

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 15

Artikel: Über den Stand der Entwicklung magnetohydrodynamischer Generatoren zur Erzeugung von Netzstrom

Autor: Nabholz, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916389>

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: 17.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Über den Stand der Entwicklung magnetohydrodynamischer Generatoren zur Erzeugung von Netzstrom

Von H. Nabolz, Baden

538.4

Der mit Verbrennungsgas betriebene magnetohydrodynamische (MHD)-Generator ist heute soweit entwickelt, dass er als Gleichstromquelle grosser Leistung und kurzer Betriebsdauer eingesetzt werden kann. Ein Konzept, das mit einiger Sicherheit konkurrenzfähigen Netzstrom zu liefern verspricht, ist noch nicht gefunden. Von grosser Bedeutung wird sein, ob es gelingt, kostengünstig günstige supraleitende Spulen für das Magnetfeld herzustellen. Der geschlossene Kreislauf mit einem gasgekühlten Reaktor als Wärmequelle birgt noch ungelöste physikalische Probleme. Die Entwicklung solcher MHD-Generatoren wird dann sehr aktuell, wenn der Reaktor eine Gastemperatur von mehr als 1500 °C zulässt.

1. Einleitung

Die Entwicklung der thermischen Kraftwerke ist im letzten Dezenium gekennzeichnet durch eine imponierende Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades. Besonders augenfällig wird das, wenn man den Wärmebedarf pro kWh für ein ganzes Netz betrachtet. Die Electricité de France errechnete, gemittelt über alle Kraftwerke, 1950 pro kWh einen Bedarf von 4600 kcal, während heute nur noch 2600 kcal notwendig sind [1] ¹⁾. Parallel dazu ging eine Verminderung der Kosten pro installiertes kW. Diese Entwicklungstendenz fortzuführen scheint nur möglich, wenn es gelingt, die Temperatur, bei der die Wärme zugeführt wird und damit den theoretisch erreichbaren Wirkungsgrad, zu erhöhen.

Versuche in dieser Richtung zeigten bei konventionellen Maschinen, dass die Materialien, die den Anforderungen in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit, mechanische Festigkeit und rationelle Bearbeitung genügen, im Verhältnis zur er-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Le générateur magnétohydrodynamique (MHD) actionné par un gaz de combustion est maintenant suffisamment développé pour pouvoir servir de source de courant continu de grande puissance et de brève durée de fonctionnement. On n'a toutefois pas encore trouvé un système capable de fournir du courant de réseau plus ou moins concurrentiel. Si l'on parvient à fabriquer des bobines supraconductrices d'un prix avantageux, pour le circuit magnétique, cela aura une grande importance. Le circuit fermé avec réacteur à gaz refroidi servant de source de chaleur pose des problèmes de physique qui ne sont pas encore résolus. Le développement de tels générateurs MHD deviendra très intéressant, lorsque le réacteur admettra une température de gaz de plus de 1500 °C.

zielten Temperaturerhöhung zu teuer sind. Wesentlich andere Bedingungen sind beim Bau von magnetohydrodynamischen (MHD)-Generatoren zu erfüllen.

2. Idee des MHD-Generators

1959 wurde das Konzept des MHD-Generatorkraftwerk von A. R. Kantrowitz und P. Sporn erstmals dargelegt. Dieser Generator passte so gut zur angestrebten Entwicklung in Richtung höherer Temperaturen, dass sich sofort viele Stellen für seine Möglichkeiten und Probleme interessierten.

In Fig. 1 ist die Grundidee dargestellt. Das Arbeitsgas aus der Brennkammer ($T = 2500 \dots 3000^\circ\text{C}$) wird in einer Einlaufdüse bis z. B. knapp unter die Schallgeschwindigkeit ($M \approx 0,8$) beschleunigt. Sich expandierend durchströmt es anschliessend mit z. B. konstanter Geschwindigkeit v (z. B. 800 m/s) einen Kanal (z. B. 16 m lang, mittlerer Querschnitt 2 m²), der von einem senkrecht zur Kanalachse stehenden Magnetfeld B (3...6 Vs/m²) durchsetzt ist. Das thermisch ionisierte Gas enthält freie Elektronen und Ionen und ist daher elektrisch leitend (die Leitfähigkeit σ hat die Grössenordnung von 10 (1/Ωm), Salzwasser ≈ 25 (1/Ωm)). Es entsteht eine Leerlaufspannung ($D \cdot |v \times B|$ z. B. 800 m/s \cdot 5 Vs/m² = 4 kV für $D =$ Elektrodenabstand = z. B. 1 m) senkrecht zur Bewegungs- und Magnetfeldrichtung, die über die eingezeichneten Elektroden an eine äussere Last gelegt werden kann. Gehört zum Strom durch die Last die Stromdichte J

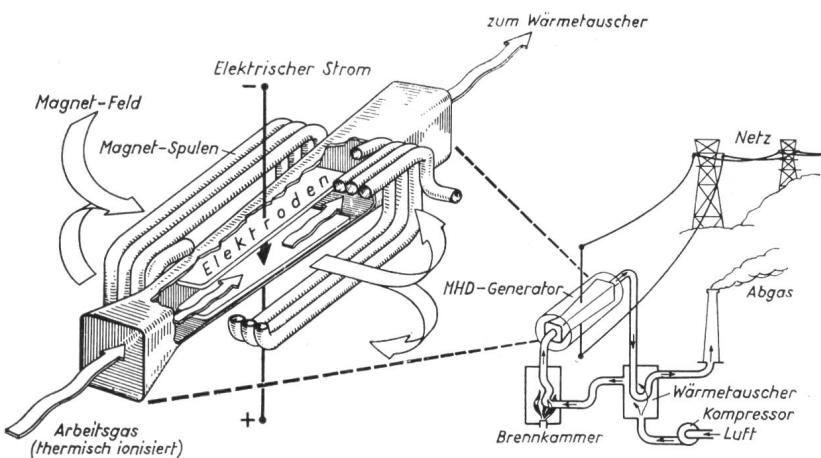


Fig. 1
Prinzip des MHD-Generators
Time Magazine 1959

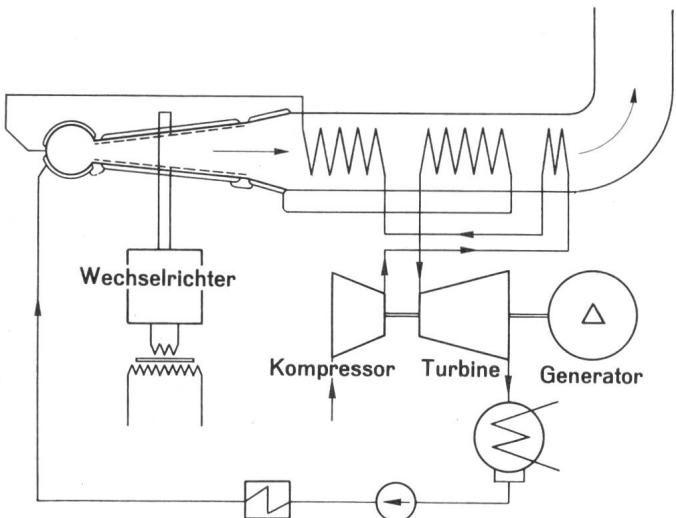


Fig. 2
Prinzipschema einer MHD-Generatoranlage

im Gas, so entsteht eine gegen die Strömung gerichtete Raumkraft $[J \times B] = dp/dx = \text{Druckabfall}$. $v \cdot [J \times B]$ ist dann die Arbeitsleistung des sich expandierenden Gases und $v \cdot [J \times B] \cdot \varepsilon$ die nach aussen abgegebene Leistung pro Volumeneinheit [$\varepsilon = \text{Last}/(\text{Last} + \text{Innenwiderstand des Generators})$].

Da dieser Generator keine rotierenden Teile enthält und die Kanalwände gekühlt werden können, ist es sehr nahe liegend, anzunehmen, dass er auf einem höheren Temperaturniveau als Turbinen betrieben werden kann. Das Prinzip einer vollständigen Anlage ist in Fig. 2 dargestellt.

Die Resultate der seit 1959 veröffentlichten Forschungs ergebnisse sollen hier soweit dargelegt werden, dass daraus hervorgeht, wie weit die Arbeiten geführt haben, welche Hauptprobleme sich noch stellen und wie die Wirtschaftlichkeit des Konzepts etwa zu beurteilen ist.

3. Der MHD-Generator mit Verbrennungsgas als Arbeits medium

Das durch den Kanal strömende Gas ist dank der sog. thermischen Gleichgewichtsionisation elektrisch leitend; d. h., die Temperatur ist so hoch, dass die energiereichsten Elektronen die Gasatome bei einem Zusammenstoss ionisieren. Um viele solche Ionen zu erhalten, wird dem Gas sog. Saat material, das ist ein Element mit kleiner Ionisationsenergie V_I (z. B. Cäsium $V_I = 3,893 \text{ eV}$ oder Kalium $V_I = 4,34 \text{ eV}$), zugemischt. Der Gleichgewichtszustand ist dadurch charakterisiert, dass pro Zeiteinheit gleichviel Ionen erzeugt werden wie Rekombinationen von Ionen und Elektronen vorkommen. Massgebend für die Elektronentemperatur und die Konzentration des atomar vorliegenden Saatmaterials (Cs oder K). Weiter bestim mend für die elektrische Leitfähigkeit des Gases ist die Beweglichkeit μ_e der Elektronen bzw. μ_i der Ionen. Sie hängt von der Temperatur, dem Druck und vom Streuquerschnitt der im Gas vorhandenen Partikel ab und ist umgekehrt proportional zur Masse der Ladungsträger [3; 4]. Das Gas ist ein Leiter mit einer grossen Beweglichkeit der negativen Ladungsträger (Elektronen) und einer viel kleineren, der schweren positiven Ionen. Man hat demnach mit einem starken Halleffekt zu rechnen. Das führt zu folgender Vek-

torgleichung für Strom und Spannung:

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) = \mu_e [\vec{J} \times \vec{B}] + \mu_e \mu_i ([\vec{J} \times \vec{B}] \times \vec{B})$$

Oder in Komponenten geschrieben, wenn:

$$u_y = u_z = 0$$

$$B_x = B_y = 0$$

$$u_x = u \quad \text{Gasgeschwindigkeit}$$

$$B_z = B \quad \text{Magnetfeldstärke}$$

$$\vec{E}' \text{ von aussen angelegtes Feld, wobei } E_z = 0$$

Ferner sei:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{u} \times \vec{B} \quad \text{und} \quad \beta_e = \mu_e B$$

Dann gilt:

$$J_x = \frac{\sigma}{1 + \beta_e^2} (E_x' - \beta_e E_y') + \sigma \frac{\mu_i}{\mu_e} E_x'$$

$$J_y = \frac{\sigma}{1 + \beta_e^2} (E_y' + \beta_e E_x') + \sigma \frac{\mu_i}{\mu_e} E_y'$$

Mit Vektoren dargestellt ergeben diese Gleichungen die Fig. 3.

Fließt das Gas in einem Kanal, so werden dem Strom und dem elektrischen Feld von der Anordnung der Elektroden und deren Schaltung abhängige Randbedingungen aufer legt. Es ergeben sich 3 grundsätzliche Möglichkeiten gemäss Fig. 4.

Über die Vorgänge in solchen Kanälen weiss man heute recht gut Bescheid.

Messungen an kleinen Kanälen belegen die Richtigkeit der Berechnungen von σ im Temperaturbereich von etwa $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ bis hinauf zu $2800 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei tieferen Temperaturen muss der Einfluss der dort möglichen Bildung von KOH und KCN sowie die Anlagerung von Elektronen an OH, O, evtl. auch an NO, NO₂, CN, C₂ etc., noch besser abgeklärt werden. Es herrscht hier noch eine gewisse Unsicherheit über die Grösse der Gleichgewichtskonstanten dieser Reaktionen. In Fig. 5 sind gemessene und berechnete Leitfähigkeitswerte in Funktion der Gastemperatur zusammengestellt.

Kennt man σ in Funktion von T und p , so ist ein wichtiger Parameter, der die notwendige Gastemperatur und damit die Vorwärmtemperatur T_V bestimmt, bekannt.

Die Realisierbarkeit und die Kosten einer MHD-Anlage hängen stark von der Temperatur T_V ab, auf die die Brennkammerzuluft vorgewärmt werden muss. Je tiefer die noch eine genügende Leitfähigkeit ergebende Temperatur T_A am Kanalende sein darf, umso weniger hoch muss T_V sein. σ wird bei abnehmendem Druck besser, nicht nur wegen der zunehmenden Beweglichkeit, sondern auch wegen der abnehmenden Konzentration der erwähnten störenden Verbin

dungen. Diese Überlegungen führen zu MDH-Generatoren, deren Enddruck unter 1 bar liegt. Die Ab-

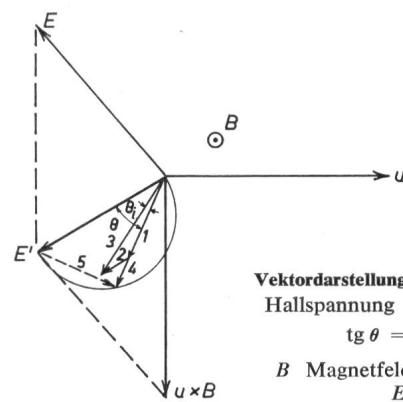


Fig. 3
Vektorendarstellung des Stromes in einem Plasma
Hallspannung von J_t nicht berücksichtigt

$$\operatorname{tg} \theta = u_e B; \operatorname{tg} \theta_i = u_i B$$

$$B \text{ Magnetfeld; } u \text{ Gasgeschwindigkeit; }$$

$$E \text{ äusseres Feld}$$

$$1: J_e = v_e n_e e; 2: J_i = u_i n_i e E'; 3: J = J_e + J_i; 4: J/\sigma; 5: v_e \times B$$

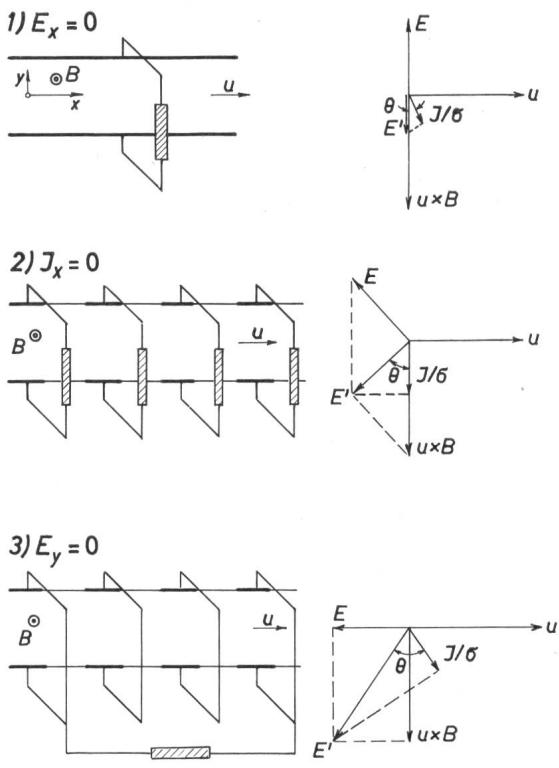


Fig. 4

Auslegungarten eines MHD-Generators

E elektrische Feldstärke im Laborsystem; E' elektrische Feldstärke im mit dem Gas mitbewegtem System; J Stromdichte; B magnetische Induktion; u Gasgeschwindigkeit; σ elektrische Leitfähigkeit des Gases

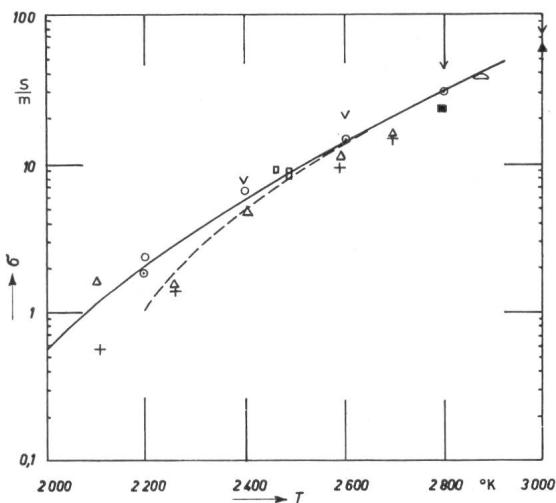


Fig. 5

Elektrische Leitfähigkeit von Verbrennungsgas

σ elektrische Leitfähigkeit des Gases; T Temperatur
Experimentelle Ergebnisse verschiedener Autoren:

Δ , \square , $-$, $+$, \triangle , \diamond , \circ

Pariser Ergebnisse von MHD-Symp. 1964: \circ Theorie Freck, Bericht [85], \vee Theorie Bincer, Bericht [2], $--$ Theorie Westinghouse, Bericht [98]; Theoretische Kurve Frost [3]:

gase müssen über einen Kompressor dem Kamin zugeleitet werden.

Der tiefe Druck verkleinert zudem den Wärmeübergang auf die Kanalwände (allerdings auch auf die nachfolgenden Kesselwände).

Für den Kanal gilt [5]:

$$\frac{dQ}{dN_{el}} = \left(\frac{dQ}{dN_{el}} \right)_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{2,1}$$

- dQ Wärmeverlust durch die Wände pro Längeneinheit des Kanals
- dN_{el} Über die Elektroden nach aussen abgeführt elektrische Energie pro Längeneinheit des Kanals
- p Gasdruck im Kanal
- p_0 willkürliche Referenzgrösse

Das Verhältnis des Wärmeverlustes dQ pro Längeneinheit des Kanals zur erzeugten elektrischen Energie dN_{el} nimmt etwas mehr als quadratisch mit dem Druck ab.

Diese Erkenntnis, kombiniert mit den guten Resultaten aus Experimenten über das Korrosionsverhalten kalter Wände, ergibt eine aussichtsreiche Kanalauslegung. Solche Wände bestehen aus gekühlten metallischen «Bausteinen», die mit Al_2O_3 -«Mörtel» zu Kanalwänden zusammengefügt werden. Der Übergang zu heissen Wänden, bei denen die Bausteine aus Keramik bestehen, bringt Schwierigkeiten wegen der Korrosion, den auftretenden Wärmespannungen, aber auch weil die in Frage kommenden Materialien bei Temperaturen oberhalb $1600^{\circ}C$ elektrisch nicht mehr genügend isolieren. Soll sich die, die Wärme relativ schlecht leitende Keramiksicht nicht über diese Temperaturgrenze erwärmen, so muss der Temperaturgradient gross und die Schichtdicke entsprechend klein sein (1...2 mm). Daher wird auch die Technologie der aufgespritzten Keramiksichten in die Versuche einbezogen.

Eng mit der Wandkonstruktion verbunden ist das Problem der Elektroden, die einen Elektronenstrom von einigen A/cm^2 abgeben müssen. Nimmt man einen Kathodenfall bis gegen 100 V, bei einer Klemmspannung von 3...4 kV in Kauf, so scheinen kalte Elektroden eine mögliche Lösung zu sein. Auf kalten metallischen Elektroden bildet sich aus dem Verbrennungsgas heraus ein Niederschlag von Graphit, der die verlangte Stromdichte hergibt [6; 7]. Heisse Elektroden versucht man herzustellen z. B. aus ZrO_2 oder ZrB_2 . Da solche Materialien eine Ionenleitfähigkeit aufweisen, müssen die damit verbundenen Polarisationseffekte abgeklärt werden. Solche Elektroden hätten u. a. den Vorteil, dass der Spannungsabfall an den Elektroden nur einige Volt betragen würde. Es braucht ja immer eine Spannung, um den Strom durch die Grenzschicht zu treiben, weil die Gasgeschwindigkeit und damit die EMK des Generators ($V \times B$) dort gegen Null geht.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der vorliegenden Experimente: Die Resultate unterstützen die theoretischen Arbeiten [8], die aussagen, die Stromverteilung im Kanal sei stabil.

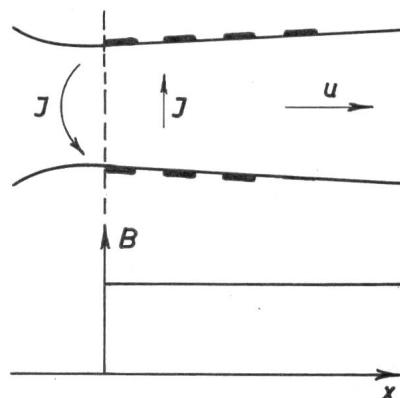


Fig. 6
Rückstrom am Kanaleintritt
 J Stromdichte
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Von besonderem Interesse ist die Berechnung der Ströme an den Kanalenden. Zwei Effekte bestimmen in diesen Abschnitten die Stromverteilung [9; 10; 11; 12].

Erstens entsteht ein Rückstrom durch das Gas (Fig. 6). Zweitens treten Wirbelströme auf, da ein bewegter Leiter in das Magnetfeld eintritt (Fig. 7).

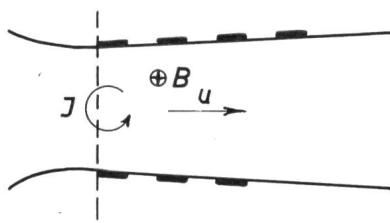


Fig. 7
Wirbelstrom
am Kanaleintritt

Diese Störungen werden kleiner und greifen weniger in den Kanal hinein, wenn das Magnetfeld etwa um einen Kanaldurchmesser über die Kanalenden hinaus verlängert wird. Eine genaue Diskussion dieser Verhältnisse ist notwendig, wenn das Druckniveau gesenkt und damit die Kanäle weit und kurz werden.

Zur Kanalauslegung gehört noch das Magnetfeld. Drei Auslegungsarten werden untersucht [13]:

1. Konventionelle, mit Druckwasser gekühlte Kupferspulen.
2. Tiefgekühlte Spulen, die auf Rechnungen basieren, die zeigen, dass z. B. für Aluminium die Abkühlung auf ca. 20 °K mehr Einsparung an Ohmschen Verlusten bringt als Energie notwendig ist, um die Restverluste von 20 °K auf die Umgebungs temperatur hinauf zu pumpen. Man schätzt, dass solche Spulen ca. 5mal weniger Energie verbrauchen als wassergekühlte Kupferspulen.
3. Die Forschung auf dem Gebiet der Supraleiter zeigt, dass die für einen MHD-Kanal anzustrebende Feldstärke von 5 T beträchtlich unterhalb der kritischen Feldstärke liegt. Das Problem, Spulen mit supraleitenden Drähten zu bauen, liegt in den Abmessungen, die weit über das hinausgehen, worüber heute gut extrapolierte Erfahrungen vorliegen. Handelt es sich doch darum, in Volumen von bis 40 m³ ein Feld von 5 T zu erzeugen.

Ein weiteres spezifisches MHD-Generator-Problem ist die Rückgewinnung des Saatmaterials aus den Abgasen. Der Kaliumgehalt wird zwischen 0,1 und 1 Atomprozent liegen

Dies kann durch flüssige Abscheidung + Auswaschen + Filtrierung mittels Elektrofilter erreicht werden. Der notwendige Aufwand und die Kosten für die Wiederaufbereitung können heute jedoch noch nicht übersehen werden.

Diese Hinweise auf den Stand der Entwicklung zeigen, dass prinzipiell die Möglichkeit, einen MHD-Kanal zu realisieren, vorhanden ist. Dies findet seinen Niederschlag in den grosszügigen MHD-Forschungsprojekten der AVCO, CEGB und EDF.

Die AVCO-Everett Research Laboratory (Massachusetts) projektierten zusammen mit der American Electric Power Service Corporation (N. Y.) eine Versuchsanlage von je 20 MW aus dem Kanal und der nachgeschalteten Dampfturbinenanlage.

Für eine Sonderanwendung wird AVCO einen MHD-Generator von ca. 40 MW liefern. Die US Air Force will damit einen Lichtbogen-Windkanal zum Studium der Wiedereintrittsprobleme betreiben. Der Kanal muss jeweils nur während ca. 3 min Strom liefern. Diese Lösung soll billiger sein als die Gleichrichtung von Netzstrom. Man erwartet Anlagekosten von ca. 120 Fr./kW.

CEGB (Central Electricity Generating Board, England) hat einen Kredit von 1,5 Millionen Pfund für die ersten 3 Jahre seines weiteren Entwicklungsprogramms bereitgestellt.

Neben Detailuntersuchungen über die Verbrennung von Öl und Kohle, den Bau von Wärmeaustauschern und die Saatmaterialrückgewinnung, soll bis Ende 1966 ein Kanal von 200 MW gebaut werden. Es ist vorgesehen, vorerst Kerzen in Sauerstoff zu verbrennen.

Anschliessend ist ein Betrieb mit vorgewärmter Luft plus Schweröl oder Kohle vorgesehen. Die thermische Leistung ist dann noch ca. 60 MW.

Die EdF (Electricité de France) hat im Centre d'essais et de recherches des Renardières eine 8-MW-Anlage aufgebaut [14].

Nach dem heutigen Stand kann man sagen, dass der MHD-Generator als Stromquelle für Sonderanwendungen (große Leistungen für kurze Zeit) in Frage kommt. Viel

Fig. 8

Vergleich der Kosten der Energie aus Dampfkraftwerken, MHD-Generator und Reaktoranlagen

a Kosten pro installiertes kW in Funktion der Leistung

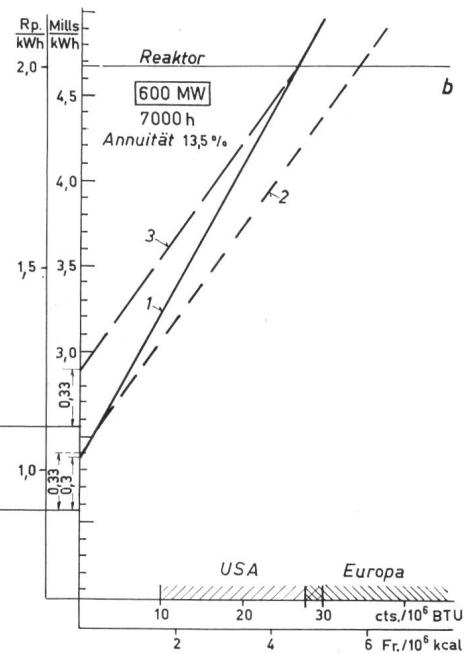
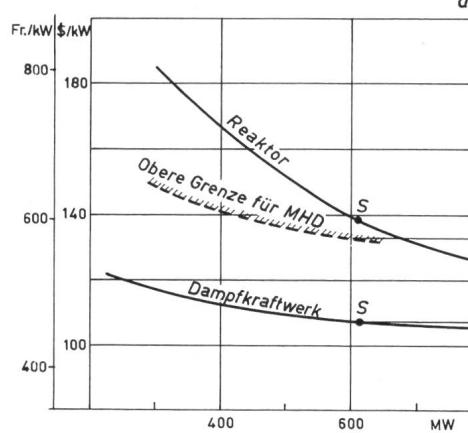
S Werte von Ph. Sporn

b Kosten pro kWh in Funktion des Brennstoffpreises

1 Dampfkraftwerk ($\eta = 0,395$); 2 Investitionskosten MHD = Dampfkraftwerk; 3 obere

Grenze für die Investitionskosten MHD;

0,3 = Betriebskostenanteil; 0,33 = Saatmaterial + Betriebskosten



müssen. 1 kg K₂SO₄ ist rund 6mal teurer als Öl, wie es in thermischen Anlagen verbrannt wird. 1 Atomprozent K entsprechen 36 Gewichtsprozent K₂SO₄. Soll der K₂SO₄-Zusatz nicht mehr als 10 % des Brennstoffpreises ausmachen, so muss bei 1 Atomprozent 99 % und bei 0,1 Atomprozent 90 % des Kaliumzusatzes zurückgewonnen werden.

komplexer ist die Aufgabe, konkurrenzfähigen Netzstrom mit MHD-Generatoren zu erzeugen.

4. Das thermische Kraftwerk mit vorgeschaltemem MHD-Generator

Der Einbau eines MHD-Generators zwischen die Brennkammer und den Kessel einer Dampfturbinenanlage lohnt sich, wenn mit dem Wirkungsgradgewinn und den damit eingesparten Brennstoffkosten die Aufwendungen für die Amortisation, Verzinsung und Unterhalt der MHD-Generatoranlage sowie die Komplikation im Aufbau und der Steuerung mehr als gedeckt werden. Fig. 8 charakterisiert die heutige Situation [15]. Die Darstellung gibt einen Maßstab für die Beurteilung der zulässigen Investitionskosten von MHD-Generatoranlagen.

Die Abschätzung des Wirkungsgrades und der dazu gehörenden Investitionskosten verlangt vorerst eine Optimierung der Auslegung einer Gesamtanlage wie sie in Fig. 2 skizziert ist.

Solche Rechnungen basieren auf eindimensionalen Ansätzen für die Berechnung der Strömung

$$\text{Kontinuität: } \rho u A = G$$

$$\text{Gasgleichung: } p \frac{m}{\rho} = RT$$

$$\text{Energie: } \rho u^2 u' + \rho u h' = J \cdot E + R$$

$$\text{Impuls: } \rho u u' + p' = J \cdot B - 2f \rho u^2 \frac{1}{D}$$

$$\text{Strom: } J = \sigma u B (1 - \varepsilon)$$

ρ	Dichte	$E = \varepsilon u B$ = Feldstärke
u	Gasgeschwindigkeit	$\varepsilon = \text{Lastfaktor} = \frac{R_A}{R_A + R_i}$
A	Querschnitt	Q Wärmeverlust
p	Druck	f Fanningscher Reibungskoeffizient
m	Molekulargewicht	D hydraulischer Durchmesser
R	Gaskonstante	G Durchsatz
T	Temperatur	J Stromdichte
u' , h'	Ableitungen dieser Größen nach der Zeit	B magnetische Induktion
h	Enthalpie	

Der Wert f muss nach Harris [16] wegen des Einflusses des Magnetfeldes auf die Grenzschicht etwas erhöht werden. Der Betrag hängt von der Wandtemperatur ab. Kalte Wände

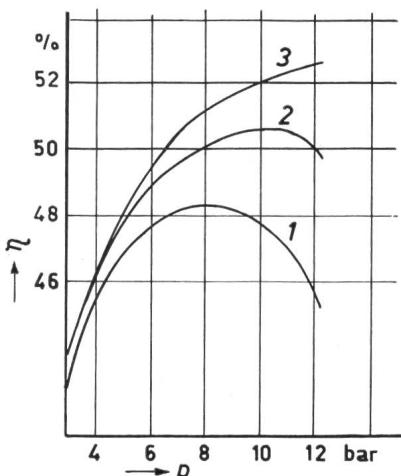


Fig. 9

Totalwirkungsgrad η einer Anlage in Funktion des Eintrittsdruckes p bei verschiedenen Methoden für die Erzeugung eines Magnetfeldes von 4,5 T

1 Kupferspule; 2 tiefgekühlte Spule; 3 supraleitende Spule

reduzieren die Temperatur und damit die elektrische Leitfähigkeit in der Grenzschicht. Das kann die Messergebnisse [17] erklären, die mit und ohne Magnetfeld innerhalb der Messgenauigkeit denselben f -Wert ergaben.

Die in demselben Experiment beobachteten Wärmeübergänge $\frac{dQ}{dx}$ an die Kanalwände konnten gut erklärt werden mit dem Ansatz:

$$\frac{dQ}{dx} = \left(\frac{0,2}{D} \right) h_0 R_e^{-0,2}$$

D	hydraulischer Durchmesser
h_0	Enthalpie des Gases in der Kanalmitte
h_w	Enthalpie des Gases an der Kanalwand
R_e	Renoldzahl

Der Wert von h_w (Enthalpie des Gases an der Wand) ist so klein, dass es offenbar bei kalten Wänden genügt, statt $h_0 - h_w$ den Wert h_0 einzusetzen. Die Werte für den Wärmeabfluss durch die Wände liegen im Bereich 2...4 MW/m². Bei guter Verbrennung ist der Anteil des Strahlungsübergangs ca. 10 % der konvektiven Wärmeübertragung.

Von diesen Ansätzen und Berechnungen [11] der mittleren Stromdichte bei gegebener Feinheit der Segmentierung ausgehend, kann der Strömungsverlauf z. B. schrittweise mit Computern berechnet werden. Weitere Grundlagen sind Mollier- und Leitwertsdiagramme für das angenommene Verbrennungsgas. Wesentlich sind auch die Magnetfeldstärke und die Spulenverluste. Das optimale Druckverhältnis hängt von diesen Verlusten ab [18] (Fig. 9).

Bei supraleitenden Spulen entscheiden die Drahtkosten, wo die optimale Länge des Kanals liegt. Die Größenordnung der Spulenkosten liegt bei 0,2 Mill. Fr. pro m³ und pro Tesla. Die Energiedichte im Kanal ist

$$N_{el}''' = \sigma u^2 B^2 (1 - \varepsilon) \varepsilon$$

Rechnet man mit $B = 5$ T, $u = 800$ m und $\varepsilon = 0,8$, so liegen die Magnetfeldkosten für $\sigma < 20$ Siemens pro m über 20 Fr./kW.

Ein weiterer wichtiger Wert für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen ist die Eintrittstemperatur T_1 . Die elektrische Leitfähigkeit variiert etwa mit der 10-ten Potenz von T_1 . Die Eintrittstemperatur T_1 hängt außer von der Vorwärmtemperatur von den Verlusten in der Brennkammer und der Einlaufdüse ab.

Die Brennkammerverluste kann man heute noch schlecht abschätzen. Experimente müssen zeigen, wie die Brennkammerbelastung (kW/m³) von der Vorwärmtemperatur abhängt und wie sich eine Nachverbrennung im Kanal auf die elektrische Leitfähigkeit des Arbeitsgases auswirkt. Daraus ergibt sich dann das Volumen der Brennkammer und ein Anhaltspunkt über die Größe der Verluste.

Fig. 10 zeigt eine bei Brown Boveri aufgebaute, mit vorwärmter Luft und Öl als Brennstoff betriebene Versuchsbrennkammer. Die Austrittstemperatur (vorläufig maximal 2150 °C) wird mit der Na-Linien-Umkehrmethode gemessen. Im Zusammenhang mit Leitfähigkeitsmessungen kann dem Verbrennungsgas Kalium (z. B. in Form von K₂SO₄) zugesetzt und durch Zumischung von Sauerstoff die Temperatur kurzzeitig erhöht werden. Der Abgaskanal ist für Korrosionsuntersuchungen eingerichtet.

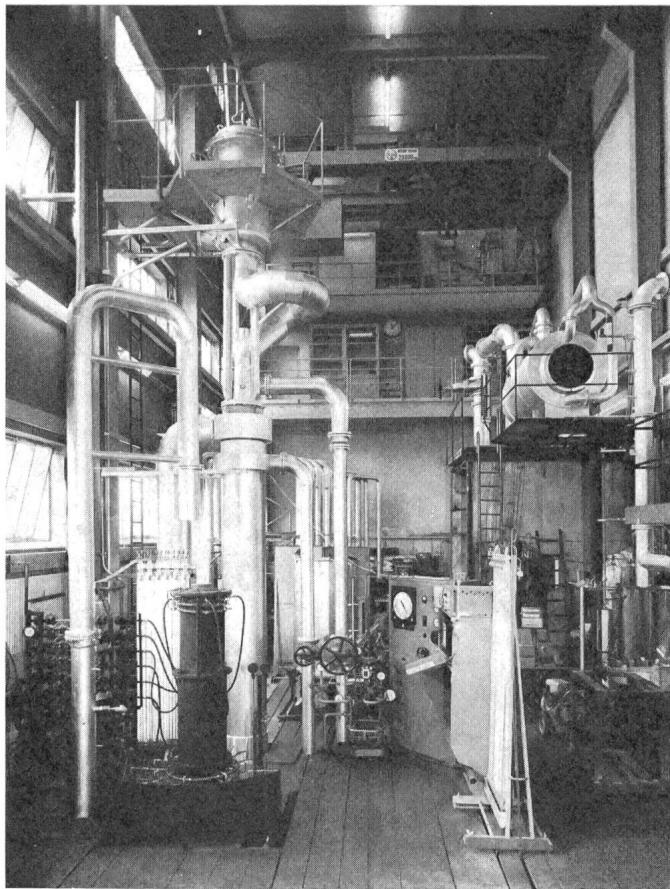


Fig. 10

Brennkammerversuch

Im Vordergrund die Versuchsbrennkammer (2,5 MW). Im Hintergrund oben (mit Galerie) die Primärbrennkammer, die den darunterstehenden Wärmeaustauscher speist. Er versorgt von unten her die Versuchsbrennkammer mit vorgewärmter Luft. Temperatur am Austritt der Versuchsbrennkammer 2150 °C

Im Wärmeaustauscher nach dem Kanal (vergl. Fig. 2) soll durch die heißen Abgase die Brennkammerzuluft auf 1000...1400 °C aufgewärmt werden. Technologisch ist dieses Problem gelöst. Cowpertürme liefern Heisswind für den Hochofenbetrieb mit Temperaturen von 1000...1200 °C. Diese Regenatoren sind mit Keramikquadern gefüllte Türme. Die Füllung wird abwechselnd durch heiße Abgase aufgeheizt und dann durch die sich dabei erwärmende Luft wieder abgekühlt.

Durch einen phasenverschobenen Betrieb einiger Türme kann ein praktisch kontinuierlicher Heisswindstrom erzeugt werden. Will man jedoch diese Lösung direkt für den MHD-Generator übernehmen, so lehren Wirtschaftlichkeitsrechnungen, dass solche Anlagen zu teuer sind. Es müssen andere Lösungen gesucht werden. Ein solches Konzept nimmt an, dass die Luft in einem metallischen Regenerator auf 600 °C aufgewärmt und in einem durch schnellere Phasenwechsel (= kleinere Keramikmasse) verbilligten Regenerator weiter erhitzt wird. Eine notwendigerweise sehr approximative Kostenabschätzung führt zu folgender Formel [14]:

$$K = 12 \left(16,5 - \frac{7800}{T} \right)$$

K sind die Kosten in Franken pro übertragenes kW bei der Aufheizung der Luft auf T °C. Nimmt man an, die Luft werde auf $T = 1200$ °C aufgeheizt und der Gesamtwirkungs-

grad sei $\eta = 50\%$, so ergeben sich Investitionskosten von ca. 90 Fr. pro kW.

Noch unsicherer sind die Kosten für den eigentlichen Kanal, also die Wände mit den Elektroden und dem eingebauten Kühlssystem. Diese Unsicherheit fällt jedoch nicht ins Gewicht, da man abschätzen kann, dass die Kanalkosten nur etwa 2 % der Gesamtinvestitionen betragen.

Ein wesentlicher Posten ist noch die Wechselrichteranlage. Hier ist mit einem Betrag von ca. Fr. 70.— für die Umformung von 1 kW zu rechnen.

Mit diesen Elementen einer Kostenberechnung für ein MHD-Generator-Werk kann man sich ein Bild machen über die Verteilung der Aufwendungen auf die einzelnen Anlage-teile.

Eine Anlage habe einen Wirkungsgrad von $\eta_{tot} = 50\%$:

$$\eta_{tot} = \frac{N_{MHD} - N_K + N_D}{Q_{zu}}$$

N_{MHD} elektrische Wechselstrom-Leistung aus dem Kanal;

N_{MHD} elektrische Gleichstrom-Leistung aus dem Kanal;

N_K Antriebsleistung für den Kompressor;

N_D elektrische Leistung aus der Dampfturbinenanlage;

Q_{zu} zugeführte Wärme.

Wenn

$$a = \frac{N_{MHD}}{Q_{zu}}$$

und der Wirkungsgrad des konventionellen Teils mit 40 %, jener der Wechselrichter mit 97 % in Rechnung gestellt werden, so kann man unter globaler Berücksichtigung der Verluste zeigen, dass für $\eta_{tot} = 50\%$ $a \approx 0,3$ sein muss.

Für ein Kraftwerk mit $Q_{zu} = 1000$ MW erhält man dann:

N_{MHD}	=	290 MW
N_K	=	90 MW
N_D	=	310 MW

Kosten:		10 ⁶ Fr.
Konventioneller Teil	$310 \cdot 10^3 \cdot 480$	149
Luftvorwärmer	$500 \cdot 10^3 \cdot 90$	45
Wechselrichter	$290 \cdot 10^3 \cdot 70$	20
Magnetfeld ($N_{el} \approx 7$ MW/m ³)	$\frac{290}{7} \cdot 10^6$	41
		255

Aus Fig. 8 ergibt sich als obere Grenze

Rest 29

Für den Kanal, den Kompressor, die Saatmaterialrückgewinnung und den Ausbau der im konventionellen Teil enthaltenen Brennkammer auf eine Hochtemperaturbrennkammer bleiben noch $29 \cdot 10^6$ Fr. oder rund 10 % der Totalsumme.

Mit dieser generellen Übersicht ist keine schlüssige Aussage über die Investitionskosten eines MHD-Generator-Werkes gemacht. Sie zeigt jedoch, dass nach dem heutigen Stand der Arbeiten am MHD-Konzept für die Wirtschaftlichkeit entscheidend sein wird, ob es gelingt, billigere Vorwärmgeräte zu erfinden, die Unterhaltskosten tief zu halten und vor allem, wie sich die Preise für supraleitende Drähte entwickeln werden, oder ob sich nur die Lösung mit tiefgekühlten Spulen realisieren lässt.

Aber auch in Bezug auf die prinzipielle Auslegung eines MHD-Generator-Werkes sind noch Verbesserungen möglich.

Die Vorwärmtemperatur der Luft kann bei gleichbleibender Verbrennungstemperatur erniedrigt werden, wenn der Zuluft Sauerstoff beigemengt wird. Das wird interessant, wenn es gelingt, billiger als das heute möglich ist, Luft mit etwa 30 % O₂-Gehalt herzustellen. Der MHD-Generator kann mit einem ausgesprochen einfachen und billigen Dampfkraftwerk kombiniert werden. Das gibt dann Anlagen mit einem Wirkungsgrad etwas über 40 %, dafür aber vielleicht tieferen Investitionskosten.

Von Westinghouse [20] wurde darauf hingewiesen, dass sich das Verbrennungsgas beim Durchströmen des Kanals von einer hohen Temperatur, bei der sich NO bildet, so rasch abkühlt, dass diese Verbindung teilweise «eingefroren» wird. Aus den Abgasen gewonnenes NO könnte zu NO₂ aufoxidiert und z. B. an die Düngemittelindustrie verkauft werden. Das ergäbe eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der MHD-Anlagen.

Gelingt es, eine sehr wirksame Saatmaterialrückgewinnung zu entwickeln, so könnte Cäsium (kleinere Ionisationsarbeit) statt Kalium zugemischt werden. Bei gleichem σ könnte die Eintrittstemperatur herabgesetzt werden und zudem wäre die beizumischende und zu verdampfende Menge kleiner, was nochmals bei gleicher Flammttemperatur eine Erniedrigung der Vorwärmung erlauben würde.

Es gibt auch Vorschläge, MHD-Generatoren ohne ein nachgeschaltetes Dampfkraftwerk mit einer Vorwärmung von nur 1000 °K zur Deckung des Spitzenbedarfs einzusetzen [21]. Der Wirkungsgrad liegt dann im Bereich der Gasturbinen bei ca. 20 %. Die Kosten pro installiertem kW können jedoch wegen der teuren Wechselrichter- und Magnetenfeldanlage nicht besonders tief liegen.

In Frankreich wird versucht, die Wärmeverluste an den Wänden und die Wechselrichterkosten zu reduzieren. Die Temperatur des Gasstromes wird moduliert. Kältere, nicht leitende Abschnitte treiben dann heisse leitende Schichten durch den Kanal. An den Elektroden entstehen Stromimpulse, von denen man hofft, dass sie in geeignet geschalteten Transformatoren zu einem Wechselstrom zusammengesetzt werden können (Fig. 11).

All diese Anstrengungen, das MHD-Projekt zu verbilligen, werden diktiert durch die fallenden Brennstoffpreise und durch die stetig besser werdende Wirtschaftlichkeit der Atomkraftwerke. Es ist daher sehr verständlich, dass Vorschläge, die auf eine Kombination Atomreaktor—MHD-Generator hinzielen, auf grosses Interesse stossen.

5. Der geschlossene MHD-Generator-Kreislauf

Die prinzipielle Auslegung eines MHD-Generators mit geschlossenem Kreislauf zeigt Fig. 12. Wärmequelle ist ein

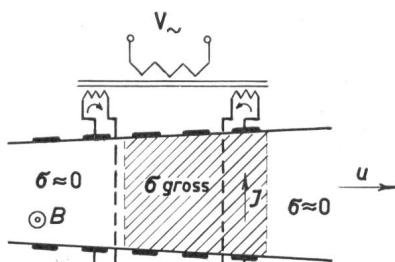


Fig. 11

Wechselstromerzeugung mit temperaturmoduliertem Gasstrom

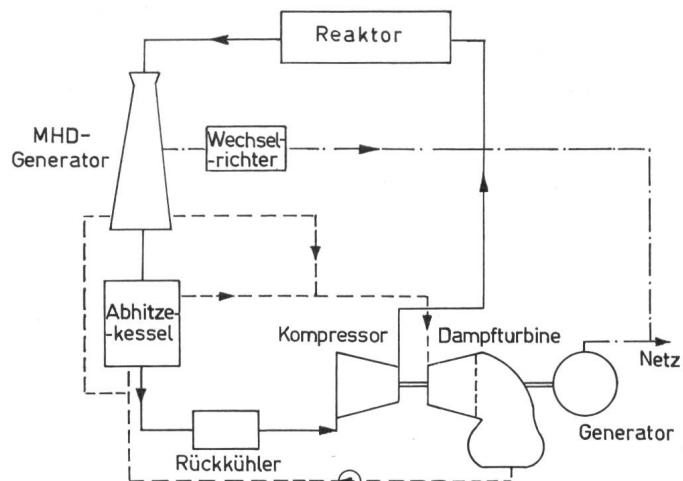


Fig. 12
Prinzipschema eines geschlossenen MHD-Generator-Kreislaufes

gasgekühlter Reaktor. Das heisse, bei einem Druck von einigen bar aus dem Reaktor austretende Gas wird in einer Einlaufdüse bis $M \approx 1$ beschleunigt. Nach der Expansion im MHD-Kanal gibt es in einem Kessel seine Restwärme an eine Dampfturbinengruppe ab. Über einen Kompressor wird das Gas wieder dem Reaktor zugeführt.

5.1 Zur Physik des geschlossenen Kreislaufes

In einem mit Edelgas betriebenen MHD-Kanal ist die Elektronentemperatur T_e höher als die Gastemperatur T_G . Die Jouleschen Verluste am inneren Widerstand des Generators heizen primär das «Elektronengas» auf, das dann durch Stöße mit den Atomen das Gas aufheizt. Pro Stoß zwischen Elektron und Edelgasatom wird auf das viel schwere Atom wenig Energie übertragen. Wesentlich höher ist die übertragene Energie, wenn ein Molekül angestossen wird. Hier können die untersten, zu Molekülschwingungen gehörenden Niveaus Energie übernehmen. Daher ist im offenen MHD-Kanal praktisch $T_e = T_G$. Mit einem Edelgas als Arbeitsmedium kann T_e im Generator etwa das 1,5...3fache der Gastemperatur werden.

Daraus ergeben sich wesentliche Unterschiede zum offenen Kreislauf. Für den Ionisationsgrad und damit für die elektrische Leitfähigkeit des Gases ist T_e massgebend, während die technologischen Probleme von T_G abhängen. Aus dem dargelegten geht auch hervor, dass σ spannungsabhängig ist. Das führt, zusammen mit dem Leitfähigkeits-tensor, zu wenig übersichtlichen Verhältnissen.

Die Experimente ohne Magnetfeld [22; 23] (σ = Skalar) ergaben eine gute Bestätigung der errechneten T_e - und σ -Werte. Die Resultate mit Magnetfeld [24; 25] (T_e war nur ganz wenig grösser als T_G) zeigten, dass die Berechnungsansätze zu stark vereinfacht waren. In den MHD-Kanälen bildeten sich, in einfachen Rechnungsansätzen nicht enthaltene, im Gas verlaufende Kurzschlußströme aus.

Im segmentierten Kanal vermutet man folgende Verhältnisse (Fig. 13):

Unmittelbar über den isolierenden Wandstücken ist $J_{\perp} = 0$, damit fällt auch E_{Hall} weg. Für den Fall des offenen Kreislaufs, wo σ unabhängig von der Feldstärke ist, hat der unerwünschte Strom J_k einen mit der Feinheit der Segmentation abnehmenden Einfluss. Beim geschlossenen Kreislauf dagegen (σ kann wegen der E -Abhängigkeit unmittelbar über

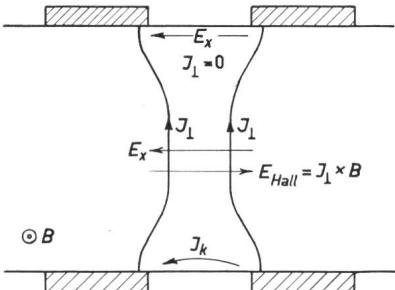


Fig. 13

Kurzschlußströme zwischen den Elektroden

Diese Ströme werden gross, wenn die elektrische Leitfähigkeit spannungsabhängig ist

J_{\perp} Strom senkrecht zum Magnetfeld und der Gasgeschwindigkeit; J_k Kurzschlußstrom zwischen zwei Elektroden; E_x Komponente des elektrischen Feldes längs des Kanals; $E_{Hall} = J_1 \times B$ Zu J_{\perp} gehörende Hallspannung

der Wand gross werden) glaubt man, dass diese Ströme dazu beitragen, dass die gemessenen T_e -Werte viel kleiner als erwartet sind.

Solche Hypothesen müssen noch untersucht werden, bevor man eine Übersicht über die möglichen geometrischen Auslegungen von MHD-Kanälen bei $T_e > T_G$ geben kann.

5.2 Zur Thermodynamik des geschlossenen Kreislaufes

Die erwähnten Schwierigkeiten ignorierend kann man die Frage stellen: Wie gross muss die Gastemperatur am Kanaleintritt T_{G1} sein, damit der Gesamtwirkungsgrad der Anlage 50 % wird? Die Antwort hängt vom Druckniveau der Expansion ab [26]:

$$T_{G1} = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_1 (\text{Cs/He}) < 2,8 \text{ bar}$$

$$\eta_{tot} = 50 \%$$

$$T_{G1} = 1700 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_1 (\text{Cs/He}) < 3,8 \text{ bar}$$

$$p_1 (\text{Cs/Ar}) < 19 \text{ bar}$$

Der Druck p_1 am Kanaleintritt ist für die beiden Arbeitsgase Helium und Argon angegeben. Berücksichtigt man die besseren Wärmetransporteigenschaften von Helium, so ergeben sich für beide Fälle etwa dieselben Wärmeübergangskoeffizienten. Immerhin zeigen die Resultate, dass der Reaktor dem MHD-Generator angepasst werden muss [27], denn die heutigen gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren arbeiten mit He bei einem Druckniveau von 20...30 bar.

Es werden auch Ideen verfolgt, nicht über die Erhöhung von T_e die Leitfähigkeit σ zu verbessern. Von aussen eingeschossene Elektronen oder die Partikel eines radioaktiven Zerfalls im Gas sollen das Arbeitsmedium genügend ionisieren.

Beide Vorschläge sind wertvoll für Sonderanwendungen, wo nicht die Wirtschaftlichkeit, sondern (wie z. B. in der Raumfahrt) andere Kriterien im Vordergrund stehen.

Zu diesem Bild der prinzipiellen Probleme der Kombination Reaktor—MHD-Generator gehört noch ein Hinweis auf eine andere Möglichkeit, elektrische Energie aus Hochtemperatur-Reaktoren zu gewinnen. Gasturbinen mit auf die zulässige Materialtemperatur heruntergekühlten Schaufeln ergeben bei $T_G = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ einen mindestens so guten Gesamtwirkungsgrad wie der geschlossene MHD-Generator-Kreislauf. Solche Gasturbinen könnten mit dem angestrebten Eintrittsdruck von 20 bar betrieben werden. Was eher gelingt, die Kühlung der Schaufeln oder einen MHD-Generator zu bauen, ist eine offene Frage.

6. Schlussbemerkung

Die Ergebnisse der MHD-Generator-Forschung hat Wege aufgezeigt, wie dieses Prinzip verwirklicht werden kann. Die Erhöhung des Wirkungsgrades und der weitgehende Wegfall von präzis zu bearbeitenden rotierenden Teilen erspart jedoch nicht so viel, dass die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen klar hervortritt. Das hat dazu geführt, dass sich der Schwerpunkt der Arbeiten in jene Institute verlagert, wo mindestens teilweise mit staatlichen Geldern weiter geforscht werden kann. Geht es jetzt doch nicht mehr darum, das Prinzip sicherzustellen, sondern in relativ grossen Anlagen das Zusammenspiel aller Parameter zu untersuchen.

Literatur

- [1] F. Scheurer: L'intérêt de l'accroissement de puissance unitaire des groupes turbo-alternateurs en particulier dans le passage de 125 à 250 puis 600 MW. 14. Teiltagung der Weltkraftkonferenz Lausanne 1964, Bericht 30.
- [2] M. N. Saha: Ionisation in the Solar Chromosphere. Philosophical Magazine 40(1920), S. 472...488.
- [3] L. S. Frost: Conductivity of Seeded Atmospheric Pressure Plasmas. J. appl. Phys. 32(1961)10, S. 2029...2036.
- [4] H. Schirmer und J. Friedrich: Die elektrische Leitfähigkeit eines Plasmas. Z. Physik 151(1958)2, S. 174...186 + Nr. 3, S. 375...384.
- [5] G. Klein et al.: Etude du processus de conversion magnéto-aérodynamique utilisant des gaz de combustion subatmosphériques. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. II, S. 617.
- [6a] J. Maycock, J. A. Noé and D. T. Swift-Hook: Permanent Electrodes for Magnetohydrodynamic Power Generation. Nature 193(1962), S. 467...468.
- [6b] W. F. S. Bugden, J. Maycock, P. G. Meier and J. A. Noé: MPD-Wall and Electrode Experiments. Magnetoplasmadynamic Power Generation Symposium Newcastle 1963. IEE Conf. Rep. Ser. - (1963)4, S. 70...72 + 89.
- [7] G. J. Womack et al.: Experimental Studies in open Cycle MHD-Generation. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. I, S. 105.
- [8] J. E. McCune: Wave Growth and Instability in Partially-Ionized Gases. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. II, S. 521.
- [9] F. Schultz-Grunow and D. L. Denzel: Calculation of the Electric Characteristics of an MHD Generator with Finite Electrodes by Conformal Mapping under Full Consideration of Tensor Conductivity and a Velocity Profile. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. II, S. 621.
- [10] L. S. Dzung: Der magnetohydrodynamische Generator mit Hall-Effekt am Kanalende. Brown Boveri Mitt. 49(1962)6, S. 211...225.
- [11] G. W. Sutton, H. Huwitz and H. Poritsky: Electrical and Pressur Losses in a Magnetohydrodynamic Channel Due to End Current Loops. Trans. AIEE Communications and Electronics 80(1961)58, S. 687...695.
- [12] H. Hurwitz, R. W. Kilb and G. W. Sutton: Influence of Tensor Conductivity on Current Distribution in a MHD Generator. J. appl. Phys. 32(1961)2, S. 205...216.
- [13] G. Delile: Etude comparée de divers procédés d'obtention d'un champ magnétique pour générateur MHD industriel. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. II, S. 1009.
- [14] Electricité de France's 8 MHD-Generator. Electr. Rev. 175 (1964)9.
- [15] E. Jenny: Experimentelle MHD-Generatoren. Diskussionsbeitrag. 14. Teiltagung der Weltkraftkonferenz Lausanne 1964.
- [16] L. P. Harris: Hydromagnetic Channel Flows. John Wiley New York 1960.
- [17] AVCO-Laboratories Research Report 145. March 1963.
- [18] J. Péricart et A. Houyze: Etude du rendement d'un générateur MHD à cycle ouvert en fonction du champs magnétique et des pertes de chaleur pariétal. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. 3, S. 1459.
- [19] C. Carter, D. V. Freck, R. V. Harrowell and J. K. Wright: Survey of Results of the CEGB Programme of Research on Open Cycle MHD Generators. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. 3, S. 1299.
- [20] W. T. Lindsay, E. V. Somers and W. S. Emmerich: Fixed Nitrogen By-Products in Open Cycle MHD Generators. Proceedings of the MHD-Symposium Paris 1964. ENEA Paris 1964, Vol. 3, S. 1403.