

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 3

Artikel: Fortschritte bei der Energieerzeugung mit MPD-Generatoren
Autor: Lindley, B.C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916335>

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: 08.01.2026

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

Fahrlässigkeit besonders ausscheiden. Diese betragen im Sektor Elektrizität 786 ¹⁾ Fälle, bei einer Schadenssumme von 1 120 700 Fr.

Zieht man nun auch diese Zahlen von den bisherigen Angaben ab, so kommt man zu einem Ergebnis von 1026 ¹⁾ Schadenfällen bei einer totalen Schadenssumme von 2 122 600 ¹⁾ Fr.

Die verbleibenden, durch die Elektrizität verursachten 1026 Schadenfälle bedeuten, dass bei einer totalen Schadenintensität von 5394 Schadenfällen nur 19 % wirklich zu Lasten der Elektrizität gehen. Die entsprechende Zahl aus den Schadenssummen berechnet beträgt sogar nur 6,8 % (Fig. 2).

¹⁾ Mittelwert aus den Jahren 1961...1962, da diese Angaben in den vorherigen Statistiken nicht besonders ausgeschieden wurden.

Vergleicht man nun diese Zahlen mit jenen von anderen Schadenursachen, (Fig. 3), wie z. B. Schäden als Folge von bestimmungsmässigem Feuer [Schadenssumme ohne «Fahrlässigkeit» 3 558 600 ¹⁾ oder aber auch mit den Schäden aus Brandstiftung (Schadenssumme 3 055 300 Fr.), so kann man feststellen, dass Elektrizität und Brandgefahr nicht in direktem Zusammenhang stehen. Es ist jedoch klar, dass man bei Verwendung von Elektrizität gewisse Sicherheitsmassnahmen einhalten muss. Das ist aber auch bei anderen Energieträgern der Fall, oft sogar noch ausgeprägter.

Zusammenfassend darf man feststellen, dass die Elektrizität den ihr anhaftenden schlechten Ruf zu Unrecht erhalten hat.

Adresse des Autors:

E. Schiessl, dipl. Ingenieur, Sekretariat des SEV, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.

Fortschritte bei der Energieerzeugung mit MPD-Generatoren

Von B. C. Lindley, Newcastle upon Tyne

532.5 : 538.63

(Übersetzung)

Nahezu die gesamte Erzeugung elektrischer Energie in Grossbritannien beruht heute auf dem Dampfprozess über Turbogeneratoranlagen, deren Leistung durch höhere Dampfzustände und durch Verbesserungen des Arbeitskreislaufes ständig gesteigert wird. Wachsende Investitionskosten und eine laufende Zunahme der Brennstoff- und Betriebskosten werden durch Errichtung grösserer Kraftwerkeinheiten aufgefangen, die in dieser Hinsicht im Betrieb wirtschaftlicher sind. Am Ende der Entwicklung von Dampfkraftwerken dürften Zwillingsanlagen von 2000 MW Leistung stehen, die mit einem Zweistoffkreislauf (Luft/Dampf) arbeiten und einen Gesamtwirkungsgrad von etwa 45 % erreichen können.

Mit Einführung der Kernenergie für die Energieerzeugung sank der thermische Wirkungskreis infolge der schlechteren Dampfbedingungen, die mit den gegenwärtig verfügbaren Reaktorsystemen erzielt werden. Durch die Entwicklung von Hochtemperaturanlagen unter Verwendung von Versuchsreaktoren wie sie der AGR, das DRAGON-Projekt der OECD, der HTGR von General Atomics sowie fortgeschrittene Bauarten schneller Reaktorsysteme darstellen, dürfte es schliesslich gelingen, einen ebenso hohen Wirkungsgrad wie in Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen zu erreichen.

Seit kurzer Zeit scheint nun eine durchgreifende Steigerung des thermischen Gesamtwirkungsgrades durch Verwendung eines sog. magnetoplasmadynamischen Generators (MPD) in den Bereich des Möglichen zu rücken. Dieses System arbeitet mit den höchsten Temperaturen, die sich sowohl mit herkömmlichen als auch mit nuklearen Brennstoffen als Wärmequelle herstellen lassen und ist mit einer Dampfkraftanlage für den unteren Temperaturbereich gekoppelt.

Wenn man einen elektrisch leitenden Gasstrom (oder «Plasma») durch ein quer verlaufendes Magnetfeld leitet, wird ein elektrisches Feld in einer Richtung induziert, die zum Gasstrom und zum Feld jeweils rechtwinklig verläuft. Dabei ergibt sich die Möglichkeit, elektrische Energie zu gewinnen. Im Prinzip entspricht ein MPD-Generator durchaus einem elektrischen Generator üblicher Bauart, bei dem die

gerichtete kinetische Energie der metallischen Leiter im Rotor in elektrische Energie umgewandelt wird. In seiner einfachsten Form besteht der MPD-Generator aus einem divergierenden Kanal mit rechteckigem Querschnitt, bei dem zwei der Seitenwände elektrisch isoliert sind und die beiden anderen Elektroden enthalten, durch die ein elektrischer Strom zu einem Verbraucher fliesst. Da der MPD-Generator über keine beweglichen Teile mit hohen Belastungen verfügt, kann er extrem hohe Betriebstemperaturen aushalten und erzielt demzufolge einen sehr guten Gesamtwirkungsgrad.

1. Offenes Kreislaufsystem

Einen MPD-Generator für fossilen Brennstoff, ausgebildet als offenes Kreislaufsystem, sowie einen nuklearen MPD-Generator als geschlossenes Kreislaufsystem stellen Fig. 1 und 2 dar. Beim direkten, offenen Kreislaufsystem sind maximale Gesamttemperaturen im Bereich von 3000 °K erforderlich, um eine entsprechende thermische Ionisierung und plasmalelektrische Leitfähigkeit in den mit Kalium geimpften

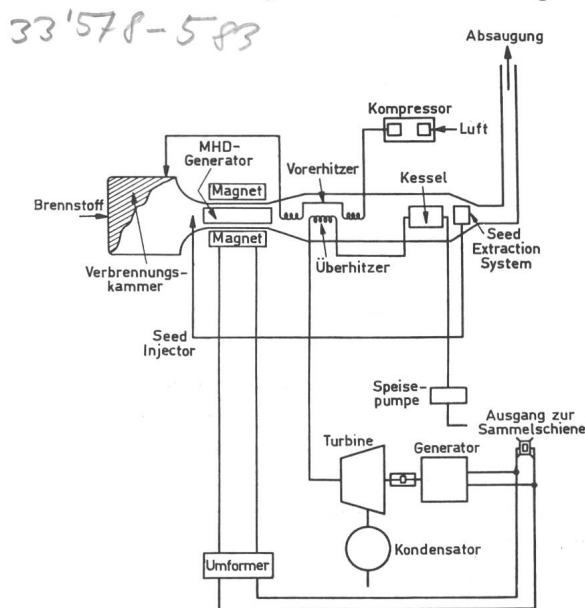


Fig. 1
MPD-Generator mit fossilem Brennstoff
(offenes Kreislaufsystem)

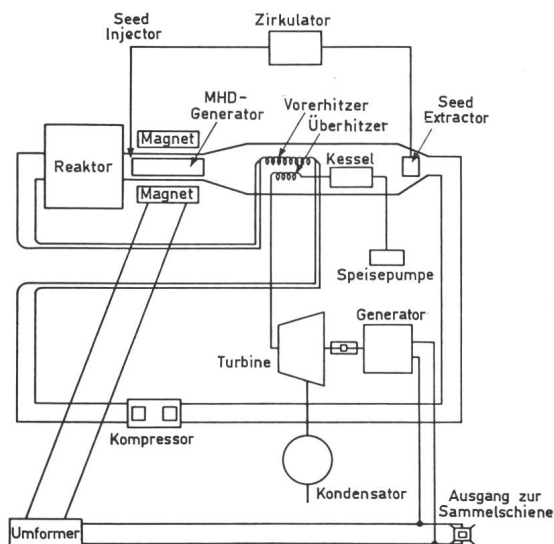


Fig. 2
MPD-Generator nuklearer Bauart
(geschlossenes Kreislaufsystem)

Verbrennungsgasen herzustellen. Das Arbeitsmedium besteht aus weitgehend zerfallenen Verbrennungsprodukten eines Kohlenwasserstoffes, der mit vorgewärmter Luft oder mit vorgewärmter, sauerstoffangereicherter Luft verbrannt wurde. Der Druck am Eintritt des Generators beträgt im Normalfall einige Atmosphären, während der Druck am Austritt nur wenig über dem Atmosphärendruck liegt. Die Ausichten, mit niedrigeren Temperaturen auszukommen, sind gering, da sich die thermische Ionisierung des geimpften Mediums nicht umgehen lässt. Es bestehen noch erhebliche ungeklärte Probleme beim Vorwärmer für das Oxydationsmittel, bei der Rückgewinnung des Impfmateri als und — wegen der Verunreinigung — durch den Asche- und Schlackengehalt in den Verbrennungsprodukten.

2. Geschlossenes Kreislaufsystem

Beim geschlossenen Kreislaufsystem kann man zur thermischen Ionisierung die elektrische Leitfähigkeit der mit Caesium geimpften Edelgase (die voraussichtlich als Arbeitsmedium in Frage kommen) mit derjenigen von Verbrennungsgasen bei Temperaturen vergleichen, die um etwa 500 °K höher liegen. Dieser Umstand verleiht dem geschlossenen Kreislaufsystem zweifellos einige Vorteile. Edelgasplasmen bieten jedoch auch die Möglichkeit, eine hohe elektrische Leitfähigkeit durch Ionisierung ohne Gleichgewichtszustand bei durchaus mässigen Gastemperaturen (1200... 2000 °K) herbeiführen. Vier Hauptfaktoren spielen eine Rolle bei der Auswahl des Arbeitsmediums: die Wärmequelle, der MPD-Generator, der Rekuperator bzw. Kessel und der Verdichter. Die Wärmequelle bedingt eine gewisse Beschränkung bezüglich der oberen Temperaturgrenze, je nachdem, ob ein Kernreaktor mit direktem Kreislauf oder ob eine indirekte Aufwärmung verwendet werden. In beiden Fällen ist ein guter Wärmeübergang ausschlaggebend, was gute thermische Leitfähigkeit sowie hohe Wärmeleistung voraussetzt. Druckverluste und Pumpleistung werden günstig beeinflusst durch einen Betrieb bei den höchsten Drücken, die technisch herstellbar sind.

Ähnliche Gesichtspunkte treffen auch für die Wärmeaustauschorgane vor dem MPD-Generator (Rekuperator bzw. Kessel) zu. Der MPD-Generator verlangt eine gute elek-

trische Leitfähigkeit des teilweise ionisierten Arbeitsmediums, was eine hohe Elektronenkonzentrierung (bei den niedrigen Temperaturen, die bislang von der nur begrenzt leistungsfähigen Wärmequelle bereitgestellt werden können, würde dies auf eine Art Ionisierung ohne Gleichgewichtszustand hinauslaufen), sowie grosse Elektronenbeweglichkeit bedingt. Für beide Eigenschaften ist eine niedrige Betriebstemperatur von Vorteil. Die Verdichterleistung hängt hauptsächlich von der spezifischen Wärme und dem Verhältnis von spezifischer Wärme zum gewünschten Druck ab. Gase mit geringer Dichte und hoher spezifischer Wärme, wie z. B. Wasserstoff und Helium, wirken sich ungünstig darauf aus.

3. Werkstoffe

Teile des Generatorkanals müssen als elektrische Isolatoren wirken; ferner müssen die Elektroden einen ausreichenden elektrischen Stromfluss zwischen dem Plasma und den äusseren Stromkreisen gewährleisten. Graphit, hitzebeständige Metalle (Wolfram, Tantal usw.), sowie deren Legierungen und gewisse Karbide zählen zu den Werkstoffen, die für die Fertigung der Elektroden in Frage kommen; hitzebeständige Oxyde (Beryllium, Magnesium, Aluminium, Zirkon, Thorium u. a. m.), ferner einige Boride und Nitride sind möglicherweise als Isolierstoffe geeignet. Der Einsatz all dieser Werkstoffe bei Plasmatemperaturen (bis zu 3200 °K) bereitet noch erhebliche Schwierigkeiten. Aus diesem Grunde besteht ein grosser Anreiz zur Verwendung wassergekühlter Metallwände, sofern die damit verbundenen Wärme- und Stromverluste dem nicht im Wege stehen.

4. Einfluss von Grösse und Versuchsmaßstab

Die Mindestleistung, die erforderlich ist, um die Wirtschaftlichkeit eines MPD-Generators zu sichern, lässt sich einfach berechnen, und zwar auf der Grundlage der Geometrie des Generatorkanals, von der der Wärmeverlust beim Durchgang durch gekühlte Wandungen, der Reibungsverlust und die Energieableitung der Feldspule abhängen. Die Ergebnisse einer Berechnung dieser Art für ein offenes Kreislaufsystem sind in den Fig. 3 und 4 angegeben. Danach liegen die ungefähren Mindestgrößen für konventionelle Feldspulen (wassergekühltes Kupfer) bei 30 kG (Kilogauss) und für superleitende Feldspulen bei 100 kG. Die Absolutwerte schwanken sehr stark unter dem Einfluss der in den Berechnungen angegebenen Einzelheiten, doch sind die sich daraus ergebenden Folgerungen klar ersichtlich. Für den untersuchten Bereich der Generatorgrösse ist der Reibungsverlust jeweils unbedeutend.

4.1 Offener Kreislauf

Versuche mit dem MPD-Generator im offenen Kreislauf auf der Grundlage einer Verbrennung von Kohle, Öl oder Gas wurden in England, den USA und in anderen Ländern erfolgreich vorgenommen. Das wohl umfangreichste Versuchsprogramm wird gegenwärtig von der AVCO Corporation in den USA durchgeführt. Der AVCO Mark II-Generator ist ausgelegt für eine elektrische Leistung von 600... 700 kW und besitzt eine äquivalente Wärmefähigkeit von 20 MW. Zunächst hatte der Generator eine konstante Fläche und war aus ableitendem Material (Holz) hergestellt, so dass jeder einzelne Versuchsbetrieb auf einen Lauf von etwa 5 s

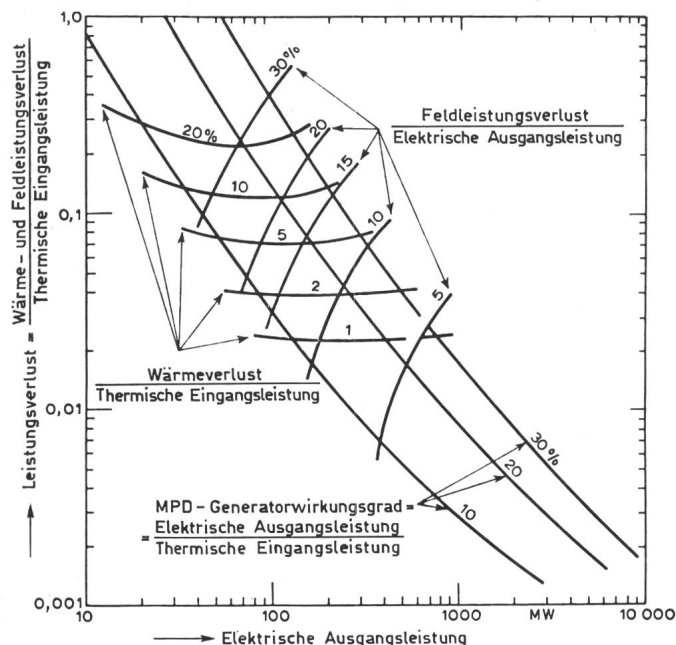


Fig. 3
Energieverluste bei MPD-Generatoren in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung
Kupferfeldspule $B = 30 \text{ kGs}$

begrenzt war. Die Energieleistung betrug etwa 200 kW und blieb hinter der konstruktiven Solleistung lediglich unter dem Einfluss beträchtlicher Hall-Effekte zurück. Nach einigen Umbauarbeiten erzielte der Generator einen Leistungspegel von 600 kW. Die Gewinnung derart grosser Mengen elektrischer Energie wird von wesentlichen Veränderungen in der axialen Druckverteilung begleitet. Weitere Verbesserungen in Konstruktion und Bau des Generators ermöglichten elektrische Leistungen bis zu 1,5 MW, das sind 7 % der Wärmeaufnahme.

Die nächste Phase des Versuchsprogrammes umfasst einen wesentlich grösseren Generator zur Gewinnung von

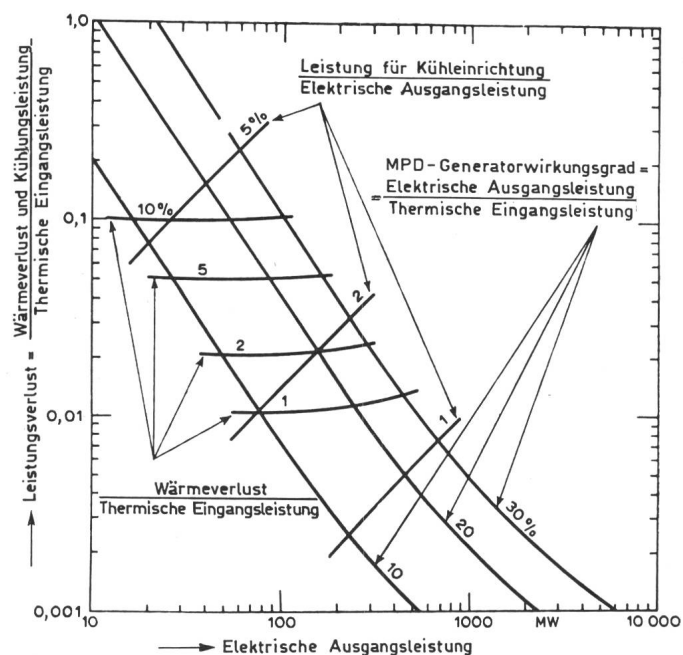


Fig. 4
Energieverluste bei MPD-Generatoren in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung
Supraleitende Feldspule $B = 100 \text{ kGs}$

35 MW aus einer geimpften Kerosin-Sauerstoff-Flamme und entspricht einer äquivalenten thermischen Leistungsaufnahme von 300 MW; die Stromzufuhr zum Elektromagneten (Feld von 30 kG) beträgt etwa 15 MW. Weitere technische Angaben sind die folgenden: Massenfluss 58 kg/s; statische Temperatur 2950 °K; Länge 3 m; Kanalquerschnitt 0,13 m²; Fließgeschwindigkeit 1300 m/s; spezifische Leistung 0,53 MW/m³; Gewicht 100 t. Die Bauweise der Wandung und der Elektroden wurde mit Hilfe einer Langzeitversuchsanlage entwickelt; geeignete Bauformen sind in mit hohen Temperaturen geimpften Verbrennungsgasströmen bis zu 100 h lang betrieben worden.

In England verfolgt das Central Electricity Research Laboratory der britischen Energieversorgungsbehörde (CEGB) ein umfangreiches Programm zur Entwicklung von heizöl- und kohlegefeuerten Generatoren. Im Marchwood Engineering Laboratory ist die Errichtung einer 20 MW-Anlage vorgesehen, die zunächst mit Kerosin unter Zusatz von reinem Sauerstoff betrieben werden soll. Für später ist die Ergänzung der Anlage durch einen Luftvorwärmer und ein Rückgewinnungssystem für das Impfmateriel geplant. Danach soll die Anlage ebenfalls mit Heizöl bzw. Kohle arbeiten.

Grosse Generatoreinheiten wie die beiden beschriebenen Projekte sind typisch für die derzeitige Entwicklungsstufe des offenen Kreislaufsystemes. Eine ganze Anzahl kleinerer Einheiten befindet sich bereits in Laboratorien in England, sowie auch in anderen Ländern in Betrieb.

4.2 Geschlossener Kreislauf

Generatoren mit geschlossenem Kreislaufsystem werden von mehreren Forschungslaboratorien in den USA untersucht. Hierzu gehören das Westinghouse Research and Development Center, das NASA Lewis Research Center, die Allison Division der General Motors Corporation, und die Martin Marietta Corporation. In England beschäftigt sich die International Research and Development Company Ltd. (IRD) mit diesen Problemen.

Kürzlich von IRD durchgeführte Arbeiten haben bei dem ersten MPD-Generator grösserer Leistung nach dem Prinzip des geschlossenen Kreislaufes ergeben, dass sich elektrische Energie bei Temperaturen unter 1800 °C gewinnen lässt.

Die MPD-Versuchsanlage der IRD für das geschlossene Kreislaufsystem verwendet eine Mischung von reinem Helium und Caesium. Helium ist ein reaktionsträges Gas, das mit Werkstoffen hoher Temperatur verträglich ist und als Kühlmittel in Höchsttemperatur-Kernreaktoren wahrscheinlich gern verwendet werden dürfte. Der Versuchskreislauf bildet sehr genau den Arbeitsablauf in einer Grossanlage nach den Fig. 5 und 6. Das Helium wird verdichtet und über einen Rekuperativwärmetauscher zu einem graphit-elektrischen Heizapparat geleitet (der das Reaktorcore simuliert), in dem Gastemperaturen bis zu 2200 °C erzeugt werden.

Hinter dem Heizapparat wird eine geringe Menge Caesiumdampf zugesetzt, wodurch das Gas in ein elektrisch leitendes Plasma umgewandelt wird. Das mit Caesium geimpfte Plasma wird anschliessend beschleunigt und mit hoher Geschwindigkeit durch den MPD-Generator geführt, der einfach aus einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt besteht

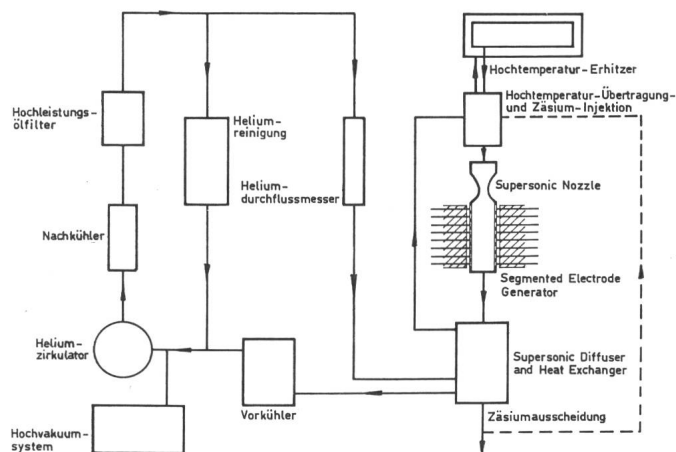


Fig. 5
Fließschema eines MPD-Versuchskreislaufes
(geschlossenes Kreislaufsystem)

(127 × 381 × 1524 mm) und in dessen beiden schmalen Wänden Metallelektroden aus Tantal angebracht sind. Die Wandungen bestehen aus Aluminiumoxyd von hoher Dichte und höchster Reinheit, das bei der hohen Betriebstemperatur als elektrische Isolierung dient. Die elektrische Energie wird über die Elektroden abgezogen und das Gas mit niedrigerer Temperatur in einen Diffusor eingeleitet, von wo es über den Rekuprativwärmeaustauscher zu einem nachgeschalteten Kühler und schliesslich zum Verdichter läuft.

Während der ersten Versuche wurde der Kreislauf 15 h lang im Dauerbetrieb bei Gastemperaturen bis zu 1800 °C gefahren. Zwanzig Messreihen wurden bei einer maximalen Leistung von 0,5 W durchgeführt und dabei Temperatur, Caesiumgehalt und das angelegte Magnetfeld verändert. Trotz der zur Zeit noch geringen Grösse des Generatorkanals wird angenommen, dass sich nach weiteren Entwicklungsarbeiten damit eine Leistung bis zu 3 kW erzielen lässt.

Beim Bau der IRD-Versuchsanlage wurden in grossem Umfange Wolfram, Tantal, Molybdän sowie Tantal-Wolfram-Legierungen verwendet. Diese Metalle können in Verbindung mit Helium sehr hohe Temperaturen aushalten, werden jedoch in ihrem Betriebsverhalten sehr schnell schlechter, sobald ein Oxydationsgas hinzutritt. Aus diesem Grunde wird das im Kreislauf umgewälzte Helium laufend gereinigt, um den Gehalt an Fremdgasen im Helium unter 10 ppm zu hal-

ten. Der IRD-Kreislauf wurde im Heliumbetrieb bereits mehrere hundert Stunden lang bei Temperaturen bis zu 2200 °C gefahren. Dazu waren ausgedehnte Vorarbeiten über chemische und Werkstofffragen erforderlich; teilweise mussten für derart extreme Bedingungen vorher neue Herstellungsmethoden entwickelt werden.

5. Zusammenfassung und Folgerungen

Die technische Durchführbarkeit der Energieerzeugung mit Hilfe von MPD-Generatoren ist von verschiedenen Stellen in mittelgrossen Versuchsanlagen überzeugend nachgewiesen worden.

Der Generator mit offenem Kreislauf befindet sich gegenwärtig in einem Entwicklungsstadium, wo Versuchsanlagen mit einer Leistung von mehreren zehn MW errichtet und für entsprechend lange Zeiträume betrieben werden. Im Anschluss daran sollte eine grössere, voll ausgereifte Anlage unter Kraftwerkbedingungen gebaut und betrieben werden.

Vorhersagen über den nuklearen MPD-Generator zu machen ist erheblich schwieriger, da seine Durchführbarkeit weitgehend von einem technischen Durchbruch auf dem Gebiete der Verwendung von Plasmabedingungen ohne Gleichgewichtszustand, sowie von der Entwicklung von Hochtemperatur-Kernreaktoren oder alternativ von einem indirekten Wärmetauscher für das System mit fossiler Feuerung abhängt.

Die bedeutenden Fortschritte bei den Versuchen der IRD nach dem geschlossenen Kreislaufsystem liegen darin, dass durch den erfolgreichen Betrieb bei Temperaturen erheblich unterhalb von 2000 °C — im Gegensatz zu den früher für erforderlich gehaltenen wesentlich höheren Temperaturen — ein Anreiz vorhanden ist, Höchsttemperatur-Kernreaktoren zu entwickeln. Hierbei kommt dem OECD-Projekt DRAGON in England und dem UHTREX-Reaktor in den USA grosse Bedeutung zu, die beide Helium als Kühlgas verwenden. Ein Kernspaltreaktor zum Einsatz in Verbindung mit einem MPD-Generator würde wahrscheinlich ein Core ganz aus keramischem Brennstoff sowie im wesentlichen Graphit als Neutronenmoderator erhalten. Als Brennstoff käme voraussichtlich Uran oder Plutonium als Karbid in Frage.

Aus den hier aufgeführten Tatsachen ergeben sich folgende wichtige Schlussfolgerungen:

1. Die Erzeugung elektrischer Energie mit Hilfe von MPD-Generatoren ist im Begriff, aus einer Phase spekulativer Forschung in den Bereich durchkonstruierter Prototypanlagen vorzustoßen;
2. Seitens der EVU besteht die Meinung, dass zur langfristigen Deckung des wachsenden Energiebedarfs die Energieerzeugung durch MPD-Generatoren mit offenem und geschlossenem Kreislaufsystem gute Aussichten hat;
3. Wegen seiner neuartigen Konstruktionsmerkmale hat auch der nukleare MPD-Generator mit geschlossenem Kreislauf Einsatzmöglichkeiten für den Antrieb von Schiffen und U-Booten, bei grossen Raumstationen für Satelliten, und bei interplanetarischen Raumflugkörpern.

Anlagen dieser Art für den Grundlastbetrieb erreichen einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 55 %, bei gleichzeitiger Senkung der Kosten des abgegebenen Stromes um wenigstens 12 % (auf der Grundlage der durchschnittlichen Kosten in einem hochentwickelten Industrieland).

Adresse des Autors:

B. C. Lindley, International Research and Development Company Ltd., Newcastle/Tyne (Grossbritannien).

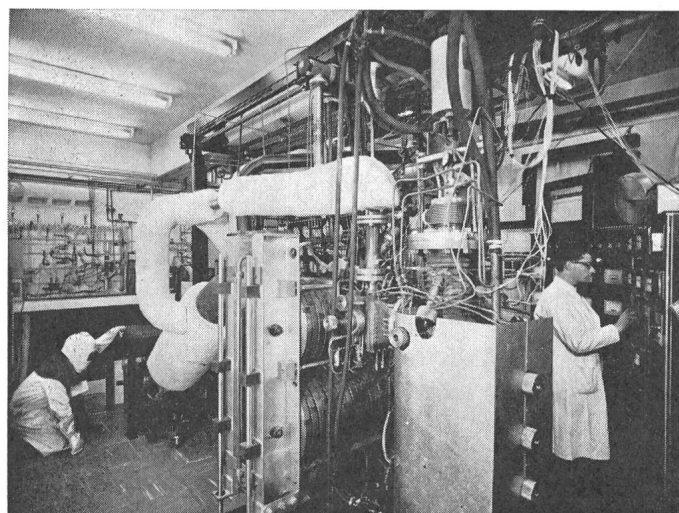


Fig. 6
Gesamtansicht des MPD-Versuchskreislaufes