Die vier wichtigsten Methoden der direkten Energie-Umwandlung

Autor(en): **Jenny, Ernst**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **79 (1961)**

Heft 23

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-65539

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die vier wichtigsten Methoden der direkten Energie-Umwandlung

DK 621.3

Von Dr. **Ernst Jenny**, Baden

Fortsetzung von S. 372

3. Der MHD-Generator

a. Das Arbeitsprinzip

Der magneto-hydro-dynamische Generator (MHD-Generator) ist für Grosskraftwerke geeignet. Er beruht auf den gleichen Grundgesetzen wie Turbinen-Generator-Gruppen. Seit kurzem wird über ihn viel geschrieben und zwar nicht nur in Fachzeitschriften. So fand sich in «Time» vom 30. November 1959 unter «Science» eine Beschreibung des am weitesten fortgeschrittenen amerikanischen Projektes, der Bild 24 entnommen ist. Die Studie wurde ausgearbeitet in Zusammenarbeit zwischen den Avco Research Laboratories, Everett, Mass. (Dr. *A. Kantrowitz*, Dr. *R. J. Rosa*, u. a.) und der American Electric Power Service Co., New York, NY. (*P. Sporn, J. Tillinghast*) [1], [6].

Die Luft wird wie in einer Gasturbinen-Anlage verdichtet, vorgewärmt und in einer Brennkammer auf etwa 3000° K erhitzt. Durch Zusätze von leicht ionisierbaren Stoffen (sog. «Seeding» = Saatmaterial) sorgt man dafür, dass das Gas bei dieser Temperatur genügend elektrisch leitend ist. Es handelt sich also um *thermische* (Gleichgewichts-) *Ionisation*. Anschliessend erfolgt die Expansion im MHD-Generator unter Abgabe von elektrischer Energie. In diesem Generator sind also Gasturbine und elektrischer Generator zu einer Einheit vereinigt. Ueber einen Wärmeaustauscher gehen die Gase ins Kamin.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass ein MHD-Generator nur zwischen zwei hochliegenden Temperaturgrenzen verwirklichbar ist. Die obere Grenze ist durch die maximal zulässigen Materialtemperaturen gegeben, die untere durch die tiefste noch brauchbare elektrische Leitfähigkeit. Bild 25 zeigt diesen Zusammenhang. Nur bei Zusatz von Saatmaterial besteht überhaupt ein möglicher Arbeitsbereich. Reine Arbeitsgase wären bei den in Frage kommenden Temperaturen nur ganz ungenügend leitend. Als Zusatz eignen sich die Stoffe mit den kleinsten Ionisationspotentialen; diese sind in Volt: Cs 3,87, Rb 4,16, K 4,32, Na 5,12 und Ba 5,19.

Das teure Caesium kommt nur für geschlossene Kreisläufe in Frage (es sei denn, man könne es wirtschaftlich aus den Abgasen zurückgewinnen). Kalium ist billig und auch für offene Prozesse geeignet. Auf den grossen, nicht voll abgeklärten Problemkreis der Leitfähigkeit kann hier nicht weiter eingegangen werden [14].

In den USA haben sich zehn grosse amerikanische Elektrizitätsgesellschaften zusammengeschlossen, um das Avco-Projekt zu unterstützen. Eine Studie hatte nämlich gezeigt, dass es möglich sein sollte, ein Grosskraftwerk mit 50 bis 60 % Wirkungsgrad zu bauen. Der hohe Wirkungsgrad wird hier, im Unterschied zur Brennstoffzelle, mit einer thermischen Maschine (wegen der hohen Spitzentemperatur) erreicht. Bei 3000° K liegt der Carnot-Wirkungsgrad schon über 90 %. Hohe Temperaturen sind hier wohl eher beherrschbar, da der Generator keine beweglichen Teile aufweist. Wir werden auf diese Studie mehrmals zurückkommen. Man frägt sich, wie eine Firma für Flugzeuge wie die Avco (früher Aviation Comp.) zu diesem Projekt komme. Wir werden sehen, dass die Idee des MHD-Generators alt ist. Erst in neuerer Zeit versteht man aber das Verhalten leitender Gase in Magnetfeldern besser. Eine Abteilung der Avco Corp., die unter der Leitung Dr. *A. Kantrowitz* steht, hat sich bei Arbeiten über den Wiedereintritt von Raketen in die Erdatmosphäre grosse Verdienste erworben (Bild 26). Beim Wiedereintritt erhitzt sich die Luft um den Raketenkopf derart, dass sie ionisiert, d. h. elektrisch leitend wird. Durch aus der Raketenspitze austretende magnetische Felder wollte man eine elektrische Bremsung erzielen (statt nur Reibungsbremsung, die die Oberfläche zum Schmelzen bringt). Soviel bekannt ist, wird diese Idee zwar nicht weiter verfolgt, denn das Eintrittsproblem konnte einfacher gelöst werden. Die gewonnenen Erkenntnisse vertieften aber das Verständnis für die Vorgänge im MHD-Generator. Auch hier konnte also wieder von der mit riesigen Staatsmitteln arbeitenden Forschung Nutzen gezogen werden. Bei der Raketenentwicklung wurden auch neue Materialien erprobt, so dass immer höhere Temperaturen technisch erschlossen werden.

b. Vereinfachte Theorie des MHD-Generators

Wir betrachten eine Gasschicht, die durch einen Kanal strömt, Bild 27. Auf ein darin mitgeführtes, freies Elektron

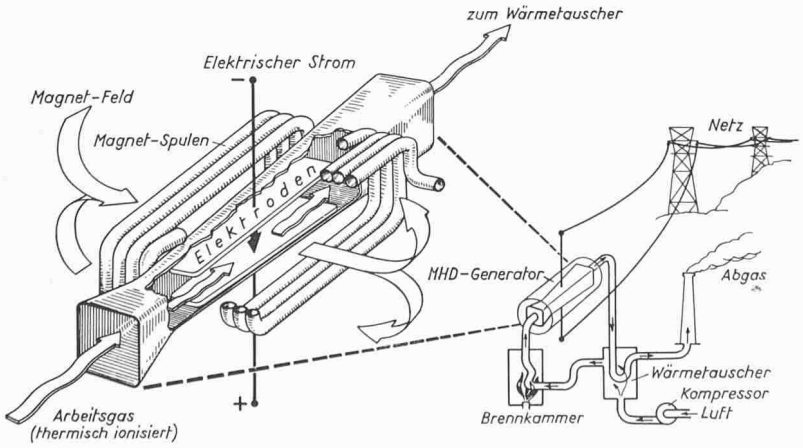

Bild 24. Elektrisches Kraftwerk mit magneto-hydrodynamischem Generator. Rechts ist die Gesamtanlage schematisch dargestellt. Der Prozess entspricht dem Gasturbinen-Kreislauf, nur dass Turbine und elektrischer Generator zu einer Maschine, dem MHD-Generator, vereinigt sind. Wie bei der Gasturbine ist ausser dem hier gezeigten offenen auch ein geschlossener Kreislauf möglich. Links ist der MHD-Generator vergrössert gezeichnet. Das Ionen und freie Elektronen enthaltende Arbeitsgas strömt durch ein horizontales Magnetfeld, das durch mächtige Spulen erzeugt wird. An den Elektroden kann dann ein Gleichstrom abgenommen werden. Der elektrische Strom fliesst also senkrecht zum Magnetfeld; es wird noch gezeigt, warum. (Courtesy TIME Magazine; copyright Time Inc. 1959)

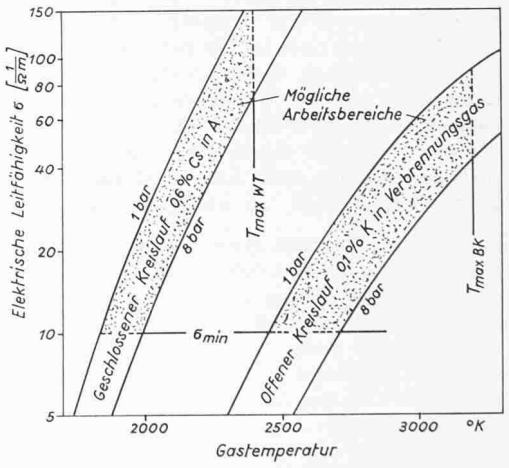

Bild 25. Elektrische Leitfähigkeit σ in Funktion der Temperatur T. Man beachte, wie stark σ von T abhängt. Auch der Druckeinfluss ist beträchtlich. Eine untere Grenze der Betriebstemperatur ist dadurch gegeben, dass σ mindestens $10 \cdot 1/\Omega m$ sein muss, damit der MHD-Generator vernünftige Abmessungen annimmt und guten Wirkungsgrad erreicht. Die obere Grenze ist durch die Materialfestigkeit bestimmt. Im offenen Kreislauf (Bilder 24 und 33) kann das Gas in der Brennkammer ($T_{max\,BK}$) höher erhitzt werden als bei Verwendung eines Wärmetauschers ($T_{max\,WT}$) im geschlossenen Kreislauf (Bild 1, 3b). Dafür findet im letztgenannten Fall ein günstigeres Trägergas, sowie mehr und teureres Saatmaterial Verwendung. Anstelle des Wärmetauschers könnte ein Hochtemperatur-Atomreaktor treten (Bild 34)

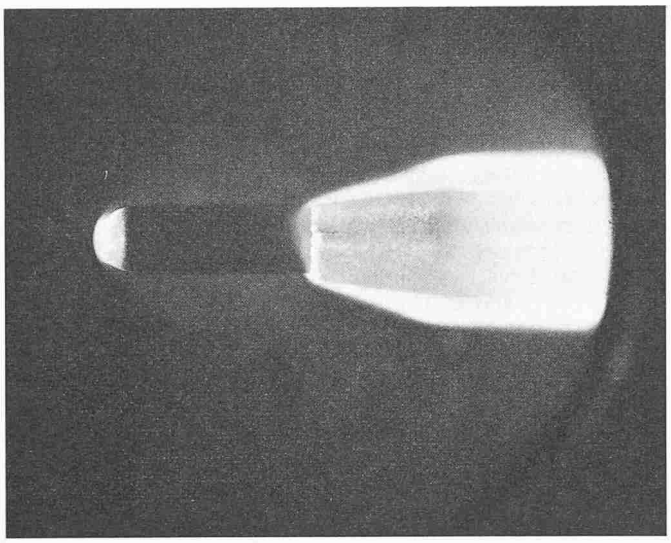

Bild 26. Versuch in einem Plasma-Windkanal des Avco-Everett Research Laboratory. Bei den Untersuchungen im Zusammenhang mit der Raketenentwicklung und der Raumfahrt gewann man tiefere Einsicht in die Strömung ionisierter Gase in Magnetfeldern. Die Magnetohydrodynamik bildet auch die Grundlage zur Berechnung von MHD-Generatoren

wirkt eine Kraft $(-e)$ $(\vec{u} \times \vec{B})$ nach oben; es wird sich also nach oben bewegen. Die Ionen erfahren eine analoge Kraft nach unten. Sie sind aber schwer und träge und werden daher nur wenig abgelenkt. Die geladenen Teilchen fliessen nicht ungestört, sondern stossen immer wieder mit den anderen Teilchen zusammen; zwischen Ionen und Elektronen besteht zudem eine elektrische Wechselwirkung. Diese Bremswirkungen stellen den elektrischen Widerstand dar. Dessen Kehrwert ist die elektrische Leitfähigkeit. Der in der Gasschicht induzierte Strom berechnet sich danach aus folgender Formel:

$$j = \sigma\,(uB - E)$$

Darin ist σ die spezifische elektrische Leitfähigkeit, die man aus der Konzentration der Ladungsträger, der mikroskopischen Bewegung der Teilchen und ihren Zusammenstössen berechnen kann. uB ist die induzierte Spannung; E, wie aus Bild 27 ersichtlich, das Gegenfeld der angelegten Nutzspannung (wie es ein ruhender Beobachter messen würde). $(uB - E)$ ist das Feld, das ein Beobachter feststellen würde, der sich mit dem Gas bewegt. Wenn sich ein stromdurchflossener Leiter, hier unsere Gasschicht, quer durch ein Magnetfeld bewegt, so wirkt auf ihn eine Kraft, die proportional $\vec{j} \times \vec{B}$, also stromaufwärts gerichtet ist. Das Auftreten dieser Raumkraft ist das Neue gegenüber der normalen Gasdynamik; es ist dies das Kennzeichen der Magnetohydrodynamik oder Magnetogasdynamik.

Das Gas muss also Arbeit gegen diese Kraft leisten, indem es im Generator expandiert, z. B. von 10 auf 1 bar. Der erste Teil des Druckabfalles dient der Erzeugung einer Geschwindigkeit u von z. B. 800 m/s. Dann folgt die Expansion gegen die MHD-Kraft. Analog sinkt die Temperatur von etwa 3200 auf 2500° K. Der Druckabfall im Gas ergibt sich für den Fall einer konstanten Durchströmgeschwindigkeit [4]) und bei Vernachlässigung der Reibung aus der Bewegungsgleichung zu:

$$(10) \quad \frac{dp}{dx} = j\,B$$

Man kann von einer «Stromerzeugung durch elektromagnetische Bremsung leitender Gase» sprechen [11].

Die Analogie zur konventionellen Stromerzeugung ist offensichtlich. Dort leistet das expandierende Gas Arbeit an den Turbinenschaufeln. Die Turbine treibt den Generator, in welchem Leiter durch Magnetfelder bewegt werden. Der MHD-Generator beruht somit auf dem Fardayschen Induktionsprinzip von 1838. Farday hat selbst genau den besprochenen Vorgang beschrieben und sogar Messungen gemacht. Bei der Waterloo-Brücke in London hat er den Spannungsunterschied zwischen den beiden Ufern gemessen, den die 300 m breite, leicht elektrisch leitende Themse bei ihrer Strömung durch das Erdmagnetfeld induziert. Daraus konnte er rückwärts näherungsweise die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses berechnen. Auf diesem Prinzip beruhen übrigens handelsübliche Flüssigkeitsmengenmesser.

Mit dem Strom im leitenden Gas ist ein Joulescher Verlust verbunden. Er ist nicht vom Prozess trennbar; Reibung und Wärmeverlust seien aber vorläufig vernachlässigt. Mit u = konstant lautet die Energiegleichung

$$(11) \quad \frac{dh}{dx} = \frac{j\,E}{\rho\,u}$$

Hierin bedeuten dh die Abnahme des Wärmeinhaltes, ρ die Gasdichte. Die übrigen Grössen gehen aus Bild 27 hervor. jE entspricht der abgegebenen elektrischen Leistung.

Der Zustandsverlauf der Expansion ist durch den Polytropen-Koeffizienten

$$\varphi = \frac{dh}{\frac{dp}{\rho}}$$

gekennzeichnet. Da laut Annahme kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, ist φ gleichzeitig der polytrope

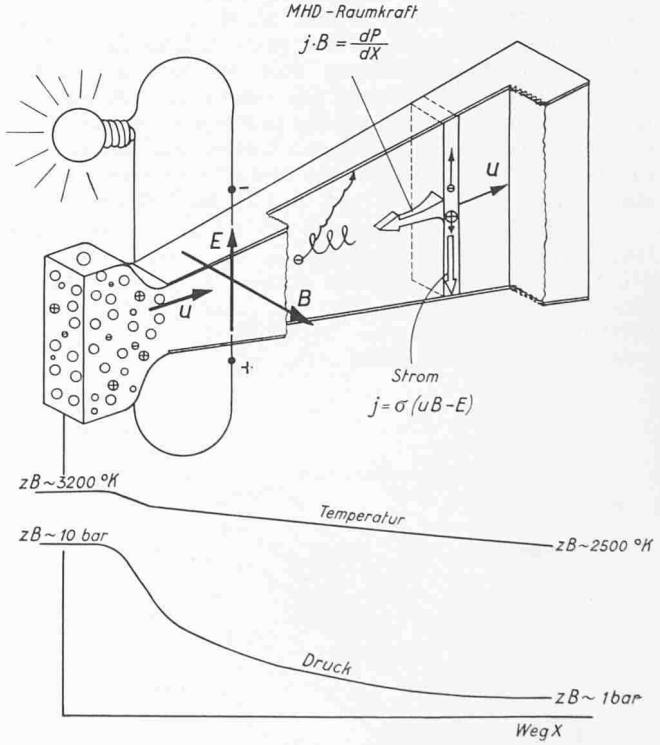

Bild 27. Das Arbeitsprinzip des MHD-Generators. Durch den Generator strömen mit der Geschwindigkeit u viele neutrale Moleküle und weniger als 0,1 ‰ Elektronen und positive Ionen; d. h. die Ionisation ist nicht sehr gross, im Unterschied zum Plasma in Fusionsreaktoren. Das Magnetfeld B ist gegen uns gerichtet. Das Feld E rührt von der Nutzspannung zwischen den Elektroden her. Ein einzelnes ungestörtes Elektron würde unter diesen Bedingungen Zykloidenbewegungen ausführen. Da es aber häufig von den anderen Teilchen gestossen wird, beschreibt es den eingezeichneten Weg zur Elektrode. Wir wollen aber nicht weiter auf dieses mikroskopische Bild eingehen. — Die Grundgesetze des MHD-Generators ergeben sich sehr übersichtlich, wenn man eine Gasschicht betrachtet und annimmt, dass die freien Elektronen und Ionen zwangsläufig darin mitgeführt werden, dass also die geladenen Teilchen so häufig gestossen werden, dass auch sie mit der Geschwindigkeit u der neutralen Teilchen durch das Rohr strömen

[4]) Annahme ungefähr konstanter Durchström-Geschwindigkeit ergibt gute Resultate. Es bestehen aber auch andere Vorschläge, nach denen z. B. der Querschnitt oder der Druck konstant gehalten wird.

Wirkungsgrad des Vorganges, d. h. das Verhältnis der abgegebenen Nutzenergie zum aufgebrauchten Gefälle. φ kann mit den Gleichungen (11) und (10) sofort berechnet werden:

$$(12)\quad \varphi = \frac{dh}{\frac{dp}{\rho}} = \frac{j\,E\,\rho}{\rho\,u\,j\,B} = \frac{E}{u\,B} = \varepsilon$$

ε hängt nur von den Betriebsgrössen ab, und ist auch gerade das Verhältnis von äusserem Last-Widerstand zur Summe von äusserem und innerem Widerstand. Es ist damit einer der wichtigsten Parameter. Wählt man ε, so folgen:

(13) das elektrische Feld $E = \varepsilon u B$

(14) der Strom nach Gl. (9) $j = \sigma u B (1 - \varepsilon)$

der Druckverlauf aus Gl. (10)

(15) der Temperaturverlauf aus $\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}\varepsilon}$

(κ = Isentropen-Koeffizient)

Die pro Volumeneinheit abgegebene elektrische Leistung ist

$$(16)\quad \frac{dA_{el}}{dV} = j\,E = \sigma\,u^2 B^2 \varepsilon\,(1 - \varepsilon)$$

Die Expansionsarbeit des Gases:

$$(17)\quad \frac{dA_{ex}}{dV} = u\,j\,B = \sigma\,u^2 B^2\,(1 - \varepsilon)$$

Die Differenz dieser letzten Ausdrücke ist die Joulesche Wärmeentwicklung:

$$(18)\quad \frac{dQ_j}{dV} = j\,(u\,B - E) = \sigma\,u^2 B^2\,(1 - \varepsilon)^2$$

Die drei letzten Gleichungen sind in Bild 28 dargestellt.

Grosse Einheitsleistung erfordert grosse Werte von σ, u und B. Das Problem, eine grosse Leitfähigkeit σ zu erreichen, wurde in Bild 25 dargestellt. Das Erzeugen einer grossen Geschwindigkeit u braucht einen Teil des Wärmeinhaltes auf, weshalb in der MHD-Strecke die Temperatur und σ sinken. Das Optimum von σu^2 liegt für Gase mit grosser spezifischer Wärme bei hohen Geschwindigkeiten (für grosse Anfangstemperaturen T_0 im Ueberschallgebiet). Für B werden Werte bis etwa 5 Vs/m² (50 000 Gauss) in Betracht gezogen. Das gibt mächtige Magnetspulen. Eisenkerne sind schon bei 2 Vs/m² gesättigt und es werden meist, wie in Bild 24, reine Luftspulen vorgesehen[5]).

Um die Wärmeverluste klein zu halten, wird der Querschnitt ungefähr quadratisch gewählt. Aus Bild 27 ist ersichtlich, dass $E \sim 1/b$ ist, d. h. sich umgekehrt proportional zur Seitenlänge b ändert. Angenähert gilt auch $B \sim 1/b$. ε bleibt also längs dem Kanal konstant; die Expansion verläuft rein polytropisch.

Die Energiegleichung kann leicht integriert werden, wenn man für die spezifische Wärme c_p ($dh = c_p\,dT$) einen Festwert einsetzt. Bei Edelgasen ist diese Annahme erfüllt, weniger gut bei heissen Verbrennungsgasen. Bei der polytropen Expansion ändert sich σ sehr stark. Ein exponentieller Ansatz ist zweckmässig:

$$(19)\quad \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{k_\sigma}$$

Der Exponent k_σ hat z. B. die Grössenordnung 5. Setzt man Gl. (16) in Gl. (11) ein und berücksichtigt, dass im stationären Falle durch jeden Querschnitt die konstante Menge $\dot{m} = \rho u b^2$ fliesst, so erhält man durch Integration

$$(20)\quad \frac{T}{T_0} = \left[\left(\frac{T_E}{T_0}\right)^{1-k_\sigma} - \text{konst.}\,X\right]^{\frac{1}{1-k_\sigma}}$$

Für σ = konstant, d. h. $k_\sigma = 0$, folgt die einfache lineare Beziehung

$$(20a)\quad \frac{T}{T_0} = \frac{T_E}{T_0} - \text{konst.}\,X$$

Die in der Literatur häufig zu findenden Formeln für σ-konst. sind wegen der in Wirklichkeit starken Abhängigkeit von T mit Vorsicht zu gebrauchen. Wenn man den richtigen Mittelwert einsetzt, so ergeben sich aber für Ueberschlagrechnungen brauchbare Resultate, wie Bild 29 zeigt.

Die Rechenmethode lässt sich leicht als Differenzenverfahren auf den Fall erweitern, wo u sich verändert und Reibung und Wärmeleitung auftritt (Bild 30). Bei Verwendung elektronischer Rechenmaschinen kann man direkt von den Grundgleichungen ausgehen und die wirklichen $\sigma(p,T)$- und $h(p,T)$-Diagramme berücksichtigen.

Alle abgeleiteten Formeln beruhen auf der «Gasschicht-Betrachtung» (Bild 27). Da ist zu fragen, was für Folgen der in Wirklichkeit vorhandene «Schlupf» der elektrischen Teilchen habe. Die grossen Ionen haben wenig Schlupf. Die kleinen Elektronen sind schwächer gekuppelt und haben die Tendenz, etwas nachzuhinken. Der Strom bekommt daher eine axiale Komponente, und es treten axiale Felder auf. Es handelt sich dabei um den bekannten Hall-Effekt, dessen Grösse von der magnetischen Induktion B, sowie Art und Zustand des Gases (p, T) abhängt. Zum Verständnis der beschriebenen Generatorart ist das zwar nicht wesentlich, zwingt aber unter Umständen zu Gegenmassnahmen, wie z. B. Unterteilen der Elektroden. Wir werden sehen, dass man den Effekt in gewissen Fällen ausnutzen kann [7].

Weiter müssen u. a. noch folgende Verluste berücksichtigt werden:

1. Wirbelstromverluste: Am Ein- und Austritt sind diese so gross [13], dass ihre Verringerung unerlässlich ist. Man lässt dazu das Magnetfeld ausserhalb der Elektroden nach einem bestimmten Gesetz abnehmen. Weiter baut man horizontale Isolierplatten in den Ein- und Austritt, wie das von den Natriumpumpen her bekannt ist.

5) Fussnote 5 s. S. 390

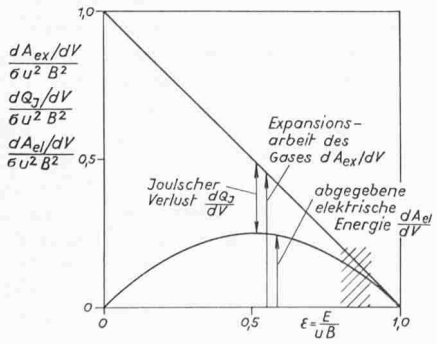

Bild 28. Der Einfluss von ε (Gl. 12) auf die Energieumsetzung, wenn nur der Joulesche Verlust berücksichtigt wird. Die abgegebene elektrische Leistung hat bei $\varepsilon = 0{,}5$ ein Maximum. Dort wird man aber nicht arbeiten, da der Wirkungsgrad auch nur 0,5 beträgt. Für $\varepsilon \to 1$ geht der Wirkungsgrad theoretisch gegen 1. Der Generator erhält dann so grosse Abmessungen, dass die in Wirklichkeit unvermeidbaren Reib-, Wärme- und Magnetverluste untragbare Werte annehmen. Die günstigen ε-Werte liegen im Bereich zwischen 0,8 und 0,9

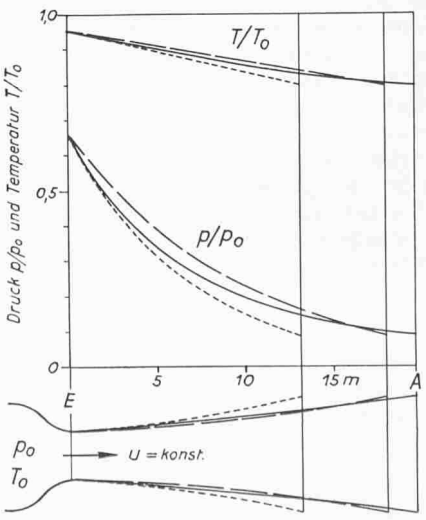

Bild 29. Druck- und Temperaturverlauf in einem MHD-Generator nach Gl. (20), d. h. ohne Wärme- und Reibungsverluste. Das total verarbeitete Druckgefälle ist in allen Fällen gleich

——— Leitfähigkeit σ abhängig von T nach Gl. (19)

- - - - mit $\sigma = \sigma_E$ = konst. ergibt sich ein falscher Verlauf

— — mit $\sigma = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_E + \sigma_A)$ findet man eine brauchbare Näherung. Im einzelnen stimmt der Kurvenverlauf aber nicht

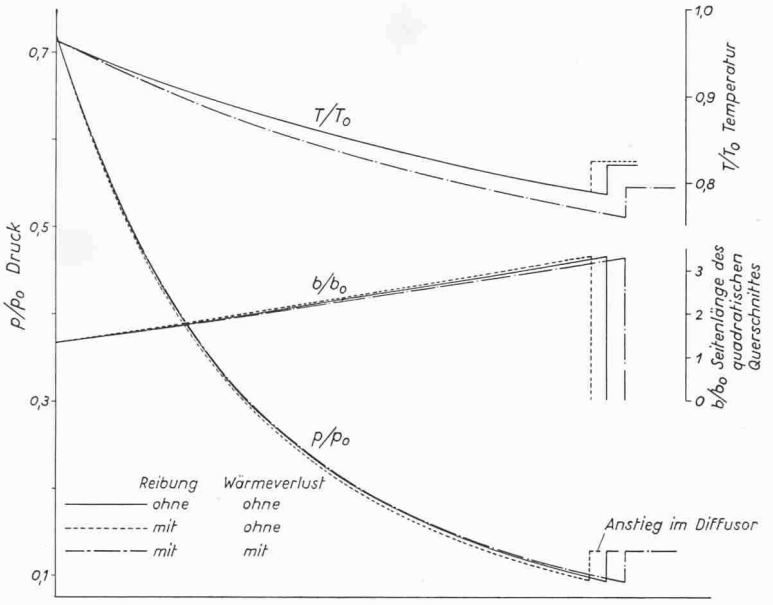

Bild 30. Der Einfluss der Reibung und des Wärmeverlustes bei einem 400 MW-MHD-Generator mit u = konst. Die Abhängigkeit $\sigma = f(T)$ ist berücksichtigt. Der Reibverlust ist nicht gross (siehe p/p_o-Kurven). Der Wärmeverlust ist bedeutend (siehe Temperaturverlauf)

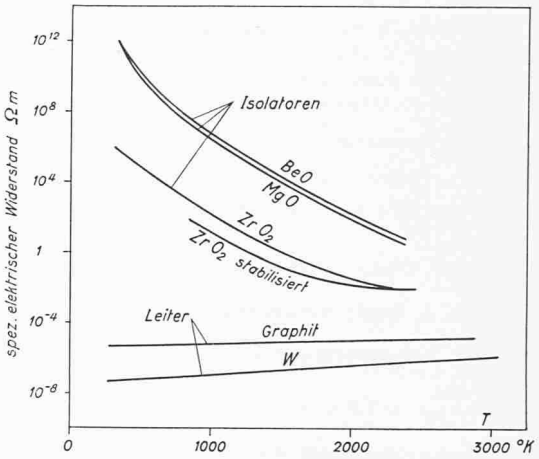

Bild 31. Der elektrische Widerstand von Hochtemperatur-Materialien. Im Arbeitstemperatur-Bereich der MHD-Generatoren sinkt der elektrische Widerstand der Isolatoren (Wandmaterialien) gegen die Werte der Leiter (Elektroden-Materialien)

Die Einbauten können zur Dampferzeugung dienen oder auch so ausgebildet sein, dass die Einlaufdüse und der Austrittsdiffusor verkürzt werden. Weitere Wirbelstromverluste entstehen infolge des Halleffektes, sowie der Temperatur- und Geschwindigkeits-Grenzschichten.

2. Reibungsverluste: Diese sind relativ unbedeutend. Bei allen bisher genannten Verlusten entsteht Wärme bei sehr hoher Temperatur. Diese Wärme ist thermodynamisch noch ausnutzbar. Daher muss nur ein Bruchteil der Reibungsverluste als verloren betrachtet werden. Die Ausnutzung der Abwärme ist aber mit grossem Aufwand (Bild 33) und weiteren Verlusten verbunden. Es ist daher erstrebenswert, möglichst viel Energie direkt in Elektrizität umzuwandeln. Grundsätzlich ungünstiger sind Verluste, deren Wärme bei tiefer Temperatur anfällt. Dies ist z. B. der Fall, wenn die Wände des Generators mit Dampfrohren gekühlt werden. Die Wandwärmeverluste sind daher sehr schädlich.

3. Wärmeverluste: Eine einfache Rechnung zeigt, dass der Wärmeübergang an die Wände sehr gross ist. Wegen der grossen Geschwindigkeit überragt trotz der hohen Temperatur der Konvektionsverlust den Strahlungsverlust. Angaben über den Wärmeübergang finden sich in [8]. Dieser Verlust hat zur Folge, dass man sich nur für grosse Einheiten (über 100 MW) gute Wirkungsgrade versprechen kann. Wie Bild 30 zeigt, ist er dann tragbar[6]).

4. Magnetverluste: Diese sind beträchtlich; sie verlangen eine ausgeklügelte Spulenform. Sie fallen bei tiefer Temparatur an und sind nur tragbar, wenn dA_{el}/dV in Gl. (16) gross ist.

5. Elektrische Leitung der Wände: Neben Betriebssicherheit bei hohen Temperaturen sollten die Wände noch gute Isolatoren sein. Bild 31 zeigt die Verhältnisse für einige in Frage kommende Materialien.

c. Material-Probleme

Mit Bild 31 ist nur eines der schwierigen Materialprobleme angedeutet. Die ungefähren Schmelzpunkte der eingezeichneten Baustoffe sind: BeO 2800° K, MgO 3050° K, ZrO_2 stabilisiert 2900° K, Graphit 3900° K und W 3680° K. Die Angaben in der Literatur streuen stark. Umfangreiches Zahlenmaterial ist in «High-Temperature Technology» von E. Campbell, John Wiley & Sons, Inc., New York, enthalten.

Festigkeit, Dehnung, Brüchigkeit, Thermoshockverhalten, chemischer Widerstand gegen Sauerstoff und Saatmaterial sind sehr unterschiedlich, und kein Material scheint nur gute Eigenschaften aufzuweisen. Die mit der hohen Temperatur verbundenen Konstruktionsprobleme sind sicher sehr gross. Korrosion und Erosion werden viel Mühe bereiten. Es müssen geeignete Elektroden gefunden werden. Diese Entwicklung wird also Zeit brauchen.

d. Die Erzeugung von Wechselstrom

Der besprochene Generator erzeugt Gleichstrom. Seine Umkehrung ist die bekannte Gleichstrom-Natrium-Pumpe, wie sie in Kernreaktoren verwendet wird (Bild 32). Solche Pumpen können nach verschiedenen Methoden auch mit Wechselstrom gespiesen werden. Man denkt natürlich sofort an die Umkehrung, was einen Wechselstrom MHD-Generator ergeben würde. Leider geht das nicht so einfach. Wie erwähnt, muss der MHD-Generator mit sehr starken Magnetfeldern betrieben werden, was bei Wechelstrombetrieb enorme Blindleistungen erfordert.

Eine Möglichkeit würde darin bestehen, die Strömung pulsieren zu lassen. Es scheint auch verlockend, die höchsten Temperaturen nur kurzzeitig durch Druckwellen (verbunden mit Verbrennung) zu erzeugen. Wenn man sich auch bei leitenden Gasen magnetische «Raumkraft-Ventile» vorstellen kann, so scheint doch die Steuerung instationärer Vorgänge mit so hohen Temperaturen recht schwierig. In [14] wird auch ein rotierendes Magnetsystem vorgeschlagen.

Durch zeitliche Veränderung der Saatmaterial-Zufuhr entsteht auch eine Wechselstromkomponente. Vorschläge für geschichtete Gase werden in [11], [14] gemacht. Die nachfolgend beschriebenen Projekte geben aber dem leichter zu beherrschenden Gleichstrom-Typ den Vorzug. Die nachherige Umwandlung in Wechselstrom ist mit hohem Wirkungsgrad möglich.

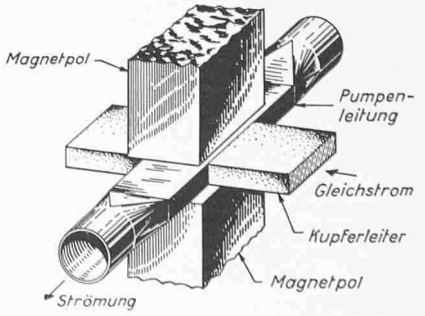

Bild 32 (rechts). Gleichstrom-Natrium-Pumpe = Umkehrung des MHD-Generators. Es wird Strom durch das leitende Natrium geschickt, das senkrecht durch ein Magnetfeld strömt. Dadurch entsteht eine magnetohydrodynamische Raumkraft, die das Natrium bewegt

[6]) Fussnote 6 s. S. 390

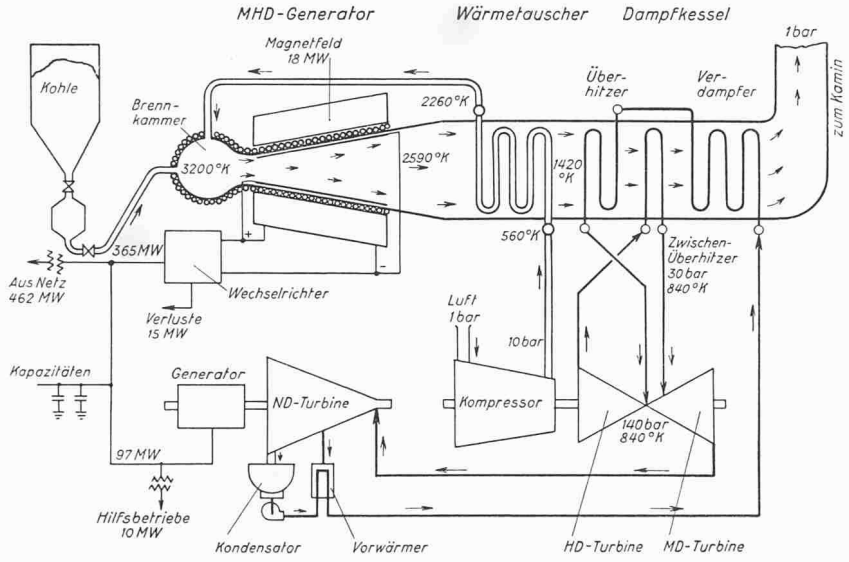

Bild 33. MHD-Grosskraftwerk von 462 MW nach Kantrowitz-Sporn. Es handelt sich um einen offenen, kohlengefeuerten Prozess. Der Gesamtwirkungsgrad wurde zu 55 % berechnet. Um dies zu erreichen, muss die Wärme in Wärmetauschern und Abgaskesseln gut ausgenützt werden

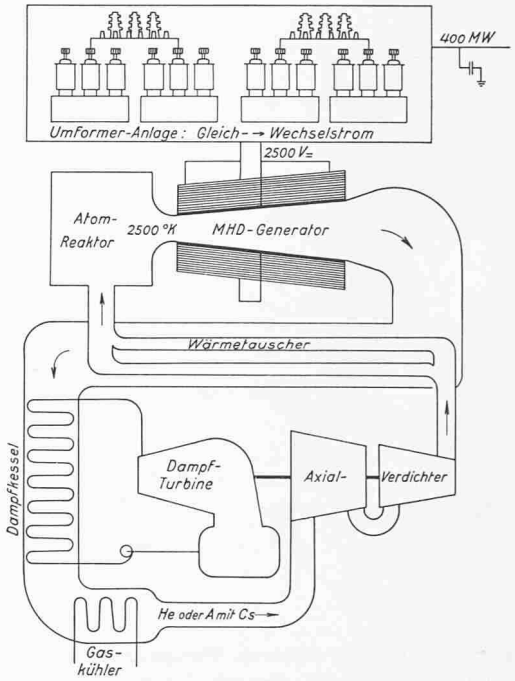

Bild 34. MHD-Generator in geschlossenem Kreislauf. Wegen den in Abb. 25 erklärten Zusammenhängen kann die maximale Temperatur hier kleiner gewählt werden. Das Druckniveau kann über oder unter Umgebungsdruck liegen und möglicherweise verändert werden. Anstelle des Reaktors könnte auch ein von aussen geheizter Gaserhitzer vorgesehen werden. Oben ist die umfangreiche Wechselrichteranlage angedeutet

e. Projekte für Grosskraftwerke

Bild 33 zeigt das Prinzipschema eines Kraftwerkes von 462 MW; es wurde der Avco-AEPS-Studie entnommen. Ein Axialkompressor, der durch eine Dampfturbine angetrieben wird, verdichtet die Luft auf etwa 10 bar. Nach der Vorwärmung auf etwa 2000° C in einem Wärmeaustauscher erfährt sie in der mit Kohle beschickten Brennkammer eine weitere Erwärmung auf etwa 3000° C. Nach der Entspannung im MHD-Generator ist die Temperatur immer noch 2300° C, so dass die Abwärmeausnützung dafür entscheidend ist, dass der theoretisch hohe Wirkungsgrad der Anlage erreicht wird. Wenn man an den Wärmeaustauscher denkt, der mit Temperaturen von 2000° C und mehr arbeiten soll, so wird die Schwierigkeit des Baues einer solchen Anlage sofort klar. Die Amerikaner hoffen, von den Erfahrungen der chemischen Industrie und der Raketenentwicklung profitieren zu können. Der nachgeschaltete Kessel liefert genügend Dampf für die Verdichter-Turbinen, aber auch noch für eine Leistungsturbine, deren Generator 97 000 kW abgibt. 365 000 kW werden direkt im MHD-Generator erzeugt, und zwar als Gleichstrom, der dann in Wechselstrom umgeformt werden muss. 55% Gesamtwirkungsgrad scheint heute vielleicht etwas optimistisch, über 50 % sollte aber erreichbar sein. Die Autoren [6] bemerken dazu, dass man noch nicht sagen kann, wann und ob sich ein solches Kraftwerk bauen lässt. Viele weitere Studien und vor allem auch Versuche müssten vorerst noch gemacht werden.

In einem neuen Beitrag zu [14] werden die Aussichten schon etwas optimistischer beurteilt. Die Schwierigkeiten und Verzögerungen infolge der Entwicklung eines Hochtemperatur-Wärmeaustauschers sollen in einer ersten Etappe dadurch umgangen werden, dass mit Sauerstoff angereicherte Verbrennungsluft verwendet wird[7]). Das Molverhältnis N_2/O_2 in normaler Luft beträgt 3,76. Verbrennung von Kohle mit minimalem Luftüberschuss erzielt die in Bild 33 vorausgesetzte Endtemperatur von 3200° K nur, wenn die Vorwärmetemperatur 2260° K beträgt. Eine Reduktion des N_2-Ballastes auf $N_2/O_2 \approx 2$ erlaubt, die Vorwärmung auf leichter beherrschbare Temperaturen zu beschränken. Der Gesamtwirkungsgrad des Prozesses sinkt allerdings um einige Prozente und die Anlage wird etwas teurer.

In Bild 34 ist der MHD-Generator in einen geschlossenen Kreislauf eingeschaltet. Korrosions- und Erosionsprobleme sind dann weniger zu befürchten. Als Gas wird Helium oder Argon mit Caesium-Saatmaterial vorgeschlagen. Auch hier werden die Verdichter durch Abgasdampfturbinen angetrieben. Nach dem Vorwärmen tritt das Gas in den Hochtemperaturreaktor ein, der aber heute noch nicht existiert. Dann folgen Generator, Wärmetauscher, Dampfkessel und hier neu ein Gasrückkühler. In diesem Projekt soll die volle Leistung im MHD-Generator abgegeben werden. Die Wechselrichteranlage ist eigens etwas grösser dargestellt als im Bild 33. Zur Umwandlung von 400 000 kW Gleichstrom mit 2500 V in Wechselstrom sind sehr viele Quecksilberumformer nötig. In einer Kostenaufstellung für ein MHD-Kraftwerk stellt daher die Umformeranlage den grössten Posten dar. Die amerikanische Studie kommt zum Schluss, dass trotzdem die totale Investition pro kW nicht höher ist als bei konventionellen Kraftwerken. Es bleibt aber als Vorteil der wesentlich grössere Wirkungsgrad der MHD-Anlage von über 50 % statt nur etwa 40 %.

f. Historisches

Ein MHD-Generator der besprochenen Bauart ist schon 1926 patentiert worden, Bild 35. Am M. I. T. werden Versuche mit einer Quecksilberdampfanlage durchgeführt, wobei dem Dampf Caesium beigemischt und die Ionisation durch ein 200 MHz Hochfrequenzfeld erzeugt wird (Bild 1, 3b). Die Ionisation wird also nicht thermisch erzeugt; man

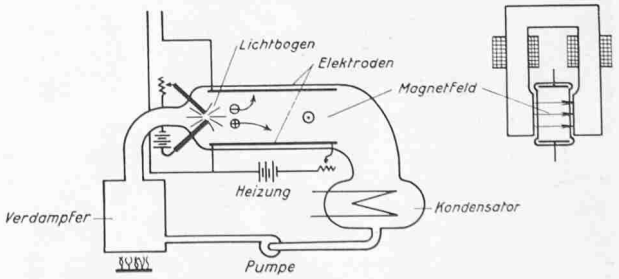

Bild 35. «Thermisch-Elektrischer Generator» nach einem Patent von Rudenberg von 1926. Es handelt sich um einen geschlossenen Kreislauf mit einem kondensierbaren Arbeitsmedium (Hg). Man weiss zwar heute, dass wegen Rekombination die vorgeschlagene Ionisation mittels Lichtbogen nicht genügt. Sonst ist aber die Grundidee des MHD-Generators richtig wiedergegeben

7) Fussnote 7 s. S. 390

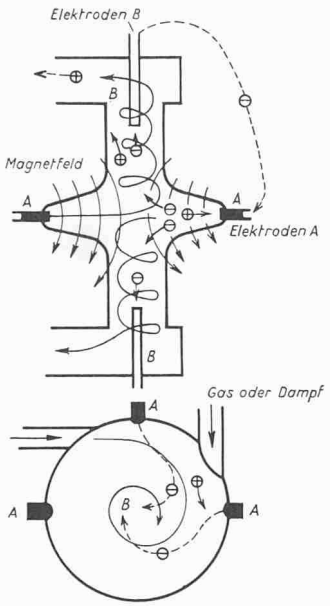

Bild 36 (links). Generator nach einem Patent von Petersen von 1919. Die Strömung geht spiralförmig durch den scheibenartigen Raum, der vom Magnetfeld senkrecht durchflutet wird. Die Elektroden sind bei A und B angebracht

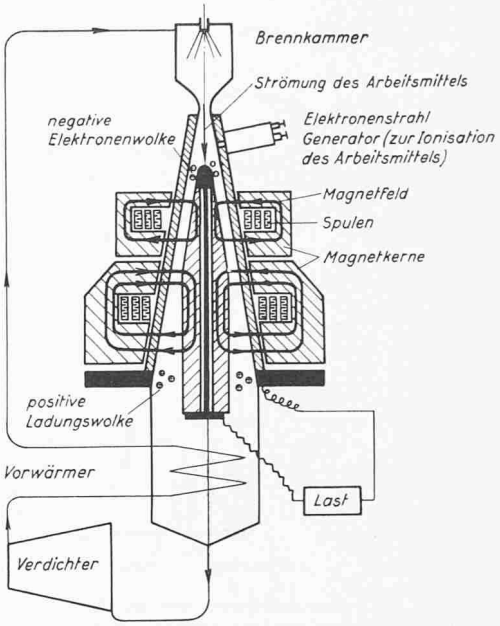

Bild 37 (rechts). Der 1935 patentierte Karlowitz-Generator. Hier ist der Generator mit einem ringförmigen Kanal dargestellt. Das Magnetfeld ist überall radial. Die Leistung wird zwischen der negativen Raumladungswolke am Eintritt und der positiven Ionenwolke am Austritt abgenommen

kann daher mit tieferen Temperaturen arbeiten. Ob diese Ionisationsmethode wirtschaftlich ist, erscheint zweifelhaft. Zwar wäre die nötige Leistung, um einmal die nötigen Ionen und Elektronen zu erzeugen, leicht aufzubringen. Wegen der dauernden Rekombination muss dieser Aufwand aber sehr viele Male wiederholt werden. — Schon 1919 gab es ein Patent nach Bild 36, das zeigt, dass es verschiedene mögliche geometrische Anordnungen gibt.

Auf einem anderen Prinzip beruht der 1935 patentierte Karlowitz-Generator, Bild 37. Er arbeitet unter Ausnützung des axialen Raumladungsfeldes, das, wie besprochen, eine Folge des Hall-Effektes ist. Bisher war es sekundär; hier ist es aber das Wesentliche. Kesselring, ein deutscher Erfinder, hatte schon viel früher versucht, diese Idee anzumelden. Das Patent wurde ihm vom Deutschen Patentamt versagt, da er nicht in der Lage war, zu beweisen, dass das Verfahren wirklich durchführbar sei.

Mit einem kleinen, etwa 10 cm langen linearen Versuchskanal hat Westinghouse 1938 bis 1944 [9] nach diesem Prinzip Versuche durchgeführt, wobei 17 W bei 70 V erzielt wurden. Diese Versuche bedeuteten aber keinen Erfolg. Das Gas wurde zu weit weg vom Magnetfeld ionisiert und der Grossteil der Ionen und Elektronen vereinigten sich vor der Nutzstrecke. Dies ist der Nachteil der nicht thermischen (also nicht Gleichgewichts-)Ionisation, die bei den verwendeten Temperaturen noch nicht auftritt. Die hohen elektrischen Felder infolge der Ladungstrennung gaben Anlass zu grossen Funken. Die Stromstärke war ungleich und die Wirbelstromverluste viel zu gross.

g. Versuche in den letzten Jahren

Auf Grund der Erfahrung mit den Versuchen am Karlowitz-Generator war es 1959/60 Westinghouse möglich, in Rekordzeit Versuchsanlagen nach dem früher beschriebenen Prinzip (Bild 27) aufzustellen, Bilder 38 und 39 [9]. Der grössere Generator nach Bild 39 ist dabei bemerkenswert. Er war bis vor kurzem der einzige, der Versuchszeiten von einigen Minuten erlaubte und mit gewöhnlichem Brennstoff betrieben werden kann.

In der Brennkammer verbrennt man zum Anwärmen der Anlage während etwa einer Stunde Propan und Sauerstoff. Dann wird auf Dieselöl mit Kalium-Saatmaterial und Sauerstoff umgeschaltet. Den Sauerstoff bläst man tangential ein, was eine gute Wandkühlung und eine stabile Ver-

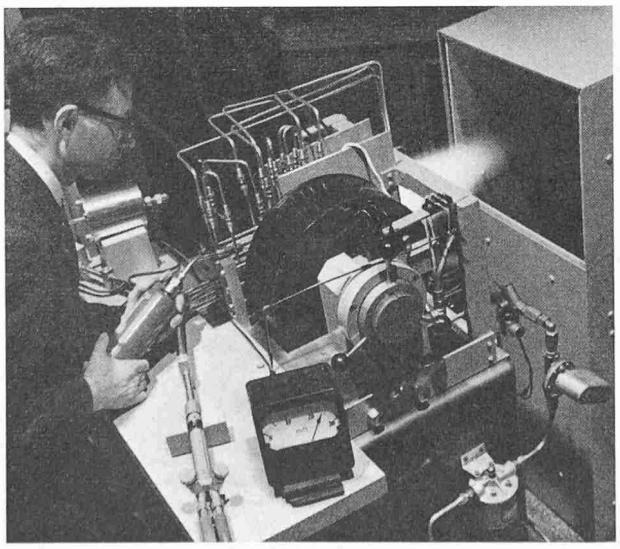

Bild 38. MHD-Generator Demonstrationsmodell von Westinghouse. Als Brenngas dienen H_2 und O_2 mit K-Saatmaterial. Das Gas strömt von links nach rechts (wo man es ausblasen sieht) zwischen den Magnetpolen hindurch. Der Generator erzeugt nur 1 W

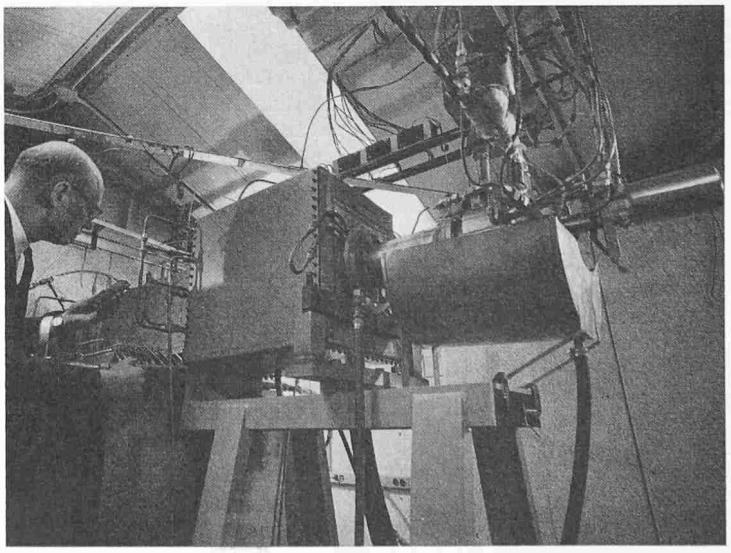

Bild 39. 10 kW-MHD-Generator von Westinghouse. Der Wirbel-Brennkammer rechts wird Dieselöl, Sauerstoff und Saatmaterial zugeführt. Der grosse, wassergekühlte Kasten in der Mitte enthält einen Mischraum. Links folgt die ebenfalls wassergekühlte MHD-Versuchsstrecke. Die grossen Elektromagnete können abgesenkt werden und sind daher auf dem Bild nicht sichtbar

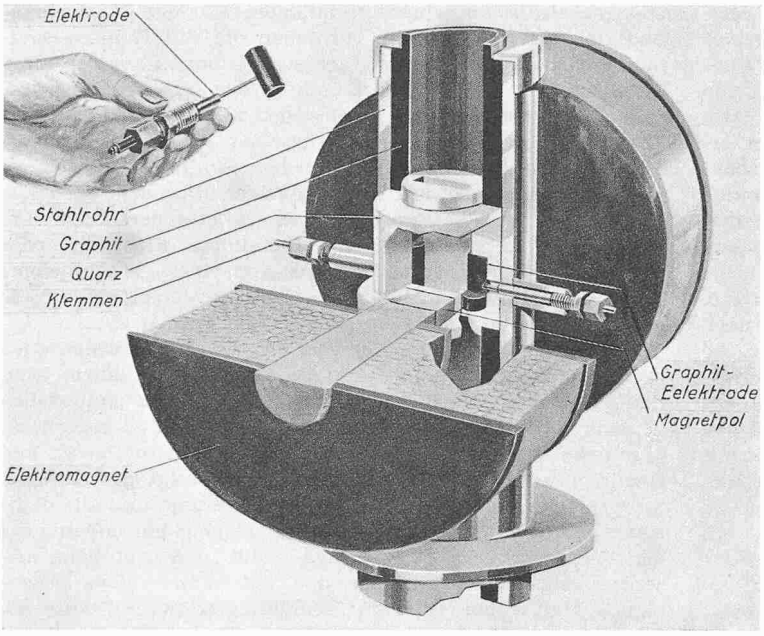

Bild 40. MHD-Versuchsgenerator der General Electric. Die Versuchsstrecke ist aus Quarz gepresst. Sie ist zwischen Graphitzylinder gesteckt; das Ganze wird von Stahlrohren gehalten. Die Magnete sind für 8600 Gauss dimensioniert. Man sieht rechts und links die Kohlenelektroden

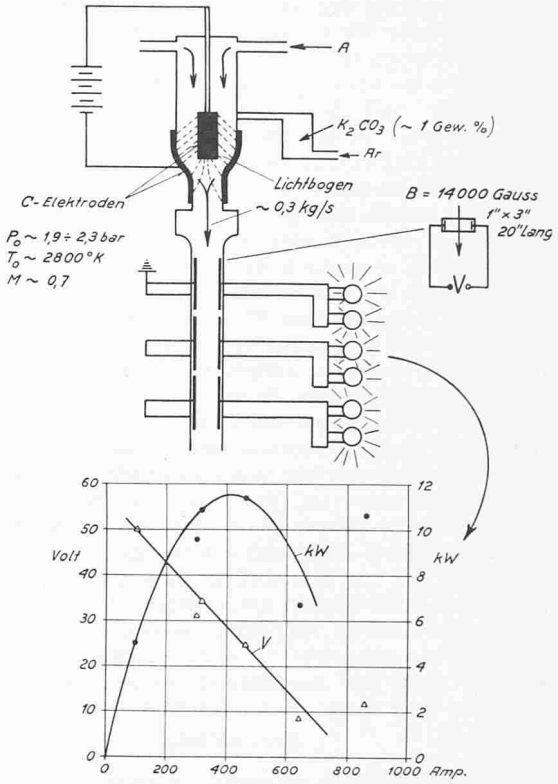

Bild 41. MHD-Versuchsanlage der Avco Corp. Das heisse Plasma wird erzeugt, indem Argon durch einen elektrischen Lichtbogen geblasen wird. Vor dem Bogen wird K_2CO_3 beigemischt. Unten sind über dem elektrischen Nutzstrom die Klemmenspannung in V und die Leistung in kW aufgetragen

brennung ermöglicht. Sauerstoff statt Luft erlaubt, ohne Vorwärmung Flammtemperaturen über 3000° K zu erreichen.

Das Gas findet in der Mischkammer Raum und Zeit, um vollständig zu verbrennen. Die Kammer und die anschliessende MHD-Strecke (Länge 410 mm, Querschnitt 41 × 124 Quadratmillimeter) weisen einen Kühlwassermantel auf und sind innen mit Keramik (MgO, ZrO_2) ausgefüttert. Die Keramiksteine sind gegenseitig verkeilt, um eine selbsttragende Struktur und eine glatte Oberfläche zu erreichen. Die Elektroden aus Graphit oder Wolfram sind in drei gegenseitig isolierte Teilstücke unterteilt. Es wurden beispielsweise folgende Daten gemessen:

Leistung	10,4	kW
Temperatur in der Brennkammer	3162	° K
Geschwindigkeit im Eintritt der MHD-Strecke	812	m/s
Durchströmende Menge	0,481	kg/s
Magnetische Induktion	1,4	Vs/m² (14 000 Gauss)

Die elektrische Leitung der Wände war beträchtlich, da sie bei diesen hohen Temperaturen nicht mehr gut isolieren. So stellte man eine Leerlaufspannung von nur 100 V statt, wie erwartet, 141 V fest.

Schon etwas früher trat die General Electric Co. mit der Mitteilung an die Oeffentlichkeit, dass sie einen kleinen Versuchsgenerator betreibe, Bild 40. Die Gase von 4000° K wurden einem 2500 kW Lichtbogen-Windkanal entnommen. Es wurde 1 % K_2CO_3 beigemischt. Die grösste Versuchsdauer betrug 9,2 s bei 900 W Leistungsabgabe. Die Probleme, die so hohe Temperaturen stellen, werden klar, wenn man liest, dass in dieser kurzen Versuchszeit der engste Querschnitt durch Abbrand der Quarzwände um 72 % zunahm.

Die erste Versuchsanlage war diejenige von Avco (Bild 41) [1], [12]. Der Lichtbogen konnte durch Batterien während 5 s aufrecht erhalten werden. Für diese kurze Versuchsdauer liess sich die Anlage ungekühlt betreiben. Wie erwartet, nimmt die Nutzspannung ungefähr linear mit der Stromstärke ab. Im Bereiche hohen Wirkungsgrades erreichte man etwa 50 V und 5 kW, während die maximale Leistung fast 12 kW betrug. Zu deren Veranschaulichung hat man eine grosse Zahl Lampen angeschlossen. Die Avco Corp. wollte damit ihre Pionierleistung beleuchten, die darin bestand, erstmalig auf diese Art brauchbare Energie erzeugt zu haben. Bild 42 zeigt eine Ansicht der Anlage.

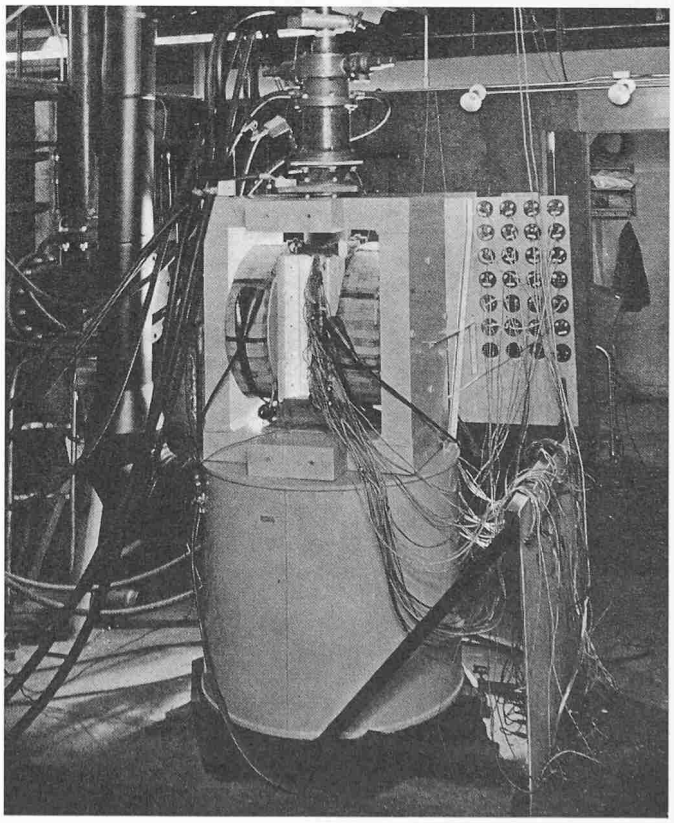

Bild 42. Abbildung der Avco-Anlage gemäss Bild 41. Man erkennt oben die Zuführungen zum Lichtbogen. Die Versuchsstrecke liegt zwischen den Magneten. Die Gase blasen in den grossen zylindrischen Behälter aus

Im Verlaufe des Jahres 1960 wurde ein grösserer Versuchsgenerator für einige hundert kW erstellt. Ein enormer Magnet erzeugt eine magnetische Induktion von 3,2 Vs/m². 1,8 kg/s heisse Arbeitsgase entstehen durch Verbrennung von Brennstoff und Sauerstoff. Der Kanalquerschnitt von 76 × 230 mm² ist bedeutend grösser als bei den bisher erwähnten Anlagen. Die vor kurzem aufgenommenen Messungen ergaben bereits interessante Resultate. So machten sich kurzgeschlossene Hall-Ströme unangenehm bemerkbar, trotzdem die Elektroden unterteilt waren. Ein Generator dieser Grösse kann wesentlich dazu beitragen, derartige wichtige Nebeneffekte zu untersuchen und unter Kontrolle zu bringen.

Die Thomson Ramo Wooldridge Inc. (USA) führt nach einer Notiz im «Flugkörper» (Heft 4, 1961, S. 133) Versuche mit einem 1 bis 10 kW «Wirbelstrom-MHD-Generator» durch, womit nun auch das Prinzip nach Bild 36 verwirklicht worden ist. Die Firma hofft einen Generator von 1000 kW für kurze Stromentnahmen entwickeln zu können, der mit einem Leistungsgewicht von 0,45 kg/kW allen andern Generatoren überlegen ist, die heute in Raumflugkörpern zu diesem Zwecke verwendet werden. Als Wärmequelle ist ein Spezial-Feststoff-Raketentriebwerk vorgesehen.

Bevor wir zur elektrochemischen Stromerzeugung übergehen, sei noch darauf hingewiesen, dass auch elektrostatische Generatoren vorgeschlagen wurden. Bei diesem expandiert das Gas, das Ladungen enthält, gegen ein elektrisches Feld. Der aussichtsreicher scheinende MHD-Generator hat aber diese Ideen verdrängt.

Schluss folgt (in Heft 25 am 22. Juni)

[5]) Durch Kühlung geeigneter Magnetspulen auf etwa 10° K könnte der Magnetverlust wesentlich verringert werden. Auch bei Berücksichtigung des Aufwandes für die Kälteanlage bleibt ein Gewinn. Dieser würde noch grösser bei noch tieferer Kühlung und Verwendung von Supra-Leitern. Dies würde den Weg zur Verwendung höherer B-Werte öffnen. Da z. B. in Gl. (16) B^2 steht, hätte dies grosse Konsequenzen. In den spätern Zahlenbeispielen sind aber überall «konventionelle» B-Werte vorausgesetzt.

[6]) Der Wärmeverlust steigt wesentlich, wenn glühende Verbrennungsprodukte die Strahlung erhöhen. Die Kühlung der Brennkammer und des Generator-Einlaufes stellt daher konstruktiv schwierige Probleme.

[7]) Die Anlage zur Sauerstoffgewinnung kann mit derjenigen für die Tiefkühlung der Magnetspulen kombiniert werden.

«Machen Sie diesen Blödsinn nicht»

Entgegnungen zu den Worten von H. Marti über die Expresstrassen in Heft 19, Seite 327 der SBZ 1961

Die herausfordernde Kritik an den Expresstrassen kann und darf nicht unbeantwortet bleiben. Angesichts der vielen Druckerschwärze, die diesem Thema schon gewidmet wurde, möchte ich mich kurz fassen:

1. Die Klagetöne von Arch. Marti «Basel soll zerschnitten werden; Bern wird geteilt; Lausanne entstellt; Genf halbiert; St. Gallen zerrissen, Luzern zerstört, Zürich . . .» greifen einem ans Herz, denn niemand bereitet gerne Schmerzen, indem er etwas Lebendiges zerschneidet. Fragen wir uns aber einmal, wer oder was eigentlich die Zerschneidung, die Halbierung, die Trennung verursacht. Sind es die erst kommenden Expresstrassen oder sind es die heute schon vorhandenen und noch anschwellenden Verkehrsströme an sich?

Bei den Ein- und Ausfallstrassen aller Städte ist deren Ueberquerung durch Fussgänger und Autos fast nicht möglich. Sie bedeuten also heute schon, ohne dass sie zu Expresstrassen ausgebaut sind, eine effektive Trennung der benachbarten Stadtteile. Fussgänger und Autofahrer schreien nach kreuzungsfreien Querverbindungen, um dieser Trennung abzuhelfen. Da der auf unseren Strassen rollende Verkehr nur zum kleinen Teil Fernverkehr, im wesentlichen aber Ziel-, Quell- und Binnenverkehr ist, den wir mit keiner Umleitung beseitigen können, ist die Zerschneidung eine unvermeidliche Folge des Verkehrs und des Verkehrsvolumens an sich, nicht aber eine Folge der Strassenart. Die Trennung ist bei einer Strasse der üblichen Art intensiver als bei einer Expresstrasse, denn die zu diesem Strassentypus gehörenden unter- oder oberirdischen Querverbindungen für den Fussgänger und für den Fahrverkehr verbinden die Stadtteile wesentlich besser als die üblichen Lichtsignalanlagen auf den alten Strassen mit Niveaukreuzungen. Wird die Expresstrasse gar auf längere Strecken hoch- oder tiefgelegt, so wird der Zusammenhang des Quartiers in einer Art und Weise erhalten, wie es bei den bisher üblichen Stadtstrassen niemals möglich wäre. Ueberdies wird der Planer in jedem einzelnen Fall versuchen, die Expresstrassen in bestehende Cäsuren einzulegen, seien es bestehende Bahnlinien, Flussläufe oder dergleichen, so dass noch weniger von einer (zusätzlichen) Trennung und Zerschneidung des Siedlungsgebietes durch die modernen Verkehrsanlagen gesprochen werden kann.

2. So gut wie in der Schweiz gibt es offensichtlich auch in Deutschland Fachleute und Laien, die eine andere Meinung vertreten, die nicht erkennen oder «nicht eingestehen wollen» (um mit den Worten von Arch. Marti zu sprechen), dass beim Bau der deutschen Autobahnen die Interessen und Bedürfnisse der Städte sträflich vernachlässigt worden sind. Es gibt aber auch hier eine Götterdämmerung, und alle deutschen Städte sind heute daran, die bestehenden ungenügenden Zubringerstrassen zwischen Stadt und Autobahn leistungsfähig und unfallsicher, d. h. autobahn-ähnlich, auszubauen. Man schaue sich die Bemühungen dieser Städte an. Ich nenne aus eigener Anschauung nur Mannheim, Hannover, Düsseldorf und Essen und verweise auf eine Vernehmlassung des Deutschen Städtetages «Zur Verkehrsnot der Städte» («Baumeister», Heft Nr. 5, Mai 1961), in der es wörtlich heisst «Stadtautobahnen (mit allen ihren Varianten) und Hochstrassen scheinen im augenblicklichen Zeitpunkt die beiden besten Lösungen zu sein, das innerstädtische Strassennetz zu entlasten, die Verkehrsgeschwindigkeiten zu erhöhen und die Gefahrenmomente zu reduzieren», und in «Strasse und Autobahn» (ebenfalls Mai 1961) empfiehlt ein (deutscher) Verkehrsfachmann die Ergänzung des Autobahnnetzes durch ein Netz von Schnellverkehrsstrassen, bedingt durch das «Ansteigen des gemeindlichen und zwischengemeindlichen Kraftfahrzeugverkehrs». Die in Deutschland angewendeten Bezeichnungen Schnellverkehrsstrasse, Stadtautobahn usw. sind zwar von den unsrigen verschieden, täuschen aber nicht darüber hinweg, dass dort nachträglich erstellt werden muss, was von uns von Anfang an gemacht werden soll, nämlich Verbindungsstrassen zwischen den Autobahnen einerseits und den innerstädtischen Verkehrs-Quellen und -Zielen anderseits, die in ihrem Standard demjenigen der Autobahnen ebenbürtig sind.

3. Weder die Klagen noch die Schmähungen von Arch. Marti können unsere Ueberzeugung ins Wanken bringen, dass die schweizerische Konzeption der Expresstrassen verkehrstechnisch richtig ist, ohne städtebauliches Unheil anzurichten. Natürlich können bei fehlerhafter Anwendung eines an sich guten Prinzips auch schlechte Lösungen entstehen. Dies ist auf allen Gebieten so. Seine Kritik leidet überdies an der fatalen Tatsache, dass sie nicht gleichzeitig durch einen konstruktiven Versuch begleitet wird, uns *die* Lösung des Verkehrsproblems zu zeigen, die *allen* Anforderungen gerecht werden könnte.

Hans Bosshard, Stadtplaner, Bern, Bundesgasse 38

Der Artikel Hans Martis zeugt von einer erschreckenden Verkennung der tatsächlichen Verhältnisse. Die Hauptaufgabe der Expresstrassen liegt darin, die innenstädtischen Verkehrsverhältnisse zu sanieren. Der Ziel- und Quellverkehr, d. h. der Verkehr mit Ziel oder Quelle in der Stadt selbst, wird von den überlasteten Stadtstrassen weggenommen, auf einige entsprechend angeordnete Hauptleitungen, eben die Expresstrassen, gesammelt, und möglichst nahe an Ziel oder Quelle an das innerstädtische Strassennetz wieder abgegeben bzw. abgenommen. Wenn auch die Expresstrassen die Autobahnen auf Stadtgebiet verbinden, spielt der Durchgangsverkehr eine vollständig untergeordnete Rolle; z. B. für Zürich 10% vom einströmenden Verkehr. Die Expresstrassen haben somit 90% innerstädtischen Wert, und ohne sie ist eine zukünftige Entwicklung unserer Städte nicht zu denken. Die USA haben schon vor 10 Jahren gleiche