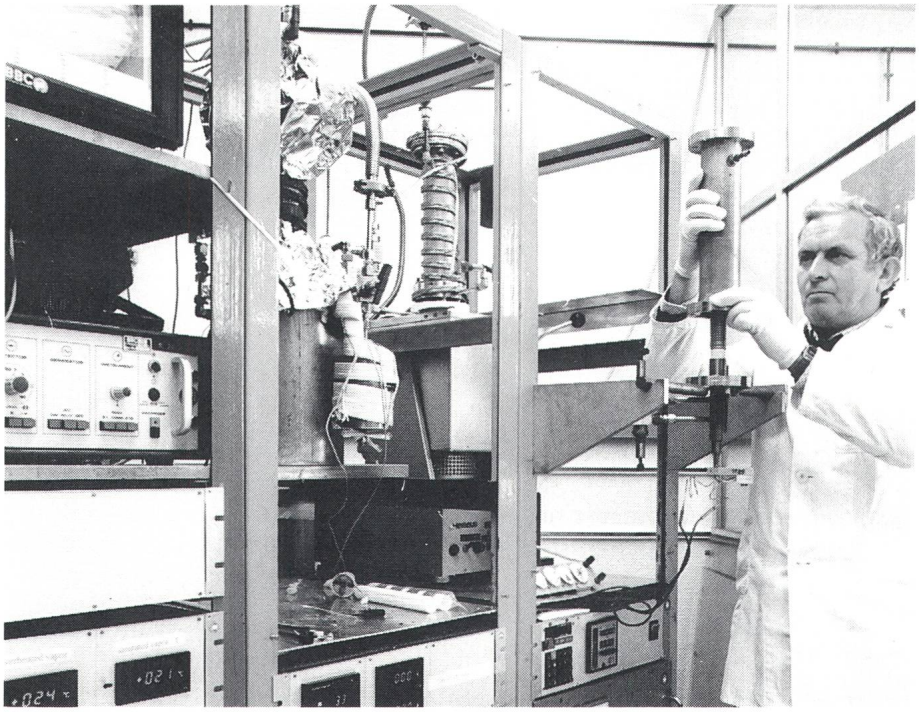

Bild 2 Im Forschungslaboratorium Heidelberg von Asea Brown Boveri bereitet ein Mitarbeiter eine AMTEC-Laborzelle zum Einbau in den Versuchsstand vor Photo ABB

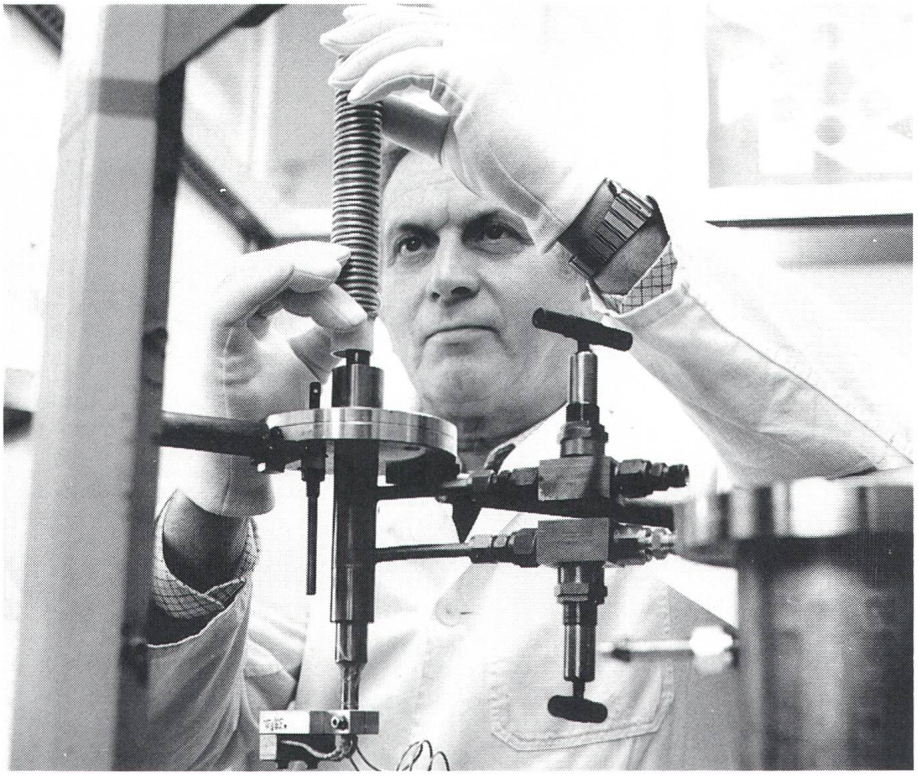

Bild 3 Eine AMTEC-Versuchszelle von ABB: Das Rohr aus Beta-Aluminiumoxid, mit einem Stromableiter aus Kupfer versehen, wird eingebaut Photo ABB

... und Beta-Aluminiumoxid

Bestünde die Trennwand zwischen den beiden Kammern aus einem beliebigen temperaturfesten Material, würde sich rein gar nichts tun – das heisse Natrium bliebe in der inneren Kammer, das kühlere in der äusseren. Das verwendete Beta-Aluminiumoxid jedoch zeichnet sich eben dadurch aus, für Natrium durchlässig zu sein. Und zwar leitet es einfach positiv geladene Natrium-Ionen, also Atome mit einem fehlenden Elektron in der Elektronenhülle. Infolge des Konzentrationsunterschieds zwischen den beiden Kammern wandern diese Ionen natürlich von innen, wo die hohe Konzentration besteht, nach aussen. Wenn sie die innere Kammer verlassen, trennen sich die Natrium-Atome von je einem Elektron, so dass sich die Hochdruckseite der Trennwand elektrisch negativ auflädt. Die Niederdruckseite der Trennwand hingegen wird von den Natrium-Ionen positiv geladen.

Über der Trennwand liegt also eine elektrische Spannung.

Bringt man auf der Innen- und Aussenseite der Trennwand Elektroden als Stromabgriffe an und verbindet sie durch einen äusseren Stromkreis, dann fliessen die Elektronen von der Innenseite zur Aussenseite. Hier ergänzen sie die Natrium-Ionen wieder zu neutralen Atomen – der Stromkreis von Elektronen und Ionen ist geschlossen. Man braucht nur noch das Natrium von der Aussenkammer in die innere zurückzupumpen und hat einen Stromerzeuger, der Wärme von 800 bis 1000 °C aus einer beliebigen Quelle direkt in Elektrizität umwandelt und etwa ein Volt Spannung abgibt. Gegenüber anderen Direktumwandlern aber hat die «Natrium-Konzentrationszelle» oder «AMTEC» den Vorteil viel höherer Stromstärken und mithin bedeutend höherer Leistung je Quadratzentimeter Elektrodenfläche, weshalb Batterien aus vielen Einzelzellen besonders kompakt zu sein versprechen. AMTEC steht übrigens für «Alkalimetal Thermo Electric-Converter», thermo-elektrischer Wandler mit Alkalimetall, weil Natrium ja zu letzteren zählt.

Werkstoffprobleme

Nun verhält es sich mit dem AMTEC so wie mit ungezählten anderen technischen Leckerbissen: im Prinzip sind sie faszinierend einfach, doch steckt der Teufel im Detail. Beim AMTEC ist es eine ganze Schar von Teufelchen. Anfang und Mitte der 80er Jahre konnte in den amerikanischen Forschungslaboratorien von Ford, Jet Propulsion und General Electric zwar gezeigt werden, dass die Sache tatsächlich funktioniert. Mit einem 50 cm hohen Apparat z.B. wurden 22 Watt Leistung bei 19 % Wirkungsgrad erzielt. Auch durfte man aus den Versuchen schliessen, dass etwa 45 % Wirkungsgrad erreichbar sein müssten, desgleichen eine hohe Standzeit bei geringem Wartungsaufwand. Zugleich aber offenbarten sich auch jene kniffligen Details, auf die es so sehr ankommt, wenn aus dem vielversprechenden Pflänzchen ein nützlicher Baum werden soll.

Seit Ende der 80er Jahre beschäftigt sich auch das Heidelberger Forschungszentrum von Asea Brown Boveri mit der Natrium-Konzentrationszelle. Das liegt insofern nahe, als man in Heidelberg eine Natrium/Schwefel-Batterie entwickelt hat und sich daher auf Beta-Aluminiumoxid versteht. Auch wenn hier eine eigenständige Variante des Konzepts verfolgt werden soll, so bestätigen erste kleine Versuchszellen die amerikanischen Erfahrungen, wo die Forschung ihre Schwerpunkte setzen muss.

Problem Nummer eins ist die Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Teilen einer Zelle. Hier harren noch viele Aufgaben einer Lösung, geht es doch darum, verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlicher Wärmeausdehnung so miteinander zu verbinden, dass das Ganze bei Temperaturen zwischen 400 und 1000 °C vollkommen dicht bleibt. Für die Verbindung zwischen der Trennwand aus Beta-Aluminiumoxid und dem Stahlgehäuse z.B. ist die Wahl unter verschiedenen Dichtungen und Loten z.B. mit Niob-Titan-Lot zu treffen. Übrigens stellen sich angesichts der niedrigen Drücke in den Natrium-Kammern keine Sicherheitsfragen.

Ein zweiter Problembereich hängt ebenfalls mit der niederdruckseitigen Elektrode zusammen. Diese Elektrode hat unvermeidlicherweise beinahe die Temperatur der Hochdruckseite, weil der mechanische Kontakt mit dem Beta-Aluminiumoxid innig und dieses dünn und dazu ein recht guter Wärmeleiter ist. Doch 800 bis 1000 °C heiss strahlt die Elektrode natürlich sehr viel Wärme in Richtung der gekühlten Aus-

Das Geheimnis von Beta-Aluminiumoxid

Beta-Aluminiumoxid gehört zu den «schnellen» oder Super-Ionenleitern. Unter Ionenleitern versteht man ganz allgemein Kristalle, die aus Ionen, d.h. elektrisch geladenen Atomen, aufgebaut sind - z.B. Kochsalz aus einfach positiven Natrium-Ionen und aus einfach negativen Chlor-Ionen. Solche normalen Ionenkristalle haben nur im geschmolzenen Zustand eine gute elektrische Leitfähigkeit, die auf der Beweglichkeit der Ionen beruht. In jüngeren Jahren wurde jedoch eine Klasse von Ionenkristallen entdeckt, die auch als Festkörper Strom leiten, woran aber nur ganz bestimmte Ionen teilnehmen. Beim Beta-Aluminiumoxid, das sich aus Aluminium, Sauerstoff und eben Natrium zusammensetzt (chemische Formel $5Al_2O_3Na_2O$), sind das einfach positive Natrium-Ionen. Das hat seinen Grund im schichtartigen Kristallaufbau: Zwischen dickeren Schichten von Aluminiumoxid liegen – wie in einem Sandwich – Schichten, die nur aus Sauerstoff- und Natrium-Ionen bestehen. Und innerhalb dieser Schicht sind die Natrium-Ionen schon bei geringem Energieaufwand, sprich leicht erhöhten Temperaturen, sehr leicht beweglich, indem sie untereinander fortwährend die Plätze tauschen.

Bild 4 In zahlreichen Messreihen werden die Kennwerte – rechts auf dem Bildschirm Leistung über Stromstärke – von AMTEC-Versuchszellen ermittelt, um Anhaltspunkte für Verbesserungen zu finden

Photo ABB

senwand ab. Diese Wärme geht über die Kühlung verloren. Anders gesagt, wird der Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in Strom sehr gering – wenn man nicht Massnahmen wie den Einbau von Strahlungsabschirmungen zwischen Elektrode und Aussenwand trifft, was aber wiederum Probleme aufwirft und neue nach sich zieht...

Nicht zuletzt bedarf auch die Elektrode auf der Niederdruckseite des Beta-Aluminiumoxids noch einiger Aufmerksamkeit. Sie muss ja nicht nur Temperaturen bis 1000 °C standhalten, und das in der aggressiven Natrium-Atmosphäre. Sie muss auch durchlässig bzw. porös für das Natrium sein, das von der Hochdruckseite herüberdiffundiert. In Frage kommen praktisch nur Molybdän und Titannitrid, aufgebracht in Schichtdicken von einem Tausendstelmillimeter. Stand der Dinge ist jedoch, dass die Wirksamkeit dieser Schichten im Betrieb etwas abnimmt. Keine Schwierigkeiten hingegen bereitet die Hochdruckseite: Hier dient das Natrium selbst als Elektrode.

Kompakt und vielseitig

Asea Brown Boveri strebt zunächst den Bau von AMTEC-Modulen mit drei Kilowatt Leistung an, später die Herstellung von 10-Kilowatt-Batterien in Kleinserie – jeweils unter Millionenaufwand. Solchen Einsatz hält Dr. Reinhard Knödler, der die AMTEC-Gruppe in Heidelberg leitet, für lohnend, hat er doch eine Vielzahl möglicher Anwendungen für die Natrium «Dampfmaschine» im Visier. Als Beispiele nennt er etwa das Automobil, wo mit Hilfe eines Benzin- oder Dieselbrenners – ähnlich einer Standheizung – motorunabhängig Strom für Hilfsfunktionen wie die Klimaanlage erzeugt werden könnte.

Abseits von Stromnetzen liesse sich die Sonnenenergie zur Stromerzeugung nutzen, indem man die Hochdruckkammer eines AMTEC von konzentrierter Sonnenstrahlung aus einem Brennspiegel aufheizt. Besonders attraktiv erscheint die Möglichkeit, mit Dieselöl, Erdgas, Biogas oder Holz betriebene Aggregate durch AMTEC zu ersetzen: Zur Aufheizung der Hochdruckseite kann man die Verbrennung stationär und somit viel sauberer führen als in Verbrennungsmotoren.

Und schliesslich ist es denkbar, in Wärmekraftwerken AMTEC zwischen den Gas- oder Kohlebrennern und der eigentlichen Dampferzeugung einzuschalten, denn erstere erreicht über 1000 °C, letztere benötigt nur 540 °C – der Wirkungsgrad des Kraftwerks würde um 10 bis 15% gesteigert.

Die Heidelberger wie die amerikanischen Forscher erwarten eines nicht allzu fernen Tages AMTEC bauen zu können, welche die elektrischen Daten bisheriger Direktumwandler weit übertreffen, bei gleicher Leistung aber sehr viel leichter und kompakter sind. Der amerikanische AMTEC-Fachmann Terry Cole hält es für möglich, 20 Kilowatt Leistung aus einer AMTEC Batterie zu holen, die nur 500 Gramm Natrium als Arbeitsmittel enthält und auf eine Leistungsdichte von 0,6 Kilowatt je kg Gesamtgewicht – allerdings ohne Wärmequelle – kommt. Würden solche Werte und die geschätzten Herstellungskosten von 350 Mark je Kilowatt Leistung auch nur annähernd erreicht, erwüchse herkömmlichen und als zukunftsträchtig erachteten Stromerzeugern wie Wärmekraftwerken oder photovoltaischen Solarzellen neue, starke Konkurrenz.

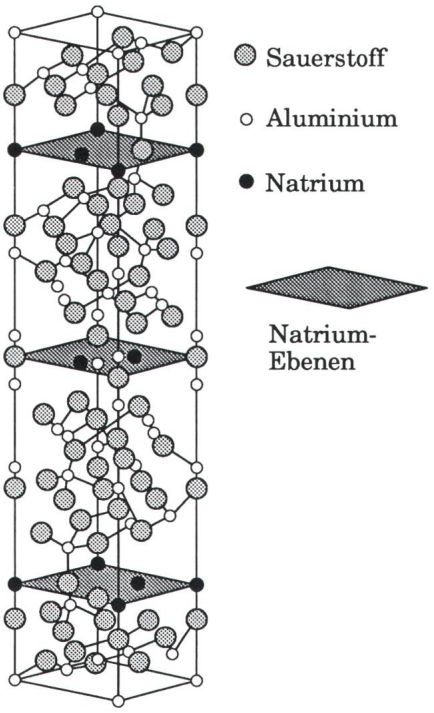

Bild 6: Im Kristallgitter von Beta-Aluminiumoxid, chemische Formel $5Al_2O_3 \cdot Na_2O$, sind die Natrium-Ionen jeweils in einer Ebene bzw. Schicht zwischen viel dickeren Schichten mit Aluminium- und Sauerstoffatomen angeordnet, so dass sie schon bei geringer Energiezufuhr – z.B. leichter Erwärmung – innerhalb einer «Natrium-Ebene» miteinander die Plätze tauschen und sich so durch den Kristall hindurchbewegen

Graphik R. Weber

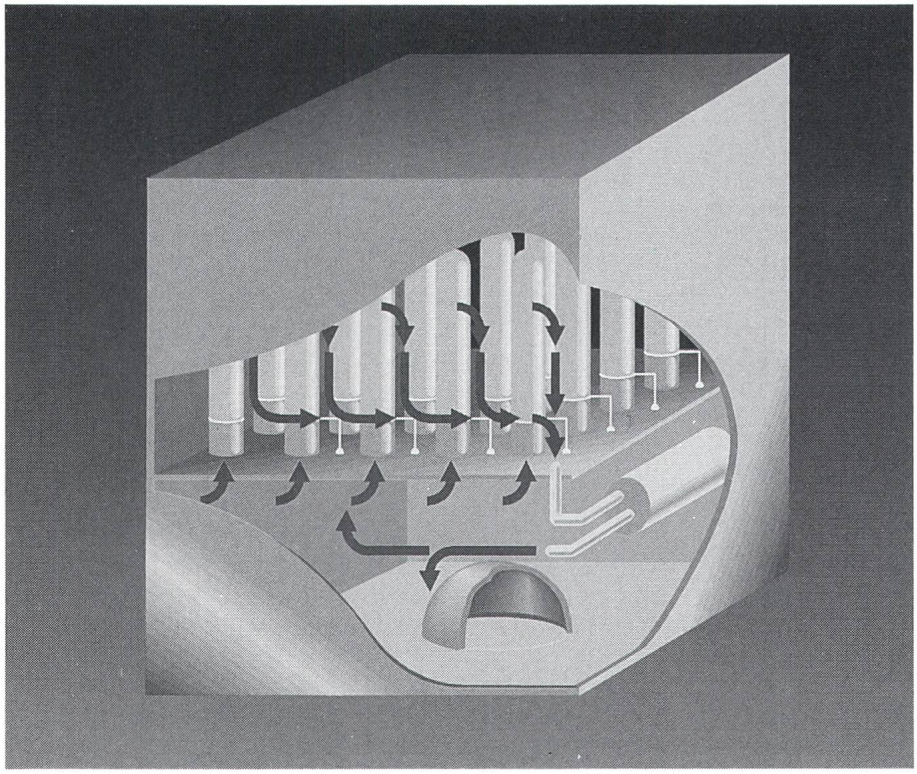

Bild 5 So könnte eine AMTEC-Batterie, eine Zusammenschaltung vieler Zellen innerhalb eines gemeinsamen Kühlbehälters, aussehen. Die Pfeile zeigen den Weg an, den das abgekühlte Natrium nimmt, um von der elektromagnetischen Pumpe in den beheizten Sammelbehälter gedrückt zu werden, aus dem die Zellen gemeinsam mit heissem Natrium versorgt werden

Graphik ABB