

P O L S K A A K A D E M I A N A U K  
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE  
INSTYTUTU MASZYN  
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS  
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

62-63

WARSZAWA—POZNAŃ 1973

---

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

---

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

\*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW  
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

---

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS  
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR  
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk,  
skr. pocztowa 621, Gdańsk-Wrzeszcz, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 19 XII 1972 r.
Ark. wyd. 19,5. Ark. druk. 15,375+2 wkł.	Podpisano do druku 29 IX 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w październiku 1973 r.
Nr zam. 814/155	D-15/787 Cena zł 58,-

DRUKARNIA UNIwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu

Czwarte Seminarium poświęcone zagadnieniom  
MAGNETOHYDRODYNAMIKI STOSOWANEJ  
I GAZODYNAMIKI WYSOKICH TEMPERATUR

Jena, maj 1972

Čtvrtý Seminař o  
APLIKOVANÉ MAGNETOHYDRODYNAMICE  
A DYNAMICE PLYNU ZA VYSOKÝCH TEPLŮT

Jena, květen 1972

Viertes Arbeitsseminar über Fragen  
DER ANGEWANDTEN MAGNETOHYDRODYNAMIK  
UND HOCHTEMPERATUR-GASDYNAMIK

Jena, Mai 1972

Fourth Seminar on  
APPLIED MAGNETOHYDRODYNAMICS  
AND HIGH TEMPERATURE GASDYNAMICS

Jena, May 1972

Четвертый Семинар по  
ПРИКЛАДНОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКЕ  
И ГАЗОДИНАМИКЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Ена, май 1972 г.

ZDENĚK BAYER

Praha\*

## MHD-Energieumwandlung mit flüssigem Metall

### 1. Einleitung

Die Eigenschaften einer MHD-Einrichtung sind durch die Art des verwendeten Arbeitsmediums stark beeinflusst. In diesem Beitrag sollen Systeme mit elektrisch leitender Flüssigkeit behandelt werden. Als solche Flüssigkeit verwendet man meistens alkalische Metalle, Gemische dieser Metalle (Eutektikum, z. B. NaK) oder Quecksilber, d. h. diejenigen Metalle, die schon bei der Umgebungstemperatur oder bei wenig erhöhten Temperaturen flüssig sind. Damit ist eine wichtige Bedingung verknüpft, nämlich daß der Sättigungsdruck des Arbeitsmediums im Bereich der für diese Einrichtung üblichen Temperaturen zwischen 500 und 1500 K nicht allzu niedrig ist.

Die gegenwärtige und auch potenzielle Bedeutung der Energieumwandlung mit flüssigem Metall ist aus dem relativen sowie absoluten Anwachsen der Originalarbeiten auf diesem Fachgebiet ersichtlich (Abb. 1).

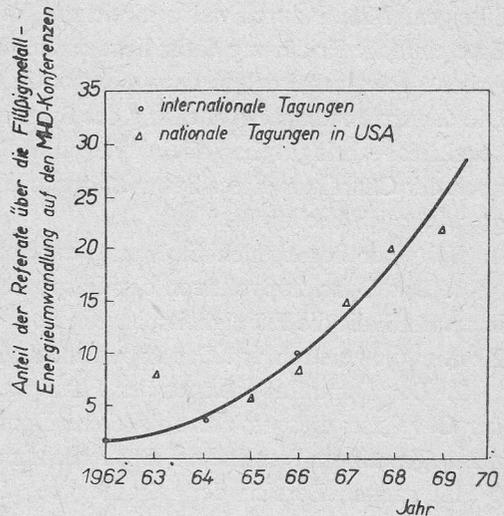


Abb. 1. Anteil der Referate über die Problematik der flüssigen Metalle nach [8]

Es gehört zu den Vorteilen der Flüssigmetallsysteme, daß die hohe elektrische Leitfähigkeit durch den Flüssigkeitszustand des Arbeitsmediums gegeben ist. Die charakterischen Temperaturen können deshalb gegenüber den Systemen mit ionisierten Gasen – den thermodynamischen Anforderungen des Kreisprozesses und den technologischen und

\* Ústav termomechaniky ČSAV, Praha.

ökonomischen Bedingungen leichter angepasst werden. Ein weiterer Vorteil ist zweifellos die hohe Leistungskonzentration pro Volumeinheit, die dem Produkt aus der elektrischen Leitfähigkeit und der Dichte des Arbeitsmediums proportional ist; diese Größe liegt z. B. für flüssiges Metall um einige Größenordnungen höher als für ionisiertes Gas.

Diese und andere Vorteile machen Systeme mit flüssigem Metall anziehend für verschiedene Zwecke, einschließlich der Raumfahrt und des Militärwesens. Es ist aber wichtig, daß auch die Anwendung für kommerzielle Zwecke, vor allem in der Energiewirtschaft, verhältnismässig aussichtsreich zu sein erscheint. Es wird dabei die Zusammenarbeit eines MHD-Systems mit einem konventionellen Gas- oder Dampfkreisprozeß vorausgesetzt.

Auf Grund der erwähnten Tatsachen ist es zweckmässig den heutigen Stand und die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung von MHD-Systemen mit flüssigem Metall zu erörtern. Dies soll auch die Zielsetzung des vorliegenden Beitrags bilden. Zuerst wird eine Übersicht über die einzelnen Systeme gegeben und darauf wird kurz über die in den Hauptrichtungen der Forschung erzielten Ergebnisse berichtet.

## 2. Allgemeine Grundlagen

### 2.1. Die Formen der Zweiphasenströmung und die Grundtypen der Kreisprozesse] mit [Flüssigmetall-MHD-Generatoren

Im Vergleich zu den MHD-Systemen mit ionisierten Gasen werden die Systeme mit flüssigem Metall durch viel zahlreichere Varianten und Modifikationen gekennzeichnet. Eine einfache Erklärung dafür liegt darin, daß die letztgenannten Kreisprozesse in einem Arbeitsgebiet arbeiten, in dem gleichzeitig die Dampf- und Flüssigkeitsphase auftreten. Die dadurch bedingte Aufteilung des Systems in zwei Kreise – den Dampf- und Flüssigkeitskreis – bringt schon allein eine ganze Reihe von Möglichkeiten. Außerdem wird aber noch der Charakter dieses Systems durch die ausgewählte Form der Zweiphasenströmung grundsätzlich beeinflusst.

Bei einer homogenen Strömung unterscheidet man zwei prinzipielle Möglichkeiten:

1. Das Durchflußvolumen der Gasphase ist ausschlaggebend; man stellt sich vor, daß in diesem Falle die Flüssigkeitsphase in Form von mikroskopischen Tropfen im gasförmigen Kontinuum zerstreut ist. Das Arbeitsmedium ist vom Typ „Nebel“.

2. Das Durchflußvolumen der Flüssigkeitsphase ist größer als das Durchflußvolumen der Gasphase; diese ist dann als kleine Dampfblasen in der „schweren“ flüssigen Komponente (Kontinuum) enthalten. Das Arbeitsmedium ist vom Typ „Emulsion“ („Schaum“).

Im ganzen Bereich der inhomogenen Strömung interessiert uns nur der Grenzfall, in dem.

3. Das Volumen der Teilchen beider Komponenten so groß ist, daß sie den ganzen Querschnitt des Kanals ausfüllen. Man spricht dann von einer kolben- oder stöpselförmigen Strömung („slug flow“) mit pulsierendem Charakter.

Trotz der Verschiedenheit der Strömungsarten bleibt der allgemeine Arbeitsprinzip immer aufrechterhalten: Die Wärmezufuhr hat die Bildung der gasförmigen Komponente zur Folge, die im weiteren Teil des Kreisprozesses expandiert, wobei ein Teil der aufgeno-

mmenen Wärmeenergie in die kinetische Energie umgewandelt wird. Die Bildung der Gasphase ist deshalb für die Energieumwandlung unentbehrlich. Die gewonnene kinetische bzw. Druckenergie muß allerdings weiter in die elektrische Energie im MHD-Generator umgewandelt werden; dazu braucht man ein elektrisch leitendes Arbeitsmedium. Dieser Anforderung entspricht die flüssige Phase, die dabei die Energie der Gasphase übernimmt, was natürlich mit wesentlichen Energieverlusten verbunden ist.

Die Gas- (Dampf-) Phase im MHD-Generator selbst ist nicht nur überflüssig, sondern in der Regel sogar schädlich und muß deshalb entfernt werden. Dies ist vor allem in den mit dem „Nebel“ arbeitenden Systemen nötig, in denen der Gasanteil relativ groß ist. Für die Lösung dieser Aufgabe können zwei prinzipiell unterschiedliche Wege eingeschlagen werden: Man kann entweder die beiden Komponenten mechanisch abscheiden (in Systemen mit Separatoren), oder man kann die Dampfphase noch vor dem Eintritt in den MHD-Generator kondensieren (in Kondensationssystemen). Beide Verfahren sind selbstverständlich mit zusätzlichem Energieverlust verknüpft.

Da die übrigen zwei Strömungsformen keiner weiteren Gliederung unterlagen, lassen sich nunmehr folgende vier Hauptsysteme erwähnen:

- 1) System mit einem Separator,
- 2) System mit einem Kondensator,
- 3) System mit Emulsion,
- 4) System mit inhomogener Strömung.

## 2.2. Charakteristiken der Grundvarianten

System mit einem Separator. Das Schema dieses Systems ist aus der Abb. 2 ersichtlich. Die gestrichelten Elemente werden wir vorläufig nicht berücksichtigen. In diesem sowie in allen anderen Schemen sind alle Teile (Diffusoren u dgl.) ohne eine grundsätzliche Be-

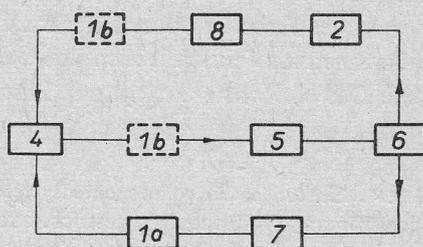


Abb. 2. Einstufiges Separationssystem mit einer Komponente (vollausgez.); gestrich. ausgez. — Variante mit Partialseparation

1 — Wärmezufuhr, 2 — Wärmeabfuhr, 4 — Vermischung,  
5 — Zweiphasen-Düse, 6 — Separator, 7 — MHD-Generator,  
8 — Flüssigkeitspumpe

deutung für die Auslegung des Kreisprozesses ausgelassen. Man sieht, daß sich der Kreisprozeß in den Dampfkreis mit Wärmeabfuhr und in den Flüssigkeitskreis mit Wärmezufuhr teilt. Das Kondensat aus dem Dampfkreis wird in eine Mischkammer gepumpt und dort mit vorgewärmter (und zum Teil verdampfter) Flüssigkeit vermischt. Darauf erfolgt weitere Verdampfung, die noch während anschließender Entspannung des Zweiphasen-Gemisches in der Düse fortsetzen kann. Der Dampf wird von der Flüssigkeit im Separator abgetrennt und in den Kondensator zurückgeführt. Die Flüssigkeit verläßt den Separator mit relativ hoher Geschwindigkeit ( $\sim 100$  m/s), gibt ihre Energie im MHD-Generator ab, durchläuft den Diffusor und kehrt zur Wärmezufuhr wieder zurück.

System mit Kondensation. Dieses System unterscheidet sich von der letztgenannten Anordnung offensichtlich schon dadurch, daß die Vermischung der Medien aus beiden Kreisen erst nach vorhergehender Beschleunigung in den Düsen, also bei ziemlich unterschiedlichen Geschwindigkeiten stattfindet (Abb. 3). In der „Dampfdüse“ expandiert dabei der Naßdampf, in der zweiten Düse die untergekühlte Flüssigkeit: Die Wärmezufuhr

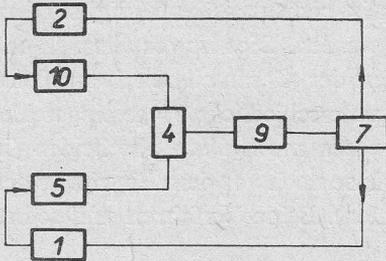
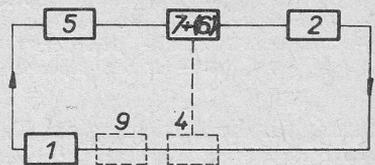


Abb. 3. Einstufiges Kondensationssystem mit einer Komponente  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 4 - Vermischung,  
 5 - Zweiphasen-Düse, 7 - MHD-Generator, 9 - Kondensation,  
 10 - Flüssigkeitsdüse

und - abfuhr sind gegenüber dem ersten System ebenfalls geändert. Zum Kontakt beider Medien kommt es in der Mischkammer, in der die Flüssigkeit weiter beschleunigt wird und der Ausgleich der Enthalpien beider Komponenten die Kondensation des Dampfes zur Folge hat. Ein Teil der hohen kinetischen Energie des Ausgangsstromes (~200 m/s) wird im MHD-Generator abgegeben, ein anderer Teil wird im Diffusor zur Umwälzung des Arbeitsmediums ausgenützt.

System mit Emulsion. Die beiden letztgenannten Systeme werden durch hohe Reibungs- und Separations-, bzw. Mischverluste gekennzeichnet, die durch relativ hohe Geschwindigkeiten und mehrstufige Energiewandlung (Wärmeenergie - kinetische Energie des Dampfes - kinetische Energie der Flüssigkeit - elektrische Energie) bedingt sind. Diese Nachteile beseitigen im Prinzip die beiden restlichen Systeme, in denen einerseits die Druckenergie des Arbeitsmediums mehr zur Geltung gebracht wird, andererseits das gesamte Arbeitsmedium (einschließlich der Gas-Komponente) durch den MHD-Generator geführt wird. Das einfachste System mit Emulsion ist auf der Abb. 4 voll ausgezogen dargestellt.

Abb. 4. Einstufiges Einkomponentensystem mit Emulsionsströmung (voll ausgez.); gestrich. ausgez. - Variante mit Separation während der Expansion  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 4 - Vermischung,  
 5 - Zweiphasen-Düse, 6 - Separator, 7 - MHD-Generator,  
 9 - Kondensation



Die Energieabnahme im MHD-Generator ist mit der Expansion gekoppelt, sodaß das Arbeitsmedium nur wenig beschleunigt wird. Man erwartet hier eine stabile Arbeitsweise auch bei relativ kleinen Geschwindigkeiten. Dieser Kreisprozeß ist aus diesem Grunde sehr günstig und liegt dem Carnotprozeß am nächsten. Den Nachteil sieht man darin, daß wegen der geringeren elektrischen Leitfähigkeit und Dichte des Arbeitsmediums ein Gleichstrom-MHD-Generator und Wechselrichter einzusetzen ist.

System mit inhomogener Strömung. In diesem Fall ist die Flüssigkeitssäule im Strömungskanal durch große „Dampfblasen“ in getrennte „Flüssigkeitskolben“ verteilt, die sich im kleinen, durch die Wände beheizten und mit Magnetventil versehenen Raum vor dem MHD-Generator bilden, (Abb. 5). Die Dampfblasen treiben die schweren

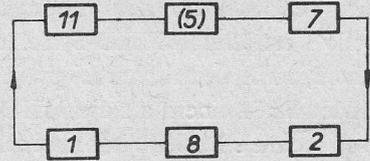


Abb. 5. System mit inhomogener Strömung

1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 5 - Zweiphasen-Düse, 7 - MHD-Generator, 8 - Flüssigkeitspumpe, 11 - Bildung der Flüssigkeitssäulen

„Flüssigkeitskolben“ durch den MHD-Generator, in dem durch die entsprechenden Pulsationen der Wechselstrom erzeugt wird. Trotz der klaren Nachteile (z.B. die Verformung der „Flüssigkeitskolben“, das Anhaften der Flüssigkeit an der Wand usw.) bietet dieses System auch wesentliche Vorteile: u. a. die Flüssigkeitsbeschleunigung erfolgt ohne Vermischung, d.h. ohne Verluste durch Stoßerscheinungen, die Anlage kann mit hohem Wirkungsgrad schon bei kleinen Leistungen arbeiten, usw.

2.3. Kennwerte für die Grundvarianten und Wege zu deren Verbesserung

Typische Werte für den thermischen (Konversions-) Wirkungsgrad der Hauptssysteme sind auf Grund der Arbeit [8] in der Tabelle 1 wiedergegeben. Man sieht, daß die beiden Systeme mit dem Arbeitsmedium „Nebel“ in der einfachsten Form etwa den gleichen, und zwar sehr niedrigen Wirkungsgrad haben. Der Grund dafür sind zum Teil die Unvollkommenheit des Kreisprozesses, zum Teil die erheblichen Verluste bei der Separation, Vermischung und Kondensation und schließlich die große Wärmemenge, die den MHD-

Tabelle 1

System	Grundvariante			Typische sehr günstige Anordnung			
	Arbeitsmedium	therm. Wirkungsgrad [%]	Liter.	Arbeitsmedium	Charakteristische Angaben	therm. Wirkungsgrad [%]	Liter.
mit Abscheider	K, Cs	3 - 4	[9]	K	mit Partial-Separation (Abb. 2)	~ 15	[17]
mit Kondensation	K, Na, Cs	3 - 4	[9, 10, 11, 12]	Cs - Li	mit maximaler Wärmeregenerierung (Abb. 6)	~ 19	[18]
mit Emulsionsströmung	NaK, Cs, (K)	~ 6 (14)	[13, 14, 15]	He - Li	Zweistoffsystem, zweistufig, mit Wärmeregenerierung (Abb. 9)	~ 30	[20]
mit inhomogener Strömung	Cs	~ 15	[16]	K - Li	Zweistoffsystem (Abb. 5)	~ 30	[21]

Generator in flüssiger Phase verläßt. Tabelle 1 weist darauf hin, daß die Kreisprozesse mit „Emulsion“ einen etwas höheren Wirkungsgrad aufweisen sollten und daß der Wirkungsgrad der Systeme mit inhomogener Strömung am höchsten liegt. Diese Angaben ergaben sich nur aus einer theoretischen Überlegung, haben bisher keine experimentelle Begründung gefunden und müssen deshalb nur mit Vorbehalt angewandt werden.

Im Vergleich zur konventionellen Energieumwandlung ist der Wirkungsgrad der in Tabelle 1 erwähnten MHD-Systeme ziemlich gering. Das ist selbstverständlich ein großer Nachteil, auch wenn man bei praktischer Anwendung mit Abwärmeverwertung des flüssigen Metalls in einem an die MHD-Einrichtung angeschlossenen Niedertemperatur-Kreisprozeß rechnet. Deshalb hat man schon von Anfang dieser Forschung an eine Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades angestrebt. Dazu führen ähnlich wie im konventionellen Fall, zwei Wege: Die Verbesserung des Wirkungsgrades von Einzelteilen der Anlage und die thermodynamische Verbesserung des gesamten Kreisprozesses (Carnotisierung). Wir wollen zunächst auf die letztgenannte Möglichkeit eingehen und dabei wesentliche Fragen mit Rücksicht auf die allgemein gültigen Grundsätzen erörtern.

#### 2.4. Zur Carnotisierung dienende Maßnahmen

Ein Zweikomponenten-System. In mehreren Arbeiten (z. B. [9, 10]) hat man erwiesen, daß es von dem Standpunkt des Kreisprozesses aus erwünscht ist, die Flüssigkeitsphase mit hoher spezifischen Wärme und den Dampf dagegen mit niedriger spez. Wärme zu verwenden. Diesen gegensätzlichen Anforderungen kann man durch die Anwendung von zwei Arbeitsmedien im Kreisprozeß entsprechen: von „leichtem“ Medium im Flüssigkeitskreis und von „schwerem“ Medium im Dampfkreis. Das meistverwendete Paar ist Cäsium-Lithium. Die Kombination Kalium-Lithium wäre thermodynamisch ebenfalls günstig, falls keine Auflösung von Kalium im Lithium auftreten würde. Das Schema in der Abb. 6 stellt das Kreisprozeß mit Kondensations-Injektor dar, in dem Cäsium vom Lithium durch Verdampfung vollkommen getrennt wird. Der Wirkungsgrad des Kreisprozesses wurde auf 19% abgeschätzt [18].

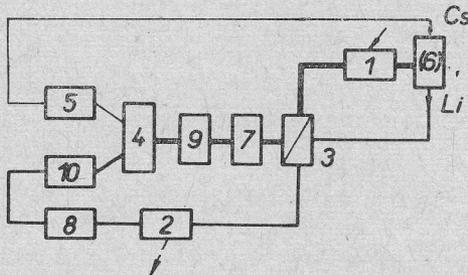


Abb. 6. Zweikomponentensystem mit Kondensationsinjektor und Wärmeregenerierung nach [18]  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 3 - Wärmeaustauscher, 4 - Vermischung, 5 - Zweiphasen-Düse, 6 - Separator, 7 - MHD-Generator, 8 - Flüssigkeitspumpe, 9 - Kondensation, 10 - Flüssigkeitsdüse

Wärmeregenerierung. Aus der Abb. 6 ist noch eine wichtige Abänderung des Kreisprozesses ersichtlich, die zur Carnotisierung beiträgt: die regenerative Vorwärmung des Arbeitsgemisches Li-Cs mit flüssigem Li. Der Sinn dieser Abänderung ist einleuchtend. Sie soll auch bei den übrigen Typen die mittlere Temperatur der in den Kreisprozeß zugeführten Wärme erhöhen und die mittlere Temperatur der Abwärme herabsetzen.

In anderen Worten, es wird angestrebt, die ungünstigen Folgen der isobaren Wärmezufuhr und -abfuhr abzuschwächen. Die Nachteile dieser Maßnahme sind eine kompliziertere Anlage, größere Druckverluste und kleinere spezifische Leistung.

Mehrstufige Anlage. Das mehrstufige System ermöglicht, die großen, für einstufige Vermischung der Flüssigkeits- und Dampfphase charakteristischen Geschwindigkeits- und Temperaturdifferenzen in mehrere kleine Differenzen zu verteilen. In der Abb. 7 sind gemäß [18] drei Stufen eines Systems mit Separator dargestellt. Thermischer Wirkungsgrad

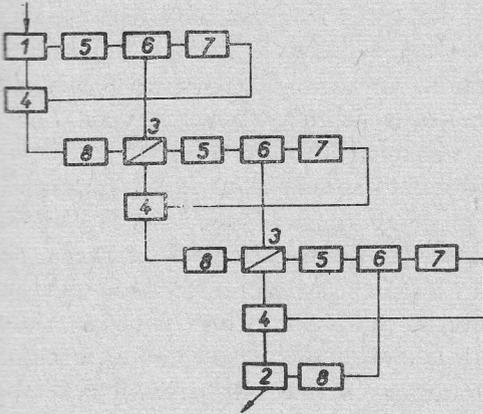


Abb. 7. Mehrstufiges Separationssystem nach [18]  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 3 - Wärmeaustauscher,  
 4 - Vermischung, 5 - Zweiphasen-Düse, 6 - Separator,  
 7 - MHD-Generator, 8 - Flüssigkeitspumpe

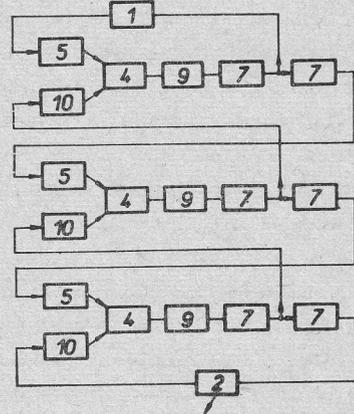


Abb. 8. Mehrstufiges Kondensationssystem nach [18]  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 4 - Vermischung, 5 - Zweiphasendüse, 7 - MHD-Generator, 9 - Kondensation, 10 - Flüssigkeitsdüse

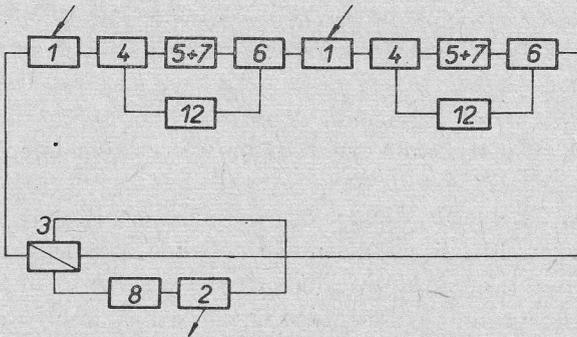


Abb. 9. Zweistufiges Emulsionssystem mit Wärmerегeneration nach [20]  
 1 - Wärmezufuhr, 2 - Wärmeabfuhr, 3 - Wärmeaustauscher, 4 - Vermischung, 5 - Zweiphasen-Düse, 6 - Separator, 7 - MHD-Generator, 8 - Flüssigkeitspumpe, 12 - Diffusor

dieses Systems soll 12% bzw. 14% betragen je nach dem, ob man Kalium oder Cäsium als Arbeitsmedien verwendet. Der mehrstufige Kondensationsprozeß (Abb. 8) wurde derselben Arbeit entnommen. Man sieht, daß die Anlage wiederum sehr kompliziert ist. In der Abb. 9 sieht man schließlich einen regenerativen zweistufigen Zweikomponenten-System mit

„Emulsion“ nach [20]. In diesem Fall hat die Anwendung der zweiten Stufe etwas andere Bedeutung: Beim endlichen Partialdruck wird die leichte Komponente immer von der anderen Komponente teilweise mitgerissen, so daß man mit totaler Abtrennung beider Komponenten nicht rechnen kann. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Wärmeaustausches, der Pumpe und des Gesamten Prozesses verschlechtert. Die Anwendung einer zusätzlichen Stufe ermöglicht, eine günstigere Temperatur für die Abscheidung zu wählen.

**Andere Lösungen.** In allen diesen Fällen handelt es sich, mindestens zum Teil, um die Anwendung eines der früher angeführten Prinzipien. Dies läßt sich auf zwei Beispielen zeigen: In Abb. 2 ist die Variante von Kaye [17] gestrichelt ausgezogen. Der Vorteil dieses Schemas mit der s. g. Teilseparation liegt darin, daß man durch die Änderung des Separationsgrades die Endfeuchtigkeit des Stromes und dadurch die Stautemperatur regelt. Der Erhitzer im Dampfkreis ermöglicht außerdem die Vermischung beider Ströme bei niedrigen Temperaturen. Den Wirkungsgrad dieses Kreisprozesses hat man auf 15,5% berechnet, was günstiger ist als bei den anderen Varianten dieses Systems.

Die Abb. 4 stellt eine Modifizierung des Systems mit Emulsion nach [19] dar (gestrichelt ausgez.). Der Durchfluß durch den Generator ist spiralförmig, was die Dampfseparation begünstigt und zur Erhaltung der hohen elektrischen Leitfähigkeit und der Dichte des Arbeitsmediums beiträgt. Die Endverluste des elektrischen Generators lassen sich auf diese Weise ebenfalls herabsetzen was alledrings durch Erhöhung der Reibungsverluste erkauft wird. Der Dampf nach der Abscheidung kommt in den Kondensations-Injektor, der in diesem Falle die Pumpe ersetzt. Es handelt sich also um eine ganz interessante Kombination der Emulsionsströmung und des Kreisprozesses mit Injektor. Der berechnete Wirkungsgrad soll hier wieder relativ hoch sein (etwa 20%).

Die in diesem Absatz diskutierten Möglichkeiten sind im rechten Teil der Tabelle 1 zusammengestellt. Daraus ergibt sich auch die Begründung für ihre Wahl: sie beruhen zwar auf den bisherigen, experimentell in den meisten Fällen nicht erprobten Vorstellungen, aber sie stellen trotzdem eine Grenze für die Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades der einzelnen Grundtypen dar.

### 3. ·Hauptelemente und Experimentaleinrichtungen

Nachdem wir eine allgemeine Vorstellung von einzelnen Hauptsystemen der MHD-Einrichtung mit flüssigem Metall gewonnen haben, halten wir es für sinnvoll, noch eine kurze Übersicht über die bisherige Entwicklung zu geben. Das erste internationale Symposium über die MHD-Energieumwandlung fand im Jahre 1962 in Newcastle statt [1]. Den Fragen eines Flüssigmetall-MHD-Generators hat sich damals ein einziges Referat gewidmet [28].

Das Interesse für diese Art Energieumwandlung ist dann rasch gestiegen (Abb. 1). Man hat sich zunächst der thermodynamischen Analyse von Wärmekreisprozessen gewidmet, und zwar für drei Hauptvarianten: mit Separation, mit Kondensation und mit Emulsionsströmung. Dabei hat man sich auch mit der Flüssigkeitsbeschleunigung und mit dem MHD-Generator selbst beschäftigt. Im Jahre 1966 wurde die erste Laborausführung des MHD-Generators getestet. In den späteren Jahren wurden die Gleichstrom- als auch die

Wechselstrom- (induktiven) Generatoren weiterentwickelt. Ebenfalls ist die relative und die absolute Zahl der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der flüssigen Metalle weiter gestiegen. Man widmete sich der allgemeinen Verbesserung von einzelnen Varianten, der Erhöhung des Wirkungsgrades von Teilprozessen sowie der Realisierung von neuen Ideen. Daraus ergaben sich bessere Kenntnisse von dem höchsten erreichbaren Wirkungsgrad dieser Energieumwandlung.

Das letzte fünfte Internationale Symposium in München hat gezeigt, daß die Zahl der Beiträge aus den Gebieten der MHD-Energieumwandlung mit ionisiertem Gas und mit flüssigem Metall sich gegenüber der vorigen Periode nicht mehr viel geändert hat. Daraus läßt sich auf eine gewisse Stabilisierung der Forschungsprogramme schließen; es werden jedoch mit Nachdruck die wichtigen Erscheinungen im Detail studiert, die Ingenieurprobleme gelöst und größere und teure Experimentalanlagen gebaut.

Um eine bessere Kenntnis von den wichtigen mit der Energieumwandlung mit flüssigem Metall verbundenen Problemen zu erhalten, wollen wir wenigstens zwei Hauptelemente dieser Anlage kurz analysieren: den MHD-Generator und das Flüssigkeitsbeschleunigungssystem.

### 3.1. MHD-Generatoren

Die Flüssigmetall-MHD-Generatoren ähneln sich den konventionellen Maschinen viel mehr als die mit schwach ionisiertem Gas arbeitenden Generatoren; ihre Entwicklung konnte dabei an die Erfahrungen im Bau und Betrieb der MHD-Pumpen anknüpfen.

Zunächst sei bemerkt, daß der Entwurf eines MHD-Generators sehr stark von der Strömung des Mediums im Generator abhängt. Die Kenngrößen sogar geometrisch einfachster Generatoren können durch das Strömungsprofil und andere scheinbar geringe Einwirkungen beeinflußt werden. Dazu gehört u. a. der Einfluß des Magnetfeldes auf das Geschwindigkeitsprofil, die Dampfentwicklung durch Joulesche Wärme in der Grenzschicht, die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit, der Dichte und der Kompressibilität durch die Anwesenheit der Dampfkomponente usw. Einen Beitrag zur Lösung dieser Fragen stellt z.B. die Arbeit [32] dar, in der ein mathematisches Modell einer Zweiphasenströmung mit großen und kleinen Blasen entworfen ist, und dann z. B. die Studie [31], die sich mit der spiralen Zweiphasenströmung beschäftigt.

Es gibt drei Typen von MHD-Generatoren: Den Gleichstromgenerator, den induktiven Wechselstromgenerator und den Wechselstrom-Synchrongenerator. Der letztgenannte Typ wurde unlängst in den Systemen mit inhomogener pulsierender Strömung angeführt.

Der prinzipielle Nachteil der Gleichstromgeneratoren ist die relativ niedrige Spannung und die daraus resultierenden Schwierigkeiten mit Erreichung eines annehmbaren Wirkungsgrades. Die ersten Arbeiten haben keine vergleichbaren Werte über den Einfluß der Reibung, der elektrischen Leitfähigkeit, sowie über die Grenzen einer stabilen Arbeitsweise usw. geliefert [43]. In der Arbeit [42] wurden theoretisch, und bei niedrigen Temperaturen auch experimentell, Systeme mit Arbeitsgemisch von Inertgas-Flüssigmetall studiert. Aufgrund dieser Studie kann man auf den Wirkungsgrad des Generators von über 50% bei 1200°C schließen. Pierson [32] hat in seinem Entwurf eines Gleichstrom-Generators

die für die Strömung günstige Parallelschaltung der Sektionen angewandt und diese mit der elektrisch vorteilhafter Reihenschaltung sinnvoll verknüpft.

Heute kann man zweifellos sagen, daß der Wirkungsgrad eines Gleichstrom-Generators mit reiner Einphasenströmung annehmbar hoch sein kann. Für Zweiphasenströmung muß dies nach Petrick [5] erst bewiesen werden, da sich der Phasenschlupf hier stark bemerkbar macht.

Die Reibung des Arbeitsmediums an den Kanalwandungen stellt in allen Fällen eine wichtige Verlustquelle dar. Man bemüht sich deshalb, die Freistrahlgeneratoren zu entwickeln. Die erste Studie über einen solchen Generator vom Faraday-Typ mit Natrium-Freistrahlgenerator hat den Gesamtwirkungsgrad auf etwa 60 - 70 % abgeschätzt [45]. Bei Steigerung der Intensität des Magnetfeldes wurde jedoch die Instabilität des Strahles beobachtet.

Beim induktiven Wechselstromgenerator ist die Bewegung des Magnetfeldes durch Anwendung einer Mehrphasenwicklung gewährleistet. Das erste Modell wurde im Jahre 1964 [33] geprüft, ein anderer Generator hatte 10 Polpaare, die Frequenz von 350 Hz, eine Leistung von 1840 W bei 215 V und den Wirkungsgrad von 35 % [24]. Eine Extrapolation dieser Angaben auf große Einheit hat gezeigt, daß sich bei diesem Typ ein Wirkungsgrad von etwa 70 % erreichen läßt.

Zu den aussichtsreichen Typen zählt man Generatoren, die mit mehreren Wellenlängen arbeiten. Dafür liegt eine Reihe von Experimenten vor. Als Beispiel dient ein MHD-Generator mit einem 3,5 Wellenlängen langen Kanal konstanten Querschnitts, welcher einen Wirkungsgrad von 15 % aufweist und eine Leistung von 3 kW abgibt [36]. Es hat sich weiter gezeigt, daß zur optimalen Auslegung des Generators eine genaue Kenntnis der Verteilung des Magnetfeldes und seiner Wechselwirkung mit dem Arbeitsmedium erforderlich ist [37, 38]. Gemäß der Analyse [39] ist die zylindrische Form dieses Generatortyps günstiger als diejenige mit rechteckigem Querschnitt.

Eine alternative Ausführung ist das System mit einer Wellenlänge und mit Kompensationspolen, die an den beiden Generatorenden zum Schließen des Magnetfeldes und für die Unterdrückung der Endverluste angeschlossen sind [35, 37]. Die Analyse [41] hat angedeutet, daß ein solcher Generator von 40 MW mit einem Wirkungsgrad von etwa 80 % und zwar bei verhältnismäßig hohem relativem Volumen ( $\sim 70\%$ ) der Dampfkomponente arbeiten könnte. Trotzdem hat Cerini [5] auf dem letzten Symposium auf Grund bedeutender Experimentalergebnisse mit induktiven Generatoren den Schluß gezogen, daß bisher kein System denjenigen Wirkungsgrad erreicht hat, der für die Erzeugung elektrischer Energie in realer, kommerziell interessanter Einrichtung erforderlich ist.

### 3.2. Generierung kinetischer Energie der Flüssigkeitsphase

Die Probleme der Zweiphasenströmung des Arbeitsmediums sind keineswegs nur auf den MHD-Generator beschränkt. In der Tat sind sie mit dem ganzen Kreisprozeß verbunden und bilden deshalb die bedeutendste Gruppe von Problemen, die bei dieser Energieumwandlung zu lösen ist.

Die Energieumwandlung beginnt in der Düse, in der das Arbeitsmedium beschleunigt wird. Dieser Vorgang verläuft meistens im starken Nichtgleichgewicht [46]. Der Unterschied zwischen der Gleichgewichts- und Nichtgleichgewichtsexpansion des Wasserdampfes

ist aus der Abb. 10 gut ersichtlich. Obwohl die Abweichungen vom Gleichgewichtszustand bei der Expansion flüssiger Metalle dank ihrer großen Wärmeleitfähigkeit wesentlich geringer sein können [47], sind große Geschwindigkeitsdifferenzen beider Phasen zu erwarten, was schließlich den Wirkungsgrad der Düse beeinflusst. Eine Ergänzung zu diesen

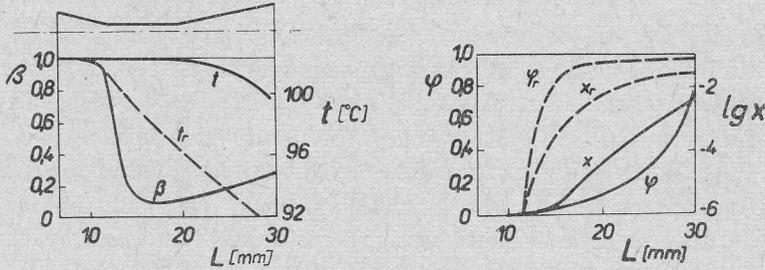


Abb. 10. Gleichgewichts- u. Nichtgleichgewichtsexpansion der gesättigten Flüssigkeit  
 $x$  – Dampftrockenheit,  $\varphi$  – relativer volumetrischer Dampfgehalt,  $t$  – Flüssigkeitstemperatur,  $c$  – Durchflussgeschwindigkeit,  $\beta = c/c_r$ , ( ) – betr. Gleichgewichtszustand

Erkenntnissen stellen die Experimente von Klein [49] dar, die noch die Druck- und Temperaturverteilung entlang der Düse, die Geschwindigkeit des Flüssigkeitsfilmes vor der Düsenwand und die Verteilung der Tropfengröße ermittelt haben. Die Messungen wurden mit Wasser, Kalium und Freon 113 in einer Laval-Düse mit einem Durchmesser von 1,5 mm im Laval-Querschnitt vorgenommen. Vorausgesetzt, der Druck dient als Normierungsparameter, Abb. 11 zeigt für alle Medien ähnliche Durchflußcharakteristik.

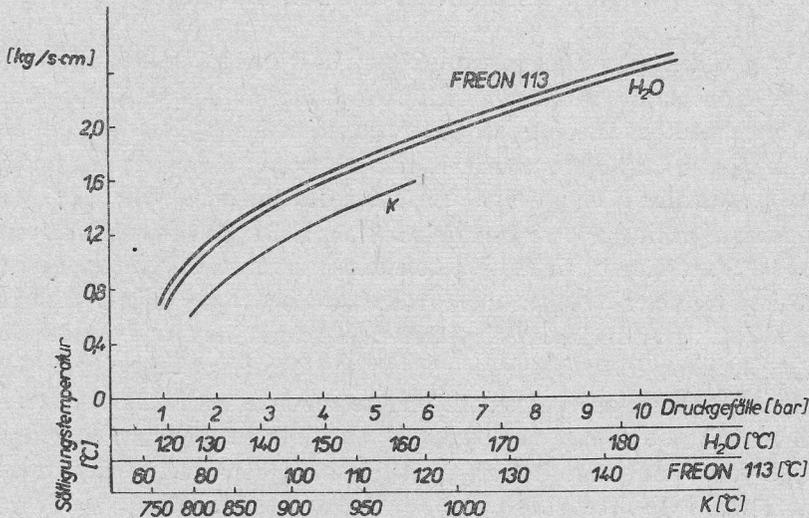


Abb. 11. Durchflusscharakteristik einiger Arbeitsmedien nach [49]

Die Versuche mit flüssigen Metallen sind ziemlich anspruchsvoll und kostspielig. Die Ausarbeitung einer Methodik zur Umrechnung der Experimentalergebnisse von konventionellen Arbeitsmedien (z.B. Wasser) auf flüssige Metalle ist deshalb von großer

Bedeutung. Aladjev [48] löst die Aufgabe mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie und geht dabei aus fünf Ähnlichkeitskriterien hervor. Die Theorie wurde auch experimentell geprüft und man hat festgestellt, daß sich die Meßergebnisse für verschiedene Düsen und verschiedene Wasser- und Kaliumdurchflußmengen mit dieser Methode gut auswerten lassen.

Der Entwicklung von Separationssystemen hat sich vor allem Elliott gewidmet. Die ursprünglich entworfenen Separatoren waren achsensymmetrisch konisch. Daraus entwickelte sich ein unsymmetrischer, flacher Separator (Abb. 12). Die Anlage, die in [51] beschrieben wird, hat mit einem  $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$ -Gemisch gearbeitet und wurde so konstruiert, daß Wasser durch das Eutektikum NaK ersetzt werden könnte. Man hat gefunden, daß der Wirkungsgrad des Abscheiders mit zunehmendem Dampfgehalt abnimmt; bei Einkomponentensystemen erscheint es deshalb zweckmässig, bei höherem Druck zu arbeiten.

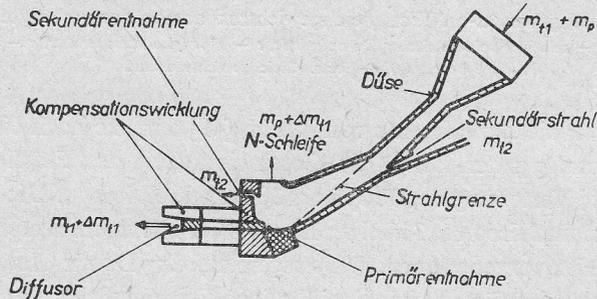


Abb. 12. Schema des Separators nach [51]

Etwa im gleichen Entwicklungsstadium wie die Systeme mit Separator befinden sich Systeme mit Kondensations-Injektoren [10]. Auch der Wirkungsgrad dieser Einrichtung sinkt mit zunehmender Dampftrockenheit sehr stark herab [30, 48]. Die Begründung dafür findet man in der Geschwindigkeitsdifferenz beider Komponenten und im Einfluß der Reibung. Aus der Nichtgleichgewichtsnatur des Vorgangs geht weiter hervor, daß totale Kondensation eine größere Unterkühlung der Flüssigkeit erfordert als es theoretisch begründet ist. Auch dann ist eine totale Kondensation schwer erreichbar. Trotzdem haben die Ergebnisse mehrerer Arbeiten die Annehmbarkeit der einstufigen Vermischung von Dampf- und Flüssigkeitsphase für die MHD-Energieumwandlung bestätigt [22, 30].

Die Experimente mit Wasser, die zur Ermittlung der Anlaufbedingungen des Injektors dienten, haben gezeigt, daß bessere Ergebnisse durch Anwendung der Überlaufventile als durch einfache Regelung der Zustands- und Durchflußparameter von getriebener Medien und vom Antriebsmedium zu erreichen sind [46]. Ähnliche Experimente, jedoch mit Kalium, sind in [54] beschrieben. Ziemlich eingehend sind diejenigen Möglichkeiten der mehrstufigen Systeme bearbeitet, in denen mit Totalkondensation erst in der letzten Stufe gerechnet wird [18, 25, 27, 29, 53]. Dieser Weg ist zwar theoretisch interessant [11, 18, 23, 57], aber experimentell leider noch nicht überprüft. Es kann deshalb nicht ausgeschlossen werden, daß die Reibungs- und Mischverluste dominieren werden, so daß der Reingewinn der mehrstufigen Anordnung durch diese Verluste wesentlich vermindert wird.

Diese Ergebnisse und Überlegungen führen zur Annahme, daß man den sehr niedrigen Wirkungsgrad des Injektors (wenige Prozente) deutlich nicht erhöhen kann. Die Aufmerksamkeit wird deshalb auch den neuen, mehr versprechenden Kondensationsystemen gewidmet. Ein Beispiel dafür ist ein Kondensator mit Hohlkern [22] in dem der zylindrische Dampfstrahl auf der Oberfläche eines Flüssigkeitsfilmkegels kondensiert. Dieser Flüssigkeitsfilm wird durch Ausspritzen der Flüssigkeit aus einer schmalen Ringdüse in die Richtung von der Peripherie zur Kondensatorachse gebildet. Aus der Kegelspitze wird ein schmaler Strahl der Flüssigkeit entnommen (Abb. 13). Die Apparatur arbeitet angeblich stabil und ohne Kondensationsstöße; daraus ergibt sich ein hoher Wirkungsgrad für den Austausch der kinetischen Energie, welcher in einer optimierten Anlage sogar 50% überschreiten könnte.

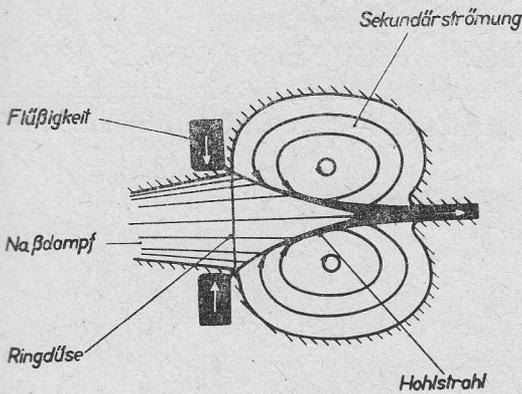


Abb. 13. Hohlkernkondensator nach [22]

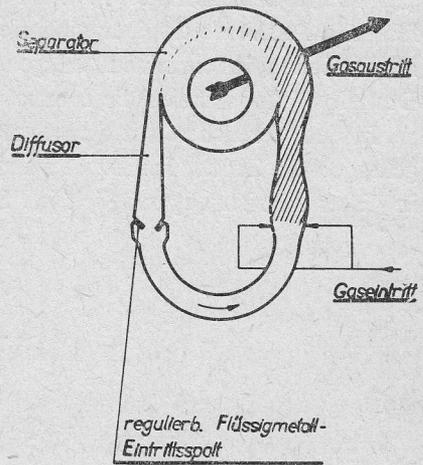


Abb. 14. Schema eines MHD-Generators mit Emulsionsströmung nach [58]

Die letzten Berichte über den Fortschritt in der Erforschung von neueren Emulsionsystemen sind anregend. Das System in der Abb. 9 hat Petrick [20] theoretisch studiert. Wertvoll sind seine Schlüsse betreffend die Folgen von Mitreißen des Flüssigmetall dampfes in das abgetrennte Gas. Er hat gefunden, daß der Wirkungsgrad des Generators dadurch bis um 25% herabgesetzt werden kann.

Die Experimente haben die Anwendbarkeit der Emulsionsströmung [22] bestätigt. Bemerkbar erscheint die originelle Lösung dieses Kreisprozesses in [58], (Abb. 14). Als Arbeitsmedium dient hier das Zweikomponentengemisch Inertgas-flüssiges Metall (Ar – Na). Die Vermischung und die Separation der beiden Komponenten erfolgt in den gegenübergesetzten Teilen der sehr kurzen Flüssigmetallschleife. Die ersten Modellversuche mit Luft-Wasser-Gemisch in diesem System zeigten, daß das Verhalten der Emulsion bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten noch besser geklärt werden muß, um die optimale geometrische Auslegung der Kanäle zu ermöglichen. Weiter hat man festgestellt, daß die Relativgeschwindigkeit der Komponenten unter  $\sim 2$  m/s liegt, so daß die Energieübertragung zwischen dem getriebenen Medium und dem Antriebsmedium sehr effektiv ist. Da die

Geschwindigkeit im ganzen System konstant bleibt, wird die elektrische Energie aus der Druckenergie gewonnen und die Reibungsverluste bei den Geschwindigkeiten um 40 m/s sind unwesentlich. Die übrigen Verluste sind aufs Minimum beschränkt, da das ganze System einschließlich der Übergangsstücke des Kanals vom Magnetfeld konstanter Intensität (die die Optimale geometrische Form des Querschnitts gewährleistet) umgeben ist. Diese Kompaktanlage ist deshalb durch einen relativ hohen Wirkungsgrad der Energieumwandlung gekennzeichnet.

### 3.3. Experimentaleinrichtungen

Den heutigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Energieumwandlung mit flüssigem Metall charakterisiert u. a. ein umfassender Experimentalprogramm. Eine zusammenfassende Auskunft darüber gibt die Tabelle 2. Man sieht daraus, daß auch eine kurze Beschreibung der einzelnen Anlagen den Rahmen dieser Arbeit vollkommen überschreitet. Deshalb wollen wir nur die interessantesten Anlagen kurz erwähnen.

In den Versuchen mit dem System mit Separator (Schema siehe Abb. 15) [51] ist es gelungen die Zirkulation zu bezwingen und so nachzuweisen, daß eine Energieerzeugung in dieser Einrichtung möglich ist. Später wurde hier – zum erstenmal in einer MHD-

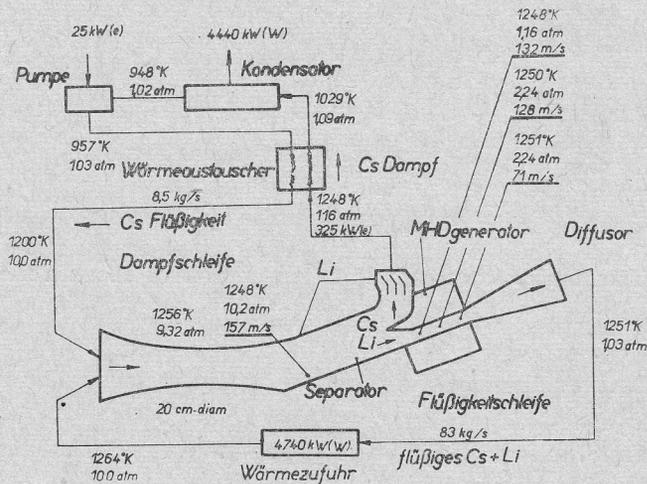
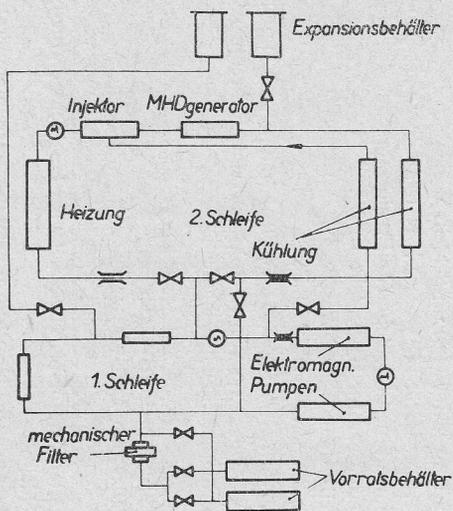


Abb. 15. Schema des experimentellen Separationssystems nach [51]

Einrichtung mit flüssigem Metall-elektrischer Strom erzeugt. Das System hat dabei stabil gearbeitet und war gut steuerbar. Immerhin, die Ergebnisse der letzten Experimente sind nicht vielversprechend, da die geplanten Parameter nicht im weiten erreicht wurden: statt einer Leistung von 30 kW hat man nur 1 kW erreicht. Der Grund dafür lag wahrscheinlich in einem zu hohen Dampfgehalt und daher in unerwartet kleiner Dichte und elektrischer Leitfähigkeit des Flüssigkeit-Dampf-Gemisches; ebenfalls waren die Verluste in den Spulenwicklungen [52] groß.

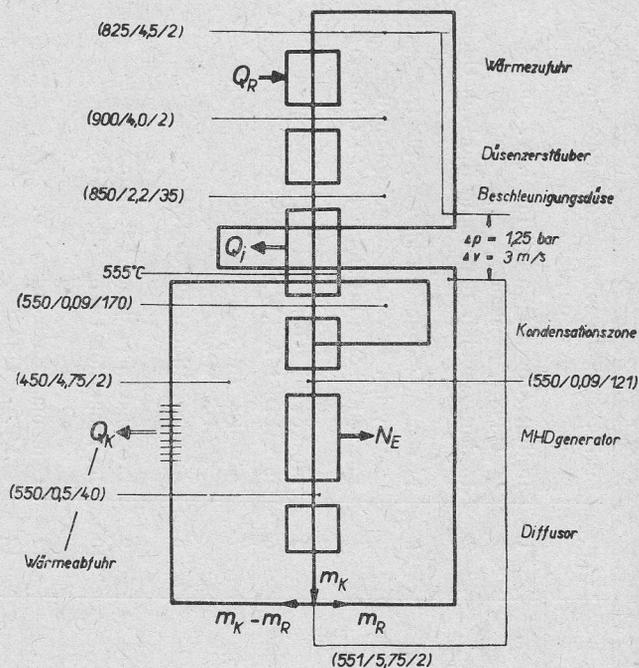
Sehr gute Ergebnisse hat man in einer Kalium-Anlage erzielt, die 500 Stunden bei einer Temperatur von 500°C und etwa 150 Stunden bei 700 - 900°C arbeitete [54]. Man

Staat	No.	Institutionen, die auf dem Gebiet der Energieumwandlung mit flüssigen Metalle arbeiten	Experimentaleinrichtung
UdSSR	1	Institut Atomnoi Energii im. I. V. Kurtschatowa A.d.W.d. UdSSR, Moskau	Hochtemperatur-Na- u. K-Schleife
	2	Institut Vysokikh Temperatur A.d.W.d. UdSSR, Moskau	Modellsystem Dampf-Wasser, Niedertemperatur-NaK-Schleife
	3	Nautschno-issledovatel'skii Inst. Elektrofizitscheskoi Apparatury im. L. V. Efremova, Leningrad	Niedertemperatur-NaK-Schleife
	4	Energetitscheskii Inst. im. G. M. Krzizhanowskovo, Moskau	Modellsysteme Luft-Wasser u. Dampf-Wasser; Hochtemperatur-K-Anlage
	5	Moskowskij Gos. Universitet, Moskau	Niedertemperatur-Hg-Schleife
	6	Inst. Fiziki A.d.W.d. Latv. SSR, Riga	Hg-Experimentalkanal
USA	7	Atomics International, Edison Electric Institute, USAF, US Army	Hochtemperatur-K-Schleife, Niedertemperatur-NaK-Anlage
	8	Argonne National Laboratory	Modellsysteme Luft-Wasser u. Dampf-Wasser, Niedertemperatur-NaK/N <sub>2</sub> -Schleife
	9	Brookhaven National Laboratory	Niedertemperatur-Hg-Luft-Schleife
	10	Jet Propulsion Laboratory, NASA	Niedertemperatur-N <sub>2</sub> -Wasser-, N <sub>2</sub> /NaK-Systeme; Hochtemperatur-Li-Schleife für Erosionsforschung
	11	Grumman Engineering Co.	Niedertemperatur-Hg-Schleife
	12	M.I.T. - USAF	Modellsystem Dampf-Wasser
	13	U.S. Army Mobile Equipment E&D Center	Niedertemperatur-Hg-Schleife
B. R. Deutschland und W. - Berlin	14	AEG - Forschungsinstitut Berlin	Modellsystem Dampf-Wasser, Niedertemperatur-NaK-Schleife
	15	Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin	Versuchsanlage für Wasser-Spirituss-Gemisch, Freon u. Kalium
	16	Institut für Energiewandlung und Elektrische Antriebe, Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart	Niedertemperatur-Hg-Schleife
Frankreich	17	Compagnie électro-mécanique, Paris	Modellsystem Luft-Wasser
	18	Commisariat à l'énergie atomique, Centre d'études nucléaires de Saclay, Gif-sur-Yvette	Modellsystem Luft-Wasser
Japan	19	Osaka University	Niedertemperatur-N <sub>2</sub> /NaK-Anlage, Hochtemperatur-Na-Schleife
	20	Tokyo Institute of Technology; Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo	Hochtemperatur-Hg-Bi-Pb-Einrichtung; Hochtemperatur-Schleife für Versuche mit flüssigen Metallen



- ⊙ Druckmessung
- ≡ Durchflußmengenmessung

Abb. 16. Schema der Experimental-einrichtung nach [54]



$$u = m_K / m_R = 2,2 \text{ (max)}$$

(°C/atm/m/s)

Abb. 17. Schema der Experimentaleinrichtung nach [40]

hat dabei die Dampfströmung in der Laval-Düse, und das Start- sowie Betriebsverhalten des Injektors untersucht. In den Kreislauf (Abb. 16) wurde ein kleiner 1 kW-Gleichstrom-generator mit geteilten Elektroden eingeschaltet. Es wurde nachgewiesen, daß sich die Einrichtung auch in diesem kleinen Maßstab zur Energieerzeugung eignet.

Es sollen auch zwei in Berlin gebaute Anlagen [40] erwähnt werden. Die Abmessungen der größeren Anlage entsprachen der Bedingung, daß die Einwirkung von verschiedenen Sekundäreinflüssen, Stoßerscheinungen und Reibung auf die Meßergebnisse möglichst vermieden werden soll. Auf Grund von dergleichen Überlegungen wurde der Wärmeleistungsbedarf auf 1 MW gesetzt. Es handelt sich um ein Zweikreisssystem (Abb. 17). Im ersten Kreis wird Natrium im Ölerhitzer auf  $900^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt. Im Na-K-Wärmeaustauscher wird die Wärme an den Sekundärkreis abgegeben. Die entsprechende Durchflußmenge ist etwa 20 kg/s, was einem Strahldurchmesser von  $\sim 1$  cm entspricht; die Austrittstemperatur beträgt  $550^{\circ}\text{C}$ . Es wird mit dem Anschluß eines vierpoligen Dreiphasen-MHD-Generators, 50 Hz gerechnet.

#### 4. Schlußfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Übersicht über die MHD-Energieumwandlungssysteme mit flüssigem Metall gegeben. Alle diese Systeme sind dadurch gekennzeichnet, daß das Arbeitsmedium sich im Zustand eines sehr nassen Dampfes befindet, wobei die Expansion, bei der die Wärmeenergie in die kinetische Energie umgewandelt wird, in der Nähe der unteren Grenzkurve durchläuft. Das bringt eine Reihe von Problemen mit, und zwar nicht nur im MHD-Generator, sondern auch im Flüssigkeitsbeschleunigungssystem. Der Gesamtwirkungsgrad der Energieumwandlung ist deshalb – zumindest bei einfacher Grundanordnung relativ niedrig. Wir haben gezeigt, daß man mehrere Mittel zur Beseitigung dieses Nachteils zur Verfügung hat. Fast alle diese Mittel benötigen natürlich noch eingehende experimentelle Überprüfung, sodaß die Frage nach dem höchsten erreichbaren Wirkungsgrad dieser Energieumwandlungen noch offen bleibt.

Obwohl in den letzten Jahren in vielen mit der Weiterentwicklung des MHD-Flüssigmetallgenerators zusammenhängenden Fachgebieten ein merkwürdiger Fortschritt erreicht wurde, kann man nicht sagen, daß die Hauptprobleme gelöst sind und der Weg der Weiterentwicklung klar ist. Es kann aber angenommen werden, daß ein Stadium erreicht wurde, in dem alle hoffnungsvollen Prinzipien theoretisch insofern durchgearbeitet sind, um eine zukünftige intensive Konzentration der Bemühungen auf die aussichtsreichsten Systeme zu ermöglichen.

Ähnlich sind die Meinungen über die Aussichten einzelner Systeme. Unter der Annahme, daß der Wirkungsgrad eines Systems mit „Nebel“ – gleichgültig ob mit Separation oder mit Kondensation – 5% bis 7% betragen könnte; dann ist – nach den sowjetischen und einigen amerikanischen Autoren [29] – die Vorschaltung dieses Systems im kombinierten Kreisprozeß ökonomisch günstig. Es kann mit einem thermischen Gesamtwirkungsgrad von etwa 45% gerechnet werden. Als Wärmeenergiequelle können entweder fossile Brennstoffe oder die gasgekühlten Hochtemperatur-Kernreaktoren dienen. Die schnellen Kernreaktoren (Brüter) kommen nicht in Frage, da sie z. Zeit noch bei ungenügend hohen Temperaturen

arbeiten. Die Zukunft gehört allerdings den Brütern, so daß die gesgekühlten Hochtemperaturreaktoren für das MHD-System mit „Nebel“ vermutlich nicht genügend zukunftssicher sind. Es ergeben sich ebenfalls Bedenken, ob der erwähnte Wirkungsgrad von 5 bis 7% genügend hoch ist, damit sich die kompliziertere Einrichtung durchsetzen kann.

Systeme mit Emulsion bzw. Systeme mit inhomogener Strömung werden zweifellos einen ausreichend hohen thermischen Wirkungsgrad aufweisen, so daß das letzte Bedenken hier wegfallen sollte. Da der günstigste Temperaturbereich für diese Systeme zwischen 500 und etwa 1000 - 1100°C liegt, kann man auch hier mit dem Einsatz von Brütern nicht rechnen. Deshalb lassen sich wieder nur die konventionellen Brennstoffe oder die gesgekühlten Hochtemperaturreaktoren verwenden und der Kreisprozeß kann als ein Mittel- oder Niedertemperaturteil eines kombinierten Prozesses eingeschaltet werden. Auch dagegen läßt sich aber mit Ernst einwenden, daß gerade in dem in die Frage kommenden Temperaturbereich die Gasturbinen effektiv sind, einen höheren thermodynamischen Wirkungsgrad bieten und keinen zusätzlichen Wärmeaustauscher benötigen.

Aus Überlegungen dieser Art geht hervor, daß über die Zukunft der MHD-Systeme mit flüssigem Metall vor allem die Weiterentwicklung der Wärmeenergiequellen mitentscheiden wird. Natürlich kann sich diese Entwicklung von den heutigen Vorstellungen etwas entfernen. Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen kann der Fortschritt in der fluiden Verbrennung einen unerwarteten Umschlag bringen, bei der die strengen Vorschriften hinsichtlich der Abgasreinheit die Überschreitung der Temperatur von 890°C nicht zulassen. Ähnlich kann die Entwicklung von Kernreaktoren durch neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Gaskühlung von Brütern und durch den unvorgesehenen Fortschritt in der Kernfusionsforschung stark beeinflußt werden; man setzt voraus, daß die entsprechenden Reaktoren mit Flüssigmetallkühlung bei etwa 1000°C arbeiten werden. Nicht zuletzt können auf die Reaktorentwicklung auch die Experimente und der Betrieb von MHD-Systemen mit flüssigen Metall rückwirken.

#### Literatur

- [1] Proc. First Int. Symp. MHD Elect. Power Gen., Newcastle-upon-Tyne, 1962, IEE, London 1963.
- [2] Proc. Second Int. Symp. MHD Elect. Power Gen., Paris, Vol. 2, OECD/ENEA, Paris 1964.
- [3] Proc. Third Int. Symp. MHD Elect. Power Gen., Salzburg, Vol. 3, IAEA, Vienna 1966.
- [4] Proc. Fourth Int. Symp. MHD Elect. Power Gen., Warsaw, Vol. 6, IAEA, Vienna 1969.
- [5] Proc. Fifth Int. Symp. MHD Elect. Power Gen., Munich, Vol. 5, IAEA, Munich 1971.
- [6] Status Report on MHD Elect. Power Gen., IAEA, Vienna 1967.
- [7] MHD Elect. Power Gen., — The 1969 Status Report, OECD/ENEA, April, 1969.
- [8] F. H. Morse, *Survey of liquid Metal Magnetohydrodynamic Energy Conversion Cycles*. Energy Conversion, Vol. 10, S. 155 - 176, 1970.
- [9] E. Weiberg and L. G. Hays, *Comparison of liquid metal magnetohydrodynamic power conversion cycles*. Tech. Rep. No. 32, S. 946, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, August, 1966.
- [10] G. A. Brown and K. S. Lee, *A liquid metal MHD power generation cycle using a condensing ejector*. Paper No. 60 in [2].
- [11] W. Oldekop and D. Rex, *The efficiency of liquid metal MHD cycles with multistage injection*. Eighth Symp. Engng. Aspects of Magnetohydrodynamics. Stanford, California, 28 - 30 March, 1967.

- [12] W. D. Jackson and G. A. Brown, *Liquid metal magnetohydrodynamic power generator utilizing the condensing ejector*. Patent Disclosure, MIT, Cambridge, Mass., Oct. 15, 1962.
- [13] M. Petrick and K. Lee, *Performance characteristics of a liquid metal MHD generator*. Paper No. 62 in [2].
- [14] M. Petrick, *MHD generators operating with two-phase liquid metal flows*. Paper SM-74/196 in [3].
- [15] M. Petrick, Note in Rapporteur Section. S. 1871 in [2].
- [16] J. W. Bjerklie and J. R. Powell, *A liquid metal MHD power generation scheme using intermittent vaporization*. Paper SM-107/212 in [4].
- [17] Proposal to develop a liquid metal MHD power system based on the Kaye cycle. Joseph Kaye & Co., Cambridge, Mass., November 22, 1965.
- [18] V. M. Boldyrev *et al.*, *Thermodynamic analysis of new cycles for liquid metal MHD generators*. Paper SM-107/142 in [4].
- [19] J. S. Holmgren and K. P. Johnson, *A new approach to liquid metal power generation*. McDonnell Douglas Astronautics Company, Report No. DAC-58431, Oktober, 1966.
- [20] W. E. Amend, M. Petrick, *Performance of an efficient „low temperature“ liquid metal MHD power cycle suitable for large scale power production*. Paper in [5], Vol. 4, S. 125 - 140.
- [21] E. T. Bazeev, L. G. Bezusy, K. I. Kim, V. E. Pavlenko, I. M. Postnikov, G. M. Shchegolev, *Liquid metal MHD systems with laminar flow and electric power extraction based on the synchronous principle*. Paper SM-107/179, S. 1635 - 1646 in [4].
- [22] R. Radebold, *Energy conversion with liquid metal working fluids in the MHD-Staustahlrohr*. Paper No. SM-107/5 in [4].
- [23] R. D. Radebold, H. Lang, W. Westphal and W. Lochte-Holtgreven, *Energy conversion with liquid metal working fluids in MHD Staustahlrohr*. Paper No. 64 in [2].
- [24] L. L. Prem, *Analytical and experimental results of the fluid metal MHD power conversion programme*. Paper SM-74/184 in [3].
- [25] W. Oldekop, D. Rex, *Zum Wirkungsgrad von MHD-Prozessen mit Einspritz-Kondensation*. Advanced Energy Conversion, Vol. 7, No. 3 (1967), S. 137 - 158.
- [26] E. Klein, *Flashing of superheated liquid through convergent-divergent nozzles*. Paper SM-107/9, Vol. III, S. 1355 - 1364 in [4].
- [27] Z. Bayer, *Thermodynamic properties of liquid metal MHD power-cycles*. Prace IMP, No. 54 - 55, 1971, S. 47 - 57.
- [28] W. D. Jackson, E. S. Pierson, *Operating characteristics of the MHD induction generator*. In [1].
- [29] L. L. Prem, *Fluid metal MHD-steam binary plant economy for central stations*. Paper SM-107/24, Vol. III, S. 205 - 218 in [4].
- [30] M. Petrick, J. Roberts, *Analytical and experimental studies of liquid-metal Faraday generators*. Paper SM-107/20 in [4].
- [31] G. A. Baranov, V. F. Vasilyev, V. A. Glukhikh, B. G. Karasev, I. R. Kirillov, I. V. Lavrentyev, *Theoretical and experimental investigations of liquid-metal MHD-generators*. Vol. IV, S. 89 - 102 in [5].
- [32] C. Hsu, E. S. Pierson, M. Petrick, *A study of factors pertinent to the development of an efficient high power two-phase liquid-metal MHD generator system*. Vol. III, S. 63 - 80 in [5].
- [33] W. D. Jackson, E. S. Pierson, R. P. Porter, *Design considerations for MHD induction generators*. Paper No. 61 in [2].
- [34] H. Radebold, H. Lang, T. Schulz, H. Weh, E. Klein, K. H. Wagner, *Energy conversion with liquid metal working fluids in MHD-Staustahlrohr*. Paper SM-74/30 in [3].
- [35] D. G. Elliott, D. J. Cerini, L. G. Hays, E. Weinberg, *Theoretical and experimental investigation of liquid-metal MHD power generation*. Paper SM-74/177 in [3].
- [36] M. Ulber, T. Schulz, *Experimental results with a liquid-metal MHD induction converter*. Paper SM-107/6, S. 1979-2004 in [4].
- [37] E. S. Pierson, *Experimental study of a one-wavelength uncompensated MHD induction generator*. Vol. IV, S. 81 - 88 in [5].

- [38] M. Kant, A. Mouillet, A. Cagliano, R. Bonnefille, *Contribution theoretique et experimentale a l'optimalisation energetique des generateurs MHD alternatifs a veine liquide*. Vol. III, S. 87 - 106 in [5].
- [39] A. G. Chepovetsky, *Study on electromagnetic phenomena in cylindrical inductive MHD converter*. Vol. III, S. 107 - 128 in [5].
- [40] R. Radebold, H. J. Deeg, J. Freund, B. Lehmann, U. Michel, T. Schulz, H. P. Schwefel, P. Stübing, K. H. Wagner, *Energy conversion with liquid metal working fluids in the MHD Staustahlrohr* (Status Report 1971), Vol. III, S. 195 - 216 in [5].
- [41] D. G. Elliott, *Performance capabilities of liquid-metal MHD induction generators*. Rep. SM-107/41, S. 1859 - 1878 in [4].
- [42] R. Bidard, J. Sterlini, *MHD generator using an emulsion*. Paper SM-74/108 in [3].
- [43] P. L. Kirrilov, V. I. Subbatin, I. P. Stakhanov, N. M. Turchin, *Measuring the electrical conductivity of a liquid-vapor potassium mixture*. Paper SM-74/106 in [3].
- [44] L. G. Hays, *Effect of high-velocity lithium on structural materials*. Paper SM-107/42, S. 1365 - 1386 in [4].
- [45] K. I. Dmitriev, E. A. Zotova, I. A. Ivanov, V. S. Presnyakov, F. R. Ulinich, *Investigation of a liquid-metal jet MHD generator*. Paper SM-107/134, Vol. III, S. 2035 - 2046 in [4].
- [46] S. I. Vainshtein, A. F. Gandelsman, A. P. Sevastianov, E. E. Spilrain, K. A. Yakimovitch, V. S. Danilin, Y. F. Kalinin, G. V. Ciklaury, *Starting up of a steam-water injector with small diffuser throat cross-section and performance of a nozzle with evaporating liquid*. Vol. III, S. 195 - 216 in [5].
- [47] H. Städtke, *Theoretical investigation of non-equilibrium expansion of vaporizing potassium, through a convergent-divergent nozzle*. Vol. III, S. 7 - 20 in [5].
- [48] I. T. Aladiev, I. S. Vartazarov, V. A. Pakhorskii, S. V. Teplov, *Simulating conditions of double-phase nozzles*. Vol. III, S. 25 - 40 in [5].
- [49] E. Klein, *Preliminary results obtained from operation of two-phase nozzles with potassium, freon and water*. Vol. IV, S. 75 - 80 in [5].
- [50] Y. Mori, T. Harada, M. Uchida, T. Hara, *Two component liquid metal MHD generator cycle with a boiling separator*. Vol. III, S. 129 - 146 in [5].
- [51] D. J. Cerini, *Circulation of liquids for MHD power generation*. Paper SM-107/40, Vol. III, S. 2019 - 2034 in [4].
- [52] D. J. Cerini, D. G. Elliott, *Test results of NaK-Nitrogen liquid metal MHD converter*. Vol. III, S. 177 - 192 in [5].
- [53] J. Freund, *Investigation of the liquid-metal multi-stage injection process*. Paper SM-107/10, Vol. III, S. 1463 - 1476 in [4].
- [54] I. T. Aladiev, S. V. Teplov, I. M. Telmach, *Experimental potassium MHD installation of 1kW*. Vol. III, S. 161 - 176 in [5].
- [55] N. I. Semenov, V. V. Poljakov, V. A. Rjabov, *Separacia zhidkoj fazy smesi v dvuchkanalnom sope-separatore*. Teploenergetika No 8, S. 39 - 41 (1971) .
- [56] J. Klockgethen, H. P. Schwefel, *Two-phase nozzle and hollow core jet experiments*. 11th Symposium on engineering aspects of magnetohydrodynamics, Pasadena, California, March, 1970, S. 141 - 148.
- [57] Z. Bayer, *Optimum arrangements of multi-stage mixing process*. Vol. III, S. 49 - 62 in [5].
- [58] J. Sterlini, M. Trotignon, *Etudes preliminaires à la construction d'un générateur experimental a emulsion gas-metal liquide*. Vol. IV, S. 103 - 124 in [5].
- [59] V. A. Baschatov, V. M. Boldirev, A. E. Morosov, P. P. Orlov, I. M. Postnikova, Y. M. Sjaskin, E. E. Spilrain, K. A. Yakimovitch, *The analysis of liquid-metal MHD plants with a piston and homogeneous two-phase flow in the generator*. Vol. III, S. 239 - 254 in [5].
- [60] Y. Fujiie, T. Suita, *Induction power generation with two component two-phase flow*. Vol. III, S. 41 - 48 in [5].

## Konwersja energii na drodze MHD w płynnych metalach

### Streszczenie

Artykuł przedstawia obecny stan badań nad konwersją energii na drodze magnetohydrodynamicznej w płynnych metalach, włączając dyskusję możliwości dalszego postępu w tej dziedzinie.

W części pierwszej opisano podstawowe odmiany generatora (separacyjny, kondensacyjny, z przepływem emulsji i z przepływem prętowym). Podano różnorodne modyfikacje wspomnianych układów, zmierzające do podwyższenia ich sprawności cieplnej jak: zastosowanie układu dwuczynnika, odzysk ciepła, układy wielostopniowe, z częściową separacją itp.

W części drugiej przedyskutowano zagadnienia budowy generatorów MHD prądu stałego i zmiennego oraz problemy związane z rozpędzaniem fazy ciekłej. Szczególną uwagę poświęcono tu zjawiskom wynikającym z nierównowagi podczas ekspansji czynnika dwufazowego, separowaniu fazy ciekłej i gazowej z tego czynnika i zagadnieniu strat w injektorze kondensującym. W zakończeniu podano krótki opis ważniejszych instalacji doświadczalnych.

Jak wynika z analizy, w omawianej dziedzinie osiągnięto znaczny postęp, jednakże nie udało się dotąd rozwiązać wszystkich zasadniczych problemów. Kierunek dalszego rozwoju — trudny obecnie do przewidzenia — zależy będzie w dużym stopniu także od rozwoju nowych źródeł energii cieplnej, a zwłaszcza szybkich reaktorów jądrowych.

## MHD Energy Conversion with Liquid Metals

### Summary

The paper surveys the contemporary state of investigations of liquid metal with MHD energy conversion as well as possible further development in this field.

In the first part the basic types (separation-, condensation-, emulsion flow- and slug flow systems) are characterized. Various modifications of the aforesaid systems aiming at improving their thermal efficiency are described as e.g. the application of the two-component system, the heat recovery, multi-stage arrangements, partial separation system etc.

In the second part the main problems of the d.c. and a.c. MHD generators and problems connected with the liquid phase acceleration are discussed. Particular attention is paid to phenomena stemming from the non-equilibrium during the expansion of the two-phase medium, to problems of separating the gaseous and liquid components of the working medium and to losses in the condensing injector. In conclusion, some important experimental stands are described in brief.

As follows from the analysis, in the studied field a considerable success has been achieved, but not all basic problems have been solved yet. What a trend will be followed in the further development, which is at present difficult to provide for, this will to a great extent depend on the progress to be achieved in developing new thermal energy sources, especially new nuclear fast reactors.

## Прямое преобразование энергии в жидкометаллических МГД генераторах

### Резюме

В сообщении дается обзор современного состояния исследований в области преобразования энергии в жидкометаллических МГД генераторах и возможностей дальнейшего развития этих систем.

В первой части дается характеристика основных типов: сепарационного, конденсационного, эмульсионного и с поршневым течением; далее описываются различные мероприятия, способствующие повышению теплового к.п.д. этих систем, как: применение двухкомпонентной рабочей смеси, регенерации тепла, многоступенчатой установки, парциальной сепарации и т.д.

Во второй части разбираются главные проблемы МГД генераторов постоянного и переменного тока и проблемы связанные с ускорением жидкой фазы. В этой связи обращается внимание на результаты, вытекающие из неравновесного вида экспансии двухфазной среды, далее на проблемы сепарации газовой и жидкой составляющих рабочей смеси и на источники потерь в конденсационном инжекторе.

В заключении дается краткое описание некоторых важнейших экспериментальных установок. Из анализа вытекает, что в описываемой области достигнуты значительные успехи, однако до сих пор нельзя сказать, что главные проблемы решены. В результате этого и дальнейший путь развития не особенно ясен. О нем, не считая прогресса в развитии отдельных систем преобразования энергии в жидкометаллических МГД генераторах, будет решать и развитие источников тепловой энергии для этого преобразования и прежде всего развитие быстрых ядерных реакторов.