

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Stromerzeugungskosten und Anwendungsmög-
lichkeiten von Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-
Generatoren

Power Production Costs and Possible
Applications of Short-period
Combustion MHD Generators

R. Bünde⁺, S. Helm⁺⁺ und H. Muntenbruch⁺

IPP IV/32

Januar 1972

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten sind Ergebnis der vertraglichen Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG (MAN) und werden mit Mitteln des BMBW im Rahmen des Technologieprogramms gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein beim Autor.

January 1972 (in German)

A b s t r a c t

The possibilities of applying kerosene-oxygen fired MHD plants for fusion experiment power supply and for reserve power production in industrial and public grids were investigated. The costs of power generation by a plant that can reach its full load only 0.3 - 0.5 sec after being started, and that can vary its load with a time constant of about 10 ms were determined. As to the power supply of fusion experiments (Tokomaks and Stellarators) this type of MHD generator will cover quite well present and future requirements, and it may lead to an important reduction of energy costs. Concerning public and industrial grids this MHD plant is suited to short-period reserve power production required to prevent breakdown of the grid in the event of a sudden shut down of a unit. When this plant is only operated up to about 100 hours per year, the total power generation costs per year are considerably lower than those incurred by other reserve power supply methods.

+ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching

++ M.A.N., München

V o r w o r t

Die vorliegende Studie basiert auf einem Entwurf, der im März dieses Jahres fertiggestellt war. Es ist in ihr versucht worden, ein möglichst realistisches Bild von den Kosten der MHD-Stromerzeugung zu gewinnen.

Die bei der Bestimmung dieser Kosten zugrundegelegten Preise - sie gelten für den Zeitraum von Dezember 1970 bis Februar 1971 - beruhen weitgehend auf Angaben von Herstellern und nur zu einem geringen Teil auf eigenen Kalkulationen. Es war beim gegenwärtigen Entwicklungsstand noch nicht möglich, ohne Abschätzungen auszukommen. Diese wurden jedoch ausserordentlich vorsichtig durchgeführt.

Seit der Fertigstellung des Entwurfes hat eine Vielzahl von Diskussionen bei Elektrizitätsversorgungsunternehmen und Industriekraftwerken sowie Forschungsinstituten im In- und Ausland stattgefunden. Alle diese Gespräche haben neben einer Fülle von Informationen eine grosse Zahl von Hinweisen und Anregungen erbracht, die weitgehend in die endgültige Formulierung dieser Studie eingeflossen sind. Allen Diskussionspartnern sei deshalb von den Autoren herzlich gedankt.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Diese Studie enthält

- eine Beschreibung der Eigenschaften des betrachteten MHD-Generators (Treibstoffe sind Kerosene und flüssiger Sauerstoff; Hochfahrzeit von Start auf Vollast in 0,3 - 0,5 sec; Laständerungen im Betrieb mit einer Regelzeitkonstanten von ca. 10 msec),
- die Bestimmung der Kosten für den mit diesem Generator erzeugten Strom (relativ niedrige Installationskosten bei relativ hohen Brennstoffkosten, daher möglichst kurzzeitiger Einsatz) sowie
- die Betrachtung des Einsatzes dieses Generators
 - zur Energieversorgung von Fusionsexperimenten,
 - zur Bereitstellung und Lieferung von Sofortreserve in der öffentlichen und industriellen Energieversorgung und
 - als Regelglied im Netz und
- einen Planungsvorschlag für die weitere Entwicklung (Beginn: 10 MW im Sekunden-Betrieb, danach im 1/2 Stunden-Betrieb evtl. mit Zuverlässigkeitstest im EVU-Betrieb, dann grössere Leistungen)

Diese Studie zeigt:

- Sowohl bei den Pulsator ($\hat{=}$ Tokamak)- als auch bei den Stellarator-Versuchsapparaturen kann der MHD-Generator teilweise zu einer Verringerung des Aufwandes und der Kosten für die Energieversorgung, teilweise zu einer Ausweitung der Experimentiermöglichkeiten führen, die durch die jetzt vorhandene Energieversorgung begrenzt werden.
- In der öffentlichen und industriellen Energieversorgung kann der MHD-Generator zu einer Verringerung der Reservehaltungskosten führen.
Dies wird an drei einfachen Beispielen erläutert:

1. Beispiel: Ein EVU deckt die Sofortreserve durch Drosselung der gerade in Betrieb befindlichen Anlagen um ca. 5 % der Nennleistung. Zur Dauerreserve hat es in ausreichendem Masse Wasserkraftanlagen zur Verfügung, die in $1,5 \div 2,0$ min auf Vollast gebracht werden können. Die Sofortreserveleistung ist also etwa zum spez. Preis eines konventionellen Dampfkraftwerkes von ca. 500 DM/kW installiert, die Zuwachskosten sind gering.

Der MHD-Generator kann nahezu zum halben Preis installiert werden. Die Zuwachskosten sind allerdings so hoch, dass der Installationskostenvorteil nach ca. 60 h/a aufgezehrt ist.

2. Beispiel: Ein EVU hat für Dauerreserve Gasturbinen (Anfahrzeit ≈ 5 (8) min) und Schnellstartdampfturbinen (Anfahrzeit ≈ 15 min) zur Verfügung, jedoch keine Wasserkraftanlagen. Es kann bis zu 3 min Sofortreserve kostenlos beziehen und muss für die Überbrückung der restlichen Zeit im Reservefall Energie kaufen. Für die Vorhaltung der Reserveleistung sind dann z.B. 100 DM/kWa zu zahlen, im Bezugsfall beträgt der Arbeitspreis z.B. $0,05 \text{ DM/kWh}_{el}$.

Bei MHD-Stromerzeugung sind die Gesamtkosten unterhalb einer Benutzungsdauer von ca. 95 h/a geringer (bei 50 h/a z.B. 25%).

3. Beispiel: Ein EVU bezahlt für Vorhaltung und Lieferung von Reserveleistung $2,3 \div 3,2$ Pf/kWh so, als ob es die nur selten wirklich bezogene Leistung das ganze Jahr hindurch bezogen hätte.

Bei Einsatz eines MHD-Generators liegen die jährlichen Einsparungen in diesem Fall in der Grössenordnung der Hälfte der Installationskosten des MHD-Generators.

- Wenn schon MHD-Generatoren installiert sind, dann können sie auch zum Abfahren steiler Leistungsanstiege verwendet werden (z.B. bei Industriebetrieben mit stossartigem Leistungsbedarf).

I N H A L T

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. EINSATZMÖGLICHKEITEN	1
2.1 Kennzeichnende Eigenschaften des MHD-Generators ...	1
2.2 Anforderungen an den Stromerzeuger	2
2.2.1 Energieversorgung von Fusionsexperimenten	3
2.2.2 Öffentliche und industrielle Energieversorgung	3
2.3 Schlussfolgerungen	6
3. STROMERZEUGUNGSKOSTEN	7
3.1 Anlagekosten	7
3.1.1 Brennsystem	9
3.1.2 MHD-Generatorkanal	10
3.1.3 Supraleitender Magnet	11
3.1.4 Stromwandler	13
3.1.5 Abgasanlage	14
3.1.6 Kraftwerksgebäude und -ausrüstung	16
3.1.7 Gesamtanlagekosten	17
3.2 Gesamtkosten für die Stromerzeugung	18
4. SPEZIELLE ANWENDUNGSFÄLLE	20
4.1 Energieversorgung von Fusionsexperimenten	20
4.1.1 Energieversorgung des Magneten am "Pulsator"	21
4.1.2 Energieversorgung des Transformators für "Wendelstein W VII"	23
4.2 Sofortreserve in der Stromerzeugung	24
4.2.1 Bemerkungen zur Reservehaltung	24
4.2.2 Bisherige Möglichkeiten zur Bereitstellung von Sofortreserve	26
4.2.3 Der MHD-Generator als Sofortreserveaggregat	28
4.3 Der MHD-Generator als Regelglied im Netz	32
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN	33
6. PLANUNG FÜR DIE WEITERE ENTWICKLUNG	33
7. SCHRIFTTUM/QUELLENANGABE	36

1. EINLEITUNG

Über die Anwendungsmöglichkeiten von Verbrennungs-MHD-Generatoren liegt eine Ausarbeitung der Entwicklungsgemeinschaft IPP/M.A.N. /1/ vom August 1969 vor. Die seither im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten gestatten es jetzt, eine Reihe der darin angegebenen Fälle zu präzisieren. Auf diese Weise ergibt sich ein genaueres Bild darüber, inwieweit begründete Aussicht besteht, die Ergebnisse der bisherigen und zukünftigen Arbeiten auf diesem Gebiet technisch-wirtschaftlich zu nutzen.

Die vorliegende Studie bezieht sich auf einen Generatortyp, der durch folgende Merkmale charakterisiert ist: Verbrennung von Kerosen mit flüssigem Sauerstoff, Generatorkanal mit nur zwei Stromanschlüssen, Magnet mit supraleitenden Spulen, keine Ausnutzung der im Abgas noch enthaltenen Energie zur Stromerzeugung.

2. EINSATZMÖGLICHKEITEN

Zunächst wird der Einsatz des Generators in der öffentlichen und industriellen Stromerzeugung sowie zur Energieversorgung von Fusionsexperimenten nur im Hinblick auf die technischen Möglichkeiten betrachtet. Die Eignung eines Stromerzeuger-Systems zu einer bestimmten Verwendung ergibt sich aus der Gegenüberstellung der Eigenschaften des Stromerzeugers einerseits und der Anforderungen an den Stromerzeuger andererseits.

2.1 Kennzeichnende Eigenschaften des MHD-Generators

Im hier behandelten MHD-Generator wird Gleichstrom erzeugt. Die Höhe der maximalen elektrischen Leistung ist bislang nur durch die technische Entwicklung begrenzt, nicht jedoch durch das physikalische Prinzip. Die Aufteilung der Leistung in Strom und Spannung ist in weiten Bereichen variabel; sie ist abhängig von der Kanalgeometrie und von der Anordnung der Stromanschlüsse, so dass eine Anpassung an einen Verbraucher auch dann noch möglich ist, wenn der Innenraum des Magneten nicht mehr verändert werden kann.

Das System enthält keine Turbomaschinen (Verdichter oder Gasturbinen), mithin also keine dynamisch bzw. dynamisch und thermisch hoch beanspruchten Bauteile, keine Lager, keine Schmierölversorgung, keine berührungsfreien Dichtungen. Die Anlage ist deshalb robust, die zu erwartende Betriebssicherheit ist gross, der Wartungsaufwand ist gering und die Revisionsabstände sind gross. Die mit dem Plasma in Berührung kommenden Bauteile - Brennkammer, Kanal, Diffusor - sind leicht zugänglich. Der Raumbedarf pro abgegebene elektrische Leistungseinheit ist gering. Es erscheint sogar möglich, die gesamte Anlage komplett auf eine Grundplatte zu montieren und sie so auf Fahrzeuge zu verladen und zu transportieren.

Der Generator kann etwa 0,3 - 0,5 sec nach dem Start die volle Leistung abgeben, wenn der Magnet vorher bereits supraleitend ist; der Magnet muss also dauernd in Betrieb sein. Schnelle Änderungen der Leistungsabgabe bei konstanter Spannung - also auch ein bestimmter Verlauf des Leistungsanstieges von Leerlauf auf Vollast - sind durch Steuerung der Saatmittelzugabe erreichbar. Bei langsameren Laständerungen kann sowohl der Durchsatz an Brennstoff und Oxydator als auch die Lage der Stromanschlüsse verändert werden. Gegen Laststösse - im Extremfall das kurzzeitige Auftreten von Leerlauf oder Kurzschluss - ist der Generator unempfindlich, da dadurch nur der Zustand des strömenden Gases beeinflusst wird, nicht jedoch die Bewegung grosser drehender Massen, wie es zum Beispiel bei Turbomaschinen der Fall ist.

2.2 Anforderungen an den Stromerzeuger

Zur Erfassung der Anforderungen, die von potentiellen Betreibern an den MHD-Generator gestellt werden, sind eingehende Recherchen im Bereich der öffentlichen und industriellen Stromerzeugung und der Energieversorgung von Experimenten in der Fusionsforschung angestellt worden.

2.2.1 Energieversorgung von Fusionsexperimenten

Die im Rahmen der Fusionsforschung durchzuführenden Experimente benötigen hauptsächlich Gleichstrom. Charakteristisch für den Energiebedarf von Versuchsanordnungen, die zur Zeit geplant werden, sind Leistungen bis zu einer Grössenordnung von 100 MW bei Betriebszeiten bis zu 10 sec. So wird für das Pulsator-Projekt des IPP zur Versorgung des Magneten eine Leistung von etwa 40 MW (in der nächsten Ausbaustufe von 100 bis etwa 400 MW) im Sekundenbereich benötigt. Der Betrieb des Stellarators W VII im IPP wird eine Leistung von 10 - 30 MW für die Dauer von etwa 10 sec erfordern (siehe hierzu /2/ und Kapitel 4.1). In beiden Versuchsanordnungen wird ausserdem die Einhaltung bestimmter zeitlicher Gradienten für Strom und Spannung verlangt. Es ist zu erwarten, dass der Leistungsbedarf der nächsten Generation von Fusionsexperimenten erheblich höher sein wird.

Die Entnahme der genannten Leistungsstösse aus dem öffentlichen Netz würde unzulässig hohe Spannungsschwankungen verursachen. Zur Eigenversorgung ist bisher die Verwendung von Stossumformern kombiniert mit Kondensatorbatterien vorgesehen. Die notwendigerweise ortsfeste Errichtung der Stossumformer verlangt entweder, dass Kondensatorbatterie und Experiment nahe am Generator aufgebaut werden, oder sie bedingt einen hohen Aufwand für die Installation der elektrischen Leitungen.

2.2.2 Öffentliche und industrielle Energieversorgung

Sowohl bei Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) als auch bei industriellen Eigenerzeugern ist das Interesse an der Entwicklung des Verbrennungs-MHD-Generators gross. Die Gründe für dieses Interesse sind dabei allerdings unterschiedlich, was im wesentlichen auf den stark voneinander abweichenden energiepolitischen Bedingungen beruht, unter denen die einzelnen Unternehmen arbeiten. Diese energiepolitischen Bedingungen sind hauptsächlich durch die Grösse des Unternehmens und die Verträge mit anderen Stromerzeugern gegeben.

Besonderer Bedarf besteht an der Bereitstellung von Reserveleistung für den Störfall, ein Problem, dessen Bedeutung mit der Steigerung der Einheitsleistung der Kraftwerksblöcke weiter zunimmt. Eine solche Sofortreserve (max. etwa 80 - 100 MW) wird jeweils nur so lange benötigt, bis andere Aggregate hochgefahren worden sind, also für Zeiträume von 90 sec bis zu 10 min. Die Bedingungen, zu denen eine solche Sofortreserve aus dem Verbundnetz oder von einer Reserveleistung vorhaltenden EVU bezogen werden kann, sind entsprechend den jeweiligen Verträgen ausserordentlich vielfältig. So gibt es Verträge, nach denen die für die Dauer weniger Minuten entnommene Reserveleistung kostenlos ist, weil nur für den maximalen über 1/2 Stunde gemittelten Leistungsbezug pro Jahr ein bestimmter Leistungspreis von z.B. 30 DM/kW gezahlt werden muss. Möglich ist auch, dass die Sofortreserveleistung kostenlos bezogen wird, dass sie aber am nächsten Tag zur selben Zeit unter denselben Lastbedingungen wieder in das Netz zurückgeliefert werden muss. Weiterhin gibt es Fälle, in denen für die maximale über 3 Minuten gemittelte Leistung pro Jahr ein Leistungspreis von 150 DM/kW bezahlt werden muss. Andere Tarife sehen vor, dass ein Arbeitspreis von z.B. 2,5 Dpfg/kWh über das ganze Jahr hinweg dafür gezahlt werden muss, dass nur einigemal im Verlauf des Jahres eine bestimmte Leistung bezogen wird. Würde diese Leistung 10 MW betragen, dann wären dafür also fast $2,2 \cdot 10^6$ DM/a zu zahlen. Die Eigenerzeugung solcher Reservelasten ist dann interessant, wenn sie zu Kosten erfolgen kann, die erheblich unter denen liegen, die bei Fremdbezug entstehen.

Es ist jedoch auch zu beachten, dass die Höhe der beziehbaren Leistung durch technische Gegebenheiten begrenzt ist. Der durch eine plötzliche Leistungsentnahme im Netz auftretende Frequenzeinbruch darf ein bestimmtes Mass nicht überschreiten, ein Gesichtspunkt, der in Regionen mit einem schwachen Netz eine wesentliche Rolle spielt. Ausserdem ist die Höhe der von einer Leitung übertragbaren elektrischen Leistung aufgrund der Erwärmung durch die ohm'schen Verluste begrenzt.

Zusätzlich zu der Reserveleistung, die sofort verfügbar sein muss (Sofortreserve), muss auch eine Leistungsreserve für längere Zeiträume - zum Beispiel zur Überbrückung des Maschinenausfalls bei kleineren Reparaturen oder bei Revisionen - zur Verfügung stehen (Dauerreserve). Der Leistungsbereich dieser Dauerreserve liegt bei 1 - 80 MW, die Betriebszeit bei durchschnittlich 1 - 2 Tagen pro Monat. Zur Deckung dieses Bedarfes werden häufig auch Spitzenlastanlagen herangezogen.

Seitens einiger EVU wurde der Wunsch nach Anlagen geäußert, die zur Deckung sowohl der Sofortreserve als auch der Dauerreserve und der Spitzenlast verwendet werden können. Darüberhinaus besteht Interesse daran, einen MHD-Generator im Grundlastbetrieb als Vorschaltanlage zu einem konventionellen Dampfkraftwerk zur Verbesserung des spezifischen Wärmeverbrauchs einzusetzen.

Bei den hier gemachten Leistungsangaben ist zu beachten, dass sie etwa für Anfang bis Mitte des Jahres 1971 gelten. Bei der Planung der weiteren Entwicklung von MHD-Generatoren ist auch der zu erwartende Anstieg des Energiebedarfes von etwa 7 % pro Jahr (Verdoppelung des Energiebedarfes also etwa alle 10 Jahre) zu berücksichtigen.

Im öffentlichen und im industriellen Bereich wird fast ausschliesslich Wechselstrom erzeugt. Da jedoch im Bereich der Industrie ein erheblicher Bedarf an Gleichstrom besteht - z.B. bei den Elektrolyse-Verfahren zur Gewinnung bzw. Reinigung einiger Nichteisenmetalle, oder auch bei der Acetylen-Gewinnung im Lichtbogenofen - sind umfangreiche Gleichrichteranlagen notwendig. Die Verwendung eines Gleichstrom erzeugenden Generators - also des MHD-Generators - wäre hier denkbar. Darüberhinaus könnte es eine weitere Verbreitung der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ebenfalls interessant werden lassen, Gleichstromgeneratoren in grossem Masse einzusetzen, um die Kosten für die Umrichtung zu sparen.

2.3 Schlussfolgerungen

Das hier diskutierte MHD-Generator-System stellt im Gesamtbereich möglicher MHD-Kraftwerks-Systeme - also einschliesslich der Kombination mit konventionellen Stromerzeugern - nur einen Grenzfall dar. Es ist das in den Anlagekosten billigste, in den Betriebskosten jedoch teuerste System. Aus diesem Grunde eignet es sich vornehmlich für diejenigen Anwendungsfälle, die einen nur kurzzeitigen Betrieb (bis max. etwa 100 Benutzungsstunden pro Jahr) erfordern. Es ist dies einmal die Energieversorgung von Fusionsexperimenten und zum anderen die Bereitstellung von Sofortreserve in der Stromversorgung. Die in beiden Fällen geforderten Werte für Leistung und Betriebsdauer lassen darüberhinaus einen wünschenswerten Verlauf der zukünftigen Entwicklung dieses Generator-Typs erkennen.

Der Anfang 1969 der Planung zugrunde gelegte 10 MW-10 sec-Generator, für den am Ende des 1. Projektabschnittes baureife Unterlagen vorliegen sollen, entspricht etwa jenen Generatoren, die zur Energieversorgung von Fusionsexperimenten geeignet sind. Die Steigerung der Leistung auf zunächst 30 MW und anschliessend auf 100 MW würde dem Bedarf entsprechen. Die Erhöhung der Leistung von 10 auf 80 - 100 MW erfordert dabei nur eine Verdoppelung der linearen Abmessungen des Magnetinnenraumes in jeder Richtung, eine Massnahme, bei der nach Auskunft eines Herstellers alle Bauprinzipien des für den 10 MW-Generator gebauten Magneten beibehalten werden können.

Damit ist ein Leistungsbereich überstrichen, der auch für die öffentliche und industrielle Energieversorgung interessant ist. Um eine Betriebszeit von mehr als 10 sec erreichen zu können - etwa bis zu 30 min pro Tag, was bei 200 Arbeitstagen im Jahr einer Benutzungsstundenzahl von 100 h/a entspricht - wären parallel zum Bau des 10 MW-10 sec-Generators zusätzlich zwei Problemkreise zu bearbeiten: die Entwicklung geeigneter MHD-Kanäle und die Abgasbehandlung. Während die Kanäle beim 10 sec-Betrieb noch nicht gekühlt werden müssen, erfordert eine jeweilige Betriebszeit von mehr als 10 sec ein Kühlsystem für den

Kanal. Bei der Abgasbehandlung ist im wesentlichen das Problem der Reinigung und das der Überführung der Abwärme an die Umgebung zu lösen. Es müsste auch geprüft werden, ob das Abgas einer einem Kraftwerk zugeordneten MHD-Sofortreserve-Anlage nicht direkt in den Feuerraum eines in Betrieb befindlichen Dampfkessels geführt werden kann.

Von der technischen Seite her besteht für die Entwicklung eines Gerätes wie des Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generators also eindeutig ein Bedarf. Um dieses System in wirtschaftlicher Hinsicht mit konkurrierenden Energieversorgungsanlagen vergleichen zu können, muss die Frage nach den Kosten für die Installation und den Betrieb beantwortet werden.

3. STROMERZEUGUNGSKOSTEN

3.1 Anlagekosten

Das gesamte MHD-Kraftwerk setzt sich aus den folgenden, in Bild 1 schematisch dargestellten Baugruppen zusammen:

1. Brennsystem
2. MHD-Generatorkanal
3. Supraleitender Magnet
4. Stromwandler (Wechselrichter)
5. Abgasanlage
6. Kraftwerksgebäude und -ausrüstung

Die Ermittlung der Anlagekosten basiert auf den tatsächlich beim Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, und bei der M.A.N. AG, München, während der bisherigen Entwicklungsarbeiten angefallenen Kosten sowie auf den Angaben der Firmen Siemens, BBC und M.A.N., Nürnberg (Kraftwerksbau), über die Kosten für supraleitende Magnete, Stromwandler, Kraftwerksgebäude und -ausrüstung.

Zur Durchführung der Kalkulation war es notwendig, Daten über die Leistungsdichte im Generatorkanal und im Innenraum des Magneten sowie über den Wirkungsgrad der Anlage vorzugeben. Aufgrund der bisherigen theoretischen und experimentellen Arbeiten wurden für die 10 MW-Anlage eine Leistungsdichte im Generatorkanal von $n_{VK} = 100 \text{ MW/m}^3$ und im Magnetinnenraum von $n_{VM} = 50 \text{ MW/m}^3$ zugrundegelegt (Bild 2), während der elektrische Wirkungsgrad der Anlage - definiert als das Verhältnis von Generatorleistung zu thermischer Leistung des Brennsystems - zu $\eta_{el} = 10 \%$ angesetzt wurde. Nach dem gegenwärtigen Stand der Arbeiten scheinen diese Werte mit einiger Sicherheit erreicht werden zu können. Von diesen Werten ausgehend wurden die Anlagekosten im Bereich von 10 - 100 MW für zwei verschiedene Fälle berechnet. Zunächst wurde angenommen, dass die für 10 MW angesetzten Daten im Bereich bis 100 MW unverändert bleiben; es wurde also die Abnahme der Verluste bei grösser werdender Anlage nicht berücksichtigt (Linien a in Bild 2). Die sich in diesem Fall ergebenden Kosten können also als Maximalkosten aufgefasst werden. Berücksichtigt man die Verringerung der Verluste mit zunehmender Anlagengrösse, dann sind Werte für Leistungsdichte und Wirkungsgrad zu erwarten, wie sie durch die mit b bezeichneten Linien in Bild 2 wiedergegeben werden. Die Verringerung der Verluste resultiert dabei hauptsächlich daraus, dass die Verluste dem dann kleiner werdenden Verhältnis von Oberfläche zu Volumen in Brennkammer und MHD-Kanal etwa proportional sind. Die sich auf der Basis der Kurven b ergebenden Kosten können als wahrscheinliche Kosten bezeichnet werden.

Die Kalkulationsgrundlagen für die einzelnen Baugruppen werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Ausgangspunkt ist jeweils die 10 MW-10 sec-Anlage. Von diesem sowohl technisch als auch kalkulatorisch gut erfassten System wurde mit Hilfe von Erfahrungswerten, technischen und preislichen Überschlagsrechnungen sowie Vergleichen auf andere Leistungsbereiche und längere maximale Einsatzzeiten extrapoliert.

3.1.1 Brennsystem

Das Brennsystem umfasst die Brennkammer, das Zündsystem, die Brennstoffversorgung - bestehend aus Tankanlage, gegebenenfalls Treibstoffaufbereitungsanlage und Fördersystem - sowie Regelungs- und Überwachungseinrichtungen. Mit Hilfe von Bild 3 lassen sich die Herstellungskosten des Brennsystems bestimmen. Das Diagramm auf der linken Seite zeigt die Abhängigkeit der in das Brennsystem zu installierenden thermischen Leistung von der geforderten elektrischen Leistung des MHD-Generators für die in Bild 2 dargestellten Wirkungsgradverläufe a und b. Das Diagramm auf der rechten Seite gibt die Herstellungskosten des Brennsystems abhängig von dessen thermischer Leistung an. Dabei wird zwischen einer Betriebsdauer von $t \leq 0,5$ min und Betriebszeiten, die darüber hinausgehen, unterschieden. Ausgangspunkt für die Bestimmung dieser Kostenkurven war die Kalkulation des Brennsystems für den 10 MW-10 sec-Generator. Bei dieser Kostenrechnung wurden folgende Merkmale des Systems vorausgesetzt:

- a) Kurze Brenndauer ($t \leq 0,5$ min). Die Förderung der Treibstoffe erfolgt ausschliesslich mittels Druckgas.
- b) Die Vorbereitungen für den Betrieb dauern längere Zeit (etwa 5 min nach Einstellung des Fahrdruckes).
- c) Als Oxydator wird flüssiger Sauerstoff (LOX) verwendet (es werden Armaturen und Tanks für kryogene Flüssigkeiten benötigt).

An den sich ergebenden Herstellungskosten in Höhe von $0,45 \cdot 10^6$ DM haben die einzelnen Untergruppen folgende Anteile:

Tankanlage einschliesslich Treibstoffaufbereitungsanlage ..	22,4 %
Fördersystem	41,8 %
Zündsystem	7,6 %
Brennkammer (mit Schubbock)	16,0 %
Steuer- und Überwachungseinrichtung	12,2 %

Die Extrapolation der Brennsystemkosten in den Bereich grösse-
rer Leistungen erfolgte für Brennkammer und Zündsystem sowie
Fördersystem und Tankanlage aufgrund der Erfahrung, dass der
Aufwand proportional zu Material und Bearbeitungszeit (die beide
in erster Näherung der Oberfläche direkt proportional sind) an-
steigt. Unter der Annahme konstanter Betriebsbedingungen - gleiche
Leistungsdichte in der Brennkammer, gleiche Fördergeschwindig-
keit der Treibstoffe - ergeben sich damit Kosten, die der mit
 $2/3$ potenzierten thermischen Leistung proportional sind. Die
Kosten für die Steuer- und Überwachungseinrichtungen ändern
sich nur geringfügig mit steigender Leistung, da die Anzahl der
Elemente praktisch konstant bleibt. Nimmt man an, dass nur 10 %
dieser Kosten proportional $N_{th}^{2/3}$ sind, dann lautet die Extra-
polationsformel

$$K_{BS} = N_{th}^{2/3} (k_B + 0,1 k_{RÜ}) + K_{RÜ} ; \quad (1)$$

k_B sind hierin die spezifischen Kosten des Brennsystems ohne
Regelungs- und Überwachungseinrichtungen, während $k_{RÜ}$ die
spezifischen und $K_{RÜ}$ die fixen Kosten der Regelungs- und Über-
wachungseinrichtungen sind.

Bei Einsatzzeiten $t > 0,5$ min müssen an der gesamten Oberfläche
der Brennkammer Kühlkanäle vorgesehen werden und die Brennstoff-
Förderung muss von Druckgas auf Förderpumpen umgestellt werden.
Die sich ergebende Kostensteigerung (Bild 3, rechte Seite,
 $t > 0,5$ min) wurde durch Vergleiche von Bauteilen des 10 MW-
10 sec-Generators mit und ohne Wasserkühlung (Düsenhals) und Fest-
stellung der Kosten im Handel befindlicher Förderanlagen er-
mittelt.

3.1.2 MHD-Generatorkanal

Die Bestimmung der Herstellungskosten von Kanälen für den Ver-
brennungs-MHD-Generator beruht auf folgender vereinfachender
Überlegung: Zur Erzeugung einer vorgegebenen elektrischen Lei-
stung ist ein bestimmtes Kanalvolumen und damit auch eine be-
stimmte Kanaloberfläche notwendig. Näherungsweise ist die Kanal-
oberfläche ein Mass für die Menge des benötigten Materials, der
zu bearbeitenden Flächen sowie des Montageaufwandes. Die Kanal-
oberfläche F_\emptyset soll deshalb als ein direktes Mass für die Her-

stellungskosten K_K angesehen werden, die sich dann mit

$$K_K = k_K \cdot F_{\emptyset} \quad (2)$$

ergeben, wenn k_K die spezifischen Kanalkosten pro m^2 Oberfläche sind.

Das Diagramm auf der linken Seite von Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Kanaloberfläche von der elektrischen Leistung N_{el} für die in Bild 2 angegebenen Werte der Leistungsdichte n_{VK} im Kanal. Dabei wurde - entsprechend einer Abschätzung - davon ausgegangen, dass die Kanaloberfläche proportional zur Wurzel der elektrischen Leistung ansteigt.

Mit dem Diagramm auf der rechten Seite von Bild 4 ist der Zusammenhang zwischen Kanaloberfläche und Herstellungskosten gegeben. Die spezifischen Kanalkosten sind nach den bisher beim Bau des Slant-Wall-Kanals gewonnenen Erfahrungen abgeschätzt worden. Bei dieser Abschätzung wurde berücksichtigt, dass die Kanalkonstruktion im Falle einer technischen Anwendung des Generators einfacher sein kann, als sie es für den Experimentierbetrieb sein muss. So wurde für den Heat-Sink-Kanal - also für Betriebszeiten $t < 0,5$ min (obere Kurve) - ein Preis pro m^2 Oberfläche von $45 \cdot 10^3$ DM/ m^2 angesetzt und es wurde angenommen, dass sich dieser Preis auf $100 \cdot 10^3$ DM/ m^2 erhöht, wenn man zu gekühlten Kanälen für eine Betriebszeit von $t > 0,5$ min übergeht. Es ist damit zu rechnen, dass sich diese Preise im Laufe der weiteren Entwicklung noch ermässigen werden.

3.1.3 Supraleitender Magnet

Das gesamte Magnetsystem besteht aus den der Kanalform angepassten supraleitenden Wicklungen, dem Kryogefäss mit den mechanischen Abstützungen, der Stromversorgung und der Heliumverflüssigungsanlage.

Im Diagramm auf der linken Seite von Bild 5 ist der mit der Leistungsdichte im Magnetinnenraum n_{VM} nach Bild 2 gegebene

Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung N_{el} und dem dazu benötigten nutzbaren Magnetvolumen dargestellt. Das Diagramm auf der rechten Seite von Bild 5 zeigt den Verlauf der Herstellungskosten des Magneten in Abhängigkeit vom nutzbaren Magnetvolumen. Der Diskussion über Magnetkosten liegen folgende Annahmen zugrunde:

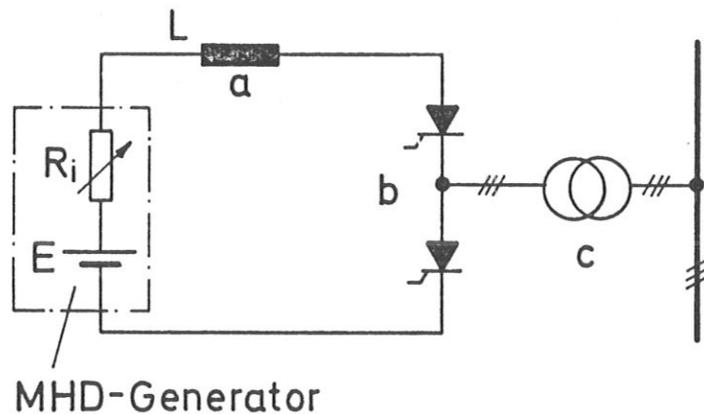
- Der Magnet sei ein Sattelspulenmagnet.
- Die magnetische Induktion sei nicht grösser als $B_0 = 5$ Tesla, auf jeden Fall soll sie es erlauben, mit NbTi-Leitermaterial auszukommen.
- Die Homogenität des Magnetfeldes sei nicht exzessiv hoch. Abweichungen von $\pm 5\%$ seien erlaubt.
- Maximale Aufbauzeit des Feldes etwa 2 Stunden.
- Das Leitermaterial sei nur teilstabilisiert, so dass das Magnetvolumen klein gehalten werden kann.
- Bis zu einem nutzbaren Magnetvolumen von etwa 5 m^3 sei das Innenvolumen zylindrisch, da in diesem Bereich die höheren Kosten einer komplizierteren (pyramidenförmigen oder konischen) Konstruktion die niedrigeren Leiterkosten überkompensieren.
- Das Kryogefäss sei topologisch einfach (keine komplizierten Durchbrechungen), also im wesentlichen von zylindrischen Innen- und Aussenwänden und ebenen Stirnwänden begrenzt.
- Die Kälteanlage stehe in nächster Nähe des Magneten. Ihre garantierte ununterbrochene Betriebszeit liege etwa bei $1/2$ Jahr.
- Maximale Abkühlzeit: 100 Stunden.
- Aussenmasse und Gewichte der Bauteile sowie Grösse des Streufeldes unterliegen keinen Beschränkungen.

Die Herstellungskosten für Magnete konnten trotz vielfältiger Informationen bisher nur grob abgeschätzt werden. Charakteristisch für die bei dem gegenwärtigen Entwicklungsstand naturgemäss noch herrschende Unsicherheit ist der recht erhebliche

Streubereich der in Erfahrung gebrachten Kosten. Die an der oberen Grenze dieses Bereiches liegenden Daten (nach /3/ und /4/) - und diese wurden hier verwendet - sind etwa um den Faktor 2 bis 3 grösser als diejenigen, die sich aus einer Kalkulation nach /5/ ergeben. Verlässlichere Angaben sollten nach Fertigstellung einer bei der Siemens AG in Auftrag gegebenen Projektstudie möglich sein.

3.1.4 Stromwandler

Für den Fall, dass Wechselstrom benötigt wird - also zum Beispiel bei Einspeisung in das Netz - , muss dem MHD-Generator eine Wechselrichteranlage nachgeschaltet werden. Das Schaltbild (siehe Skizze) dieser Anlage lässt die wesentlichen Bestandteile erkennen:



die Glättungsdrossel a, den Wandler b (eine geeignete Reihen- und Parallelschaltung von Thyristoren) und den Transformator c. Es wird vorausgesetzt, dass der Wechselrichter vom Netz geführt wird.

Die in Bild 6 abhängig von der elektrischen Leistung dargestellten Kosten beruhen auf Angaben lt. telefonischem Angebot von BBC. Sie umfassen die Kosten für die gesamte Wechselrichteranlage einschliesslich Montage und Inbetriebnahme. Nach Angabe von BBC ist damit zu rechnen, dass diese Kosten, die für Anfang 1971 gelten, bis zum Jahre 1975 um etwa 20 - 25 % aufgrund der technischen Weiterentwicklung sinken werden.

Auch von der Firma Siemens liegt ein Kurzangebot vor, in dem die angegebenen Kosten - sie gelten für Ende Februar 1971 - für kleine Leistungen um etwa 10 %, für grosse Leistungen bis zu 40 % höher sind als die des BBC-Angebotes. Die Verwendung der von BBC genannten Zahlen erscheint auch bei vorsichtiger Betrachtung gerechtfertigt, da der kommerzielle Einsatz von MHD-Generatoren dem Jahre 1975 - für das die oben genannten Preis-minderungen gelten - sicher näher liegen wird als dem Jahre 1971.

3.1.5 Abgasanlage

Für das hier betrachtete MHD-Generatorsystem gilt die Voraussetzung, dass die im Abgas enthaltene Wärme nicht ausgenutzt wird. Während das Abgas bei sehr kurzen Betriebszeiten in die Umgebung geblasen werden kann, ist bei längeren Einsatzzeiten ein erheblicher technischer Aufwand für die Abgasbehandlung notwendig, um die Umgebung vor unzulässig grosser Beeinträchtigung durch Schmutz und Lärm zu schützen. Darüberhinaus erfordert auch die Abfuhr der Abwärmemenge wegen der Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Kühlwassermenge mit zunehmender Betriebsdauer einen wachsenden Aufwand. Die Herstellungskosten der Abgasanlage, die im Bild 7 abhängig von der thermischen Leistung N_{th} des Brennsystems (Diagramm auf der rechten Seite) und über den Wirkungsgrad damit auch abhängig von der Generatorleistung N_{el} (Diagramm auf der linken Seite) dargestellt sind, werden deshalb sehr stark von der jeweils vorgesehenen Betriebsdauer beeinflusst.

Bei einer jeweiligen Betriebsdauer von $t < 0,5$ min und seltenem Betrieb könnte das Abgas über einen - möglicherweise schon vorhandenen - Schornstein ungereinigt abgeblasen werden, so dass nur ein Diffusor mit Wassereinsprühung und eine Abgasrohrleitung erforderlich sind.

Bei einer jeweiligen Betriebszeit im Bereich von $0,5 \text{ min} < t < 5 \text{ min}$ muss das Abgas gereinigt werden. Dabei ist es am einfachsten, das Abgas durch Einsprühen von Wasser zu waschen, wobei sich die hygroskopischen Kaliumverbindungen lösen und das Gas unter den Kondensationspunkt von Wasserdampf abgekühlt wird. In einem dem Schornstein vorgeschalteten Zyklon wird das Wasser mit den darin gelösten Kaliumverbindungen abgeschieden und vor dem Ableiten in die Kanalisation chemisch neutralisiert bzw. bis auf ein erträgliches Mass verdünnt. Die grosse Verlustwärme - sie beträgt etwa das neunfache der Generatorleistung - und die Forderung, das Abgas auf unter 100°C abzukühlen, führen zu einem sehr hohen Kühlwasserverbrauch. Überschlagsrechnungen ergaben, dass bei Betriebszeiten bis zu etwa 5 min der Aufwand für die Kühlwasserversorgung noch vertretbar ist.

Bei Einsatzzeiten $5 \text{ min} < t < 30 \text{ min}$ muss die Wärme durch Verdampfen des Wassers abgeführt werden. Zu diesem Zweck ist ein Wärmetauscher im Abgasstrahl vorgesehen, der das vom Diffusor kommende Gas-Wasser-Gemisch auf unter 100°C abkühlt. Die benötigte Wassermenge wird dabei auf etwa $1/10$ derjenigen Menge reduziert, die bei dem zuvor beschriebenen Verfahren benötigt wird.

Die Herstellungskosten für die je nach der Betriebsdauer unterschiedlichen Abgasanlagen wurden durch überschlägige Berechnungen und durch Vergleiche mit ähnlichen im Kraftwerksbau verwendeten Anlageteilen (nach Angaben von M.A.N., Nürnberg) abgeschätzt. Der Anstieg der Kosten K_{AG} mit steigender Leistung wurde ebenfalls analog der im Kraftwerksbau üblichen Weise mit

$$K_{AG} = N_{th}^z \cdot k_{AG} \quad (3)$$

berechnet. Darin sind k_{AG} die spezifischen Anlagekosten der Abgasanlage, während der Exponent $z < 1$ Ausdruck der Kostendegression mit steigender Leistung ist. Es wurde $z = 0,768$ gesetzt, ein Wert, der für kohlegefeuerte Dampfkraftwerke verwendet wird.

3.1.6 Kraftwerksgebäude und -ausrüstung

Die Herstellungskosten für das Kraftwerksgebäude setzen sich aus den Gebäudekosten sowie den Anschluss-, Installations- und Schaltanlagekosten zusammen, umfassen also die Kosten aller für ein Kraftwerk benötigten Anlagen, sofern sie nicht in den vorher behandelten Baugruppen bereits enthalten sind. In Bild 8 sind diese Kosten K_{GA} abhängig von der installierten elektrischen Leistung N_{el} unter Verwendung der von M.A.N., Nürnberg, Abt. Kraftwerksbau, angegebenen Beziehung

$$K_{GA} = N_{el}^{0,95} (k_G + k_A) \quad (4)$$

aufgetragen worden; darin sind k_G die spezifischen Gebäudekosten und k_A die spezifischen Kosten für die Ausrüstung. Die durch den Exponenten 0,95 ausgedrückte Kostendegression mit steigender Leistung ist nur sehr schwach. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt zuverlässigere Angaben noch nicht verfügbar sind, ist dieser aus der Kalkulation von Dampfkraftwerken stammende Wert vorsichtshalber beibehalten worden. Grobe Abschätzungen weisen jedoch darauf hin, dass die Kostendegression bei MHD-Anlagen stärker sein wird.

Wegen der ausserordentlich kompakten Bauweise und des geringen Bedarfes an Hilfsaggregaten wurde angenommen, dass im Falle der für eine Betriebszeit von $5 < t < 30$ min ausgelegten Anlage $100 \text{ m}^3/\text{MW}$ umbauten Raumes benötigt werden, ein Wert, der demjenigen entspricht, den man bei Fluggasturbinenkraftwerken erreicht. So wird zum Beispiel für das Kraftwerk Emden /6/ ein Raumbedarf von $159 \text{ m}^3/\text{MW}$ angegeben, wovon etwa ein Drittel auf die Luftansaugung (Filter, Schalldämpfer) und die drehenden elektrischen Maschinen entfallen, Anlageteile also, die bei dem hier betrachteten MHD-System nicht vorhanden sind. Bei besonders

raumsparenden Anordnungen /7/ kommen Fluggasturbinenkraftwerke mit einem Raumbedarf von nur $90 \text{ m}^3/\text{MW}$ aus. Die Annahme des Wertes von $100 \text{ m}^3/\text{MW}$ erscheint demnach gerechtfertigt. Weiterhin wird angenommen, dass dieser Raumbedarf bei denjenigen Anlagen, die für kürzere Betriebszeiten ausgelegt sind, wegen des geringeren Volumens der Abgasanlage kleiner ist. Im Falle der Betriebszeit von $0,5 < t < 5 \text{ min}$ wurde deshalb ein Wert von $75 \text{ m}^3/\text{MW}$ gewählt, bei $t < 0,5 \text{ min}$ ein Wert von $50 \text{ m}^3/\text{MW}$.

Nach Angaben von M.A.N., Nürnberg, ist es üblich, beim Bau von Dampfkraftwerken für die spezifischen Gebäudekosten $k_G = 120 \text{ DM}/\text{m}^3$ und für die spezifischen Ausrüstungskosten $k_A = 160 \text{ DM}/\text{m}^3$ anzusetzen. Während der Wert für k_G auch für das MHD-Kraftwerk verwendet wird, wurden die spezifischen Ausrüstungskosten in Anbetracht der kompakten Bauweise auf $k_A = 200 \text{ DM}/\text{m}^3$ erhöht.

3.1.7 Gesamtanlagekosten

Die Gesamtkosten für die Erstellung von MHD-Anlagen ergeben sich als Summe der in den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.6 erläuterten Kosten der einzelnen Baugruppen. Diese Anlagekosten sind, bezogen auf die jeweilige zu installierende elektrische Leistung, über dieser Leistung in den Bildern 9 und 10 aufgetragen. Bild 9 gilt für die in Bild 2 mit "a" bezeichneten Kurven, gibt also die Maximalkosten an, während die aus Bild 10 zu entnehmenden Kosten auf den im Bild 2 mit "b" gekennzeichneten Kurven basieren und damit die wahrscheinlichen Kosten darstellen.

Anlagen, die für eine elektrische Leistung von 10 MW und eine jeweilige Betriebsdauer von $5 < t < 30 \text{ min}$ ausgelegt sind, haben spezifische Installationskosten von $563 \text{ DM}/\text{kW}$ (einschliesslich Schornstein). Beim Übergang auf eine zu installierende elektrische Leistung von 100 MW ermässigt sich dieser Wert wenigstens auf $293 \text{ DM}/\text{kW}$ (Bild 9), wahrscheinlich jedoch auf $260 \text{ DM}/\text{kW}$ (Bild 10). Bei einer jeweiligen Betriebsdauer von $0,5 < t < 5 \text{ min}$ liegen diese Kosten um $75 \text{ DM}/\text{kW}$ (bei 10 MW) bzw. $40 \text{ DM}/\text{kW}$ (bei 100 MW) niedriger. Für den Fall, dass für die MHD-Anlage

kein Schornstein zu erstellen ist, ermässigen sich die genannten Kosten um etwa 25 DM/kW für die 10 MW-Einheit, abnehmend auf 12 DM/kW bei der 100 MW-Anlage. Bei einer jeweiligen Betriebszeit von 0,5 min - für diese Anlagen ist ein Schornstein ohnehin nicht vorgesehen - sinken die Installationskosten bei der Leistungserhöhung von 10 auf 100 MW von 393 DM/kW auf 196 DM/kW (Bild 9) bzw. 175 DM/kW (Bild 10). Wird von einer so kurzzeitig betriebenen Anlage die Abgabe von Gleichstrom verlangt, dann ermässigen sich diese Kosten um den Anteil des Stromwandlers auf 225 DM/kW für die 10 MW-Anlage bzw. 96 DM/kW (Bild 9) oder 75 DM/kW (Bild 10) für das 100 MW-System.

3.2 Gesamtkosten für die Stromerzeugung

Die bei der Stromerzeugung anfallenden Kosten setzen sich aus den arbeitsabhängigen und arbeitsunabhängigen Anteilen zusammen. Arbeitsunabhängig sind die für das Kapital zu erbringenden Zinsen, die Abschreibung, die Bedienungs- und Wartungskosten sowie die Kosten für Verluste und Leistungsbedarf im Stillstand (O_2 -Verdampfung im Tank; Leistungsbedarf der Kälteanlage des Magneten). Arbeitsabhängig sind die Kosten für die Treibstoffe und für das Kühlwasser.

Unter der Annahme eines Zinssatzes und einer Abschreibungsrate von jeweils 8 %/a sowie eines Anteils von 2 %/a für die Bedienungs-, Wartungs- und Verlustkosten ergibt sich eine Annuität von 18 %. Die arbeitsabhängigen Kosten - bezogen auf die thermische Energie des Brennsystems - liegen bei etwa 0,08 DM/kWh_{th}. Dieser Wert basiert auf einem Kerosenpreis von 150 DM/t - er wurde der M.A.N., Nürnberg, Abt. Kraftwerksbau, von der ESSO AG genannt und enthält bereits eine Steuerbelastung von 25 DM/t - und einem Preis für flüssigen Sauerstoff von 170 DM/t (nach Angabe der Linde AG). Eine Verringerung dieser Kosten erscheint kaum möglich. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Verwendung von gasförmigem Sauerstoff oder von Luft, die auf 98 %

Sauerstoffgehalt angereichert wurde, zu niedrigeren Treibstoffkosten und trotz der dann etwas höheren Anlagekosten auch zu geringeren Gesamtkosten führen könnte.

In Bild 11 sind die jährlichen Gesamtkosten abhängig von der jährlichen Benutzungsdauer für Anlagenleistungen von 20 bis 100 MW aufgetragen. Zugrundegelegt ist dabei ein MHD-Kraftwerk (einschliesslich Schornstein), das für eine jeweilige Betriebszeit von maximal 30 min geeignet ist. Die strichpunktierten Linien geben die Maximalkosten an (basierend auf den spezifischen Installationskosten von Bild 9), während die wahrscheinlichen Kosten (entsprechend Bild 10) von den ausgezogenen Linien angegeben werden. Die Anfangspunkte der Geraden auf der Ordinate sind durch die jährlich aufzubringenden fixen Kosten in Höhe von 18 % des investierten Kapitals gegeben. Die Steigung der Geraden ergibt sich aus den arbeitsabhängigen Kosten von $0,08 \text{ DM/kWh}_{\text{th}}$ und dem bei der jeweiligen Leistung geltenden Wirkungsgrad η_{el} . Bild 11 kennzeichnet das hier betrachtete MHD-Generator-System besonders deutlich. Der Anteil der arbeitsabhängigen Kosten an den Gesamtkosten für die Stromerzeugung ist ausserordentlich hoch. Bei einer 100 MW-Anlage, zum Beispiel, sind die insgesamt anfallenden Kosten bereits nach etwa 90 Benutzungsstunden doppelt so hoch wie die Festkosten. Die Untersuchung von Anwendungsmöglichkeiten für dieses System hat sich also auf den Kurzzeitbereich zu beschränken.

4. SPEZIELLE ANWENDUNGSFÄLLE

4.1 Energieversorgung von Fusionsexperimenten

Im langfristigen Forschungs- und Entwicklungsprogramm des IPP zur Entwicklung eines Fusionsreaktors wird zwischen verschiedenen Generationen von Fusionsexperimenten unterschieden. Die mit dem Jahre 1970 begonnene Generation besteht aus 4 verschiedenen Arten von Experimenten, deren Energiebedarf durch hohe Leistungen für kurze Zeit gekennzeichnet ist. Zwei dieser Experimente werden im wesentlichen aus Kondensatorbatterien versorgt werden, während die Funktionsweisen der beiden übrigen es gestatten werden, auch andere - billigere - Methoden zur Energieversorgung heranzuziehen. Es sind dies die "Pulsator"- und die "Wendelstein"-Experimente; der Betrieb des Pulsators I soll in etwa einem Jahr aufgenommen werden, der Wendelstein W VII soll in etwa drei Jahren betriebsbereit sein.

So wie Wendelstein W VII eine Weiterentwicklung von Wendelstein W II ist, werden sich auch im Rahmen der Pulsator-Experimente mehrere aufeinanderfolgende Versuchsanordnungen ergeben. Es kann mit Sicherheit gesagt werden, dass der Energiebedarf einer Folge-Versuchsanordnung den der vorhergehenden erheblich über- treffen wird.

Diese Tendenz ist auch aus der Entwicklung in der UdSSR und den USA erkennbar. So steht in Princeton (USA) für Fusionsexperimente eine Leistung von 400 MW (kurzzeitig) zur Verfügung, während die vergleichbare Leistung im IPP im Jahre 1973 erst den Wert von ca. 200 MW erreichen wird. Die kurzzeitige Bereitstellung grosser elektrischer Leistungen ist für die Fusionsforschung von wachsender Bedeutung, und es erhebt sich die Frage, auf welche Weise der Zuwachs des Energiebedarfs des IPP nach 1973 gedeckt werden soll. Für Leistungsspitzen im Millisekundenbereich werden weiterhin Kondensatorbatterien verwendet werden müssen. Für Leistungen im Sekundenbereich werden wie bisher Stossumformer zur Verfügung stehen. Hinzukommen könnten Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generatoren, mit denen der Fremdbezug elektrischer Energie und dessen Umformung durch eine dem

Experiment angepasste Eigenerzeugung ergänzt werden kann. Im folgenden wird untersucht, in welcher Weise solche MHD-Generatoren in die Energieversorgung der Pulsator- und Stellarator-Experimente integriert werden können. Beim Pulsator ist der Verbraucher ein Magnet, beim Stellarator ist ein Transformator hochzufahren.

4.1.1 Energieversorgung des Magneten am "Pulsator"

Die gewünschte Betriebsweise dieses Magneten ist aus dem im Bild 12 gezeigten Verlauf der Leistungsaufnahme über der Zeit zu ersehen. Der Magnet würde danach zunächst in der Zeit Δt bis zu einer magnetischen Induktion B_1 hochgefahren, der die Leistung $U_1 \cdot J_1 = N_1$ entspricht. Für die sogenannte "Flat-Top-Zeit" Δt_{FT} sollte er dann unter weiterer Aufwendung der Leistung N_1 auf B_1 gehalten werden. Diesem Grundimpuls würde etwa nach der halben Zeit Δt_{FT} ein Zusatzimpuls überlagert, der einen nahezu senkrechten Anstieg auf eine Induktion B_2 und damit auf die Leistung N_2 (mit $N_2 \geq 2 \cdot N_1$) haben und gleichzeitig mit dem Grundimpuls enden sollte.

Diese Betriebsweise kann mit der in Bild 13 dargestellten Schaltung realisiert werden: Der Generator A liefert der Magnetfeldspule L den Grundimpuls A für die Zeit $\Delta t + \Delta t_{FT}/2$ bei einer Spannung von z. B. 1 kV. Der anschließende Impuls C für etwa 15 msec resultiert aus der Entladung der Kondensatorbatterie C bei einer maximalen Spannung von z. B. 30 kV. Um zu verhindern, dass die Entladung über den Generator A anstatt über die Magnetfeldspule L stattfindet, muss z. B. zwischen Generator A und Spule L eine Diode in Sperrichtung (a_1) eingefügt werden. Der Impuls B wird vom Generator B bei einer Spannung von etwa 1,5 kV aufgebracht. Auch hier verhindert eine Diode in Sperrichtung (a_2) die Entladung des Kondensators über den Generator B.

Der Zweck des Experimentes stellt an den Magneten bezüglich seiner Geometrie und der magnetischen Induktion - und damit an die Leistungen und zeitlichen Leistungsänderungen - Mindestanforderungen. Diese Forderungen zu erfüllen und gleichzeitig

dabei die oben beschriebene Betriebsweise zu verwirklichen, ist mit der derzeitigen Energieversorgung des IPP nicht möglich. Aus diesem Grunde waren Kompromisse notwendig, die hauptsächlich die Betriebsweise betrafen.

Für die erste Stufe der Experimente (Pulsator I) steht ein Stossumformer mit nur 15 MJ und einer maximalen Leistung von $N_1 = 19$ MW für die Dauer einer Zeitspanne $\Delta t + \Delta t_{FT}$ als Generator A zur Verfügung. Es lässt sich also nur der Grundimpuls A verwirklichen, auf die Zusatzimpulse wird verzichtet. Im Rahmen der geplanten Versuche ist es jedoch ausserdem interessant, den Pulsator-Magneten zwar ohne diese Zusatzimpulse, dafür aber mit längerer Flat-Top-Zeit zu betreiben.

Für die nächste Entwicklungsstufe (Pulsator II) steht zusätzlich ein Stossumformer von 124 MJ mit einer maximalen Leistung von 180 MW zur Verfügung. Voraussichtlich wird auch dieser nur für den Grundimpuls A eines vergrösserten und stärkeren Magneten verwendet werden. Die Realisierung der Zusatzimpulse zunächst beim Pulsator I und später auch beim Pulsator II verlangt eine zusätzliche Erweiterung der Energieversorgung des IPP. Es ist deshalb die Frage zu untersuchen, welcher Stromumformer oder -erzeuger als Generator B eingesetzt werden sollte. Zur Auswahl stehen dazu Kondensatorbatterie, Stossumformer und Verbrennungs-MHD-Generator, Geräte also, die eine recht unterschiedliche Zeitspanne bis zur Abgabe ihrer maximalen Leistung benötigen. Bei der Kondensatorbatterie beträgt die Hochfahrzeit von Null auf Vollast ca. 0,1 msec, während Stossumformer etwa 0,6 bis 0,8 sec benötigen, eine Zeit, die sich möglicherweise noch etwas verringern lässt.

Sollte eine Kondensatorbatterie als Generator B verwendet werden, dann müsste der gesamte Impuls C + B in einer solchen Batterie gespeichert werden. Im Falle des Pulsators I ($N_1 = 19$ MW, $N_2 \geq 40$ MW) würde diese Energie dann etwa 4.0 MJ betragen, beim Pulsator II ($N_1 = 180$ MW, $N_2 \geq 400$ MW) wären es 40 MJ, wenn man $\Delta t_{FT}/2 = 0,1$ sec zugrunde legt. Bei einem spezifischen Preis einer Kondensatorbatterie von 1500 DM/kJ würde das zu Gesamt-

preisen von $6,0 \cdot 10^6$ DM bzw. $60 \cdot 10^6$ DM führen. Nimmt man an, dass die Impulsdauer von C nur 15 msec beträgt, dann resultieren jeweils 98 % dieser Gesamtpreise aus dem Impulsanteil B. Die Realisierung dieses Anteils mit einem Stossumformer von 40 MW bzw. 400 MW erscheint nicht möglich, da die Dauer der verlangten Leistungsabgabe kleiner oder höchstens gleich der Hochfahrzeit ist. Es bleibt also nur der MHD-Generator, der bei einer Hochfahrzeit von 15 msec gerade dann seine volle Leistung erreicht, wenn die Kondensatorbatterie entladen ist. Nach Bild 10 (Maximalkosten nach Bild 9) kostet eine 40 MW MHD-Anlage ca. $4,6 \cdot 10^6$ DM (maximal $5,4 \cdot 10^6$ DM), für eine 400 MW MHD-Anlage ergibt sich ein Preis von ca. $24 \cdot 10^6$ DM (maximal $28 \cdot 10^6$ DM). Bei einem Vergleich dieser Preise mit denen der Kondensatorbatterie ist zu berücksichtigen, dass sich die Kondensatorbatterie direkt proportional zur Flat-Top-Zeit verteuert, der Preis des MHD-Generators jedoch nicht davon beeinflusst wird. Der MHD-Generator ist also der optimale Generator B.

4.1.2 Energieversorgung des Transformators für "Wendelstein W VII"

Der Wendelstein W VII befindet sich zur Zeit in der Planung. Es ist damit zu rechnen, dass er im Jahre 1974 betriebsbereit sein wird. Bei dieser Versuchsanlage ist ein Transformator mit einer Leistung zu versorgen, die - soweit bisher gesagt werden kann - im Bereich von 10 bis 30 MW liegt. Die Betriebsdauer soll mindestens 10 sec betragen. Ausserdem werden folgende Forderungen an die Stromversorgung gestellt: der Strom sollte nach einem vorgegebenen Programm variabel sein, und zwar mit einer Regelzeitkonstanten von 30 msec.

Von der Energieversorgung werden also mindestens 100 bis 300 MJ verlangt. Über die vorhandenen Stossumformer können dann maximal 139 MJ bezogen werden, ein Energiebetrag, der an der unteren Grenze des genannten Bereiches liegt. Auch in diesem Fall wäre es also notwendig, die Energieversorgung zu erweitern. Nun ist damit zu rechnen, dass im Jahre 1975 auch die Erprobung des geplanten 10 MW-10 sec-MHD-Generator-Prototyps abgeschlossen sein wird. Es bietet sich damit an, bei der Auslegung dieses

Prototyps bereits die oben aufgeführten für den Transformator benötigten Regelbedingungen zu berücksichtigen, um nach Beendigung der Erprobung den Prototyp-MHD-Generator der Energieversorgung des Stellarators hinzufügen zu können. Auf diese Weise wird der 10 MW-10 sec-Prototyp zu einem direkt verwendbaren Gerät.

4.2 Sofortreserve in der Stromerzeugung

4.2.1 Bemerkungen zur Reservehaltung

Sowohl im öffentlichen wie im industriellen Bereich muss die Sicherheit der Energieversorgung gewährleistet sein. Diese Forderung führt dazu, dass jedes stromerzeugende Unternehmen jederzeit Reserveleistung in Höhe der Leistung des grössten von ihm betriebenen Kraftwerksblocks zur Verfügung haben muss. Die Bereitstellung dieser Reserveleistung kann auf verschiedene Weise geschehen. Die Möglichkeiten dazu überstreichen den gesamten Bereich von der vollständigen Eigenerzeugung (zum Beispiel bei Inselbetrieb) bis zum vollständigen Bezug von anderen Unternehmen.

Welche dieser Möglichkeiten angewendet werden - oder sogar angewendet werden müssen - ist abhängig von der inneren Struktur des jeweiligen Unternehmens und von seinem Verhältnis zu anderen stromerzeugenden Unternehmen und zu den Abnehmern. Die innere Struktur wird im wesentlichen bestimmt durch die absolute Höhe der insgesamt installierten Leistung, durch die Grösse der einzelnen Kraftwerksblöcke sowie die Leistungs- und Energiedichte - das ist die auf das Versorgungsgebiet bezogene installierte Leistung bzw. gelieferte Energie - , durch die jeweiligen Anteile der verwendeten Primärenergiearten - Wasserkraft, fossile Brennstoffe, Kernenergie - und durch die zur Verfügung stehenden Netze. Das Verhältnis zu anderen stromerzeugenden Unternehmen ist gekennzeichnet durch die Verknüpfungsmöglichkeiten und durch möglicherweise bestehende Verträge, sei

es bezüglich der Teilnahme an der Leistungs-Frequenz-Regelung in untereinander verbundenen Netzen, sei es über die gegenseitige Reservevorhaltung. Mit Verbrauchern - industriellen oder kommunalen - bestehen Verträge über die Lieferung von elektrischer Energie und möglicherweise auch von Wärme (zum Beispiel Fernheizung). Es können auch Verträge mit solchen Verbrauchern bestehen, die einen Teil ihres Bedarfes selbst erzeugen - also grösseren Industriefirmen -, die aber im Fall des Bedarfs an Reserveleistung Teile der Produktion abschalten, oder die sogar bestimmte Produktionen nur des nachts betreiben und dabei Strom aus dem Netz beziehen, dafür aber am Tage in Zeiten des Spitzenbedarfes Strom in das Netz zurückliefern, und auf diese Weise also zusammen mit dem nur stromerzeugenden Unternehmen eine Art Pumpspeicherbetrieb durchführen.

Bei der Betrachtung der Reservehaltung ist zwischen Sofort- und Dauerreserve zu unterscheiden. Die Sofortreserve muss im Rahmen der Leistungs-Frequenz-Regelung des Netzes direkt aktivierbar sein, um stossartige Änderungen im Gleichgewicht zwischen Erzeuger und Verbraucher sofort auffangen zu können. Erst wenn sich herausstellt - nach etwa 10 - 20 sec - dass zum Beispiel der Ausfall eines Kraftwerksblocks für längere Zeit kompensiert werden muss, werden Anlagen zur Erzeugung von Dauerreserve angefahren, um nach dem Zuschalten dieser Anlagen zum Netz wieder über die Sofortreserve verfügen zu können. Als Dauerreserveanlagen werden im Normalfall ohnehin schon vorhandene Spitzenlastanlagen verwendet. Dies sind Wasserkraftwerke (mit Jahresspeicher oder als Pumpspeicherwerke mit Tagespeicher), Gasturbinenkraftwerke und Dampfturbinenanlagen, die speziell für diesen Zweck ausgelegt sind. In Bild 14 sind die Anfahrzeiten solcher Anlagen vom Startsignal (zur Zeit $t = 0$) bei Stillstand bis zur Abgabe der vollen Leistung an das Netz angegeben. Ein Speicherkraftwerk kann die volle Leistung nach 1,5 bis 2 min abgeben /8/. Die Hochfahrzeit vom Stillstand auf Vollast beträgt bei Fluggasturbinenkraftwerken mindestens 5 min /9/, wenn man eine relativ geringe Lebensdauer der Turbinenbeschaukelung in Kauf nimmt. Ein Spitzenlastdampfturbinen-

block, ausgerüstet mit einem Schnellbereitschaftskessel und einer besonders für den Schnellstart geeigneten Turbine, kann in etwa 15 min auf Vollast gebracht werden /10/, wenn der Wärmezustand der Anlage demjenigen entspricht, der sich nach einem 4-stündigen Stillstand eingestellt hat.

Die Zeitspanne vom Auftreten der Störung bis zur Abgabe der vollen Leistung der Dauerreserveanlagen muss von der Sofortreserve überbrückt werden. Werden zu einem bestimmten Zeitpunkt von einem Netz z. B. 15000 MW verteilt, wobei die maximale Leistung der in das Netz einspeisenden Kraftwerksblöcke 1200 MW beträgt, dann muss also eine Sofortreserve in Höhe von 8 % der Netzleistung (= 1200 MW) jederzeit verfügbar sein. Bei einem kleineren Netz mit einer Erzeugung von z. B. nur 800 MW und einer maximalen Blockgrösse von 100 MW liegt dieser Prozentsatz sogar bei 12,5 %. Diese Zahlen zeigen deutlich, welche Bedeutung die Bereitstellung von Sofortreserve für die in einem Netz maximal installierbare Blockgrösse und damit auch für die Möglichkeit der Ausnutzung der Kostendegression mit steigender Blockgrösse hat.

4.2.2 Bisherige Möglichkeiten zur Bereitstellung von Sofortreserve

Speziell für die Bereitstellung von Sofortreserve gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, die auch - je nach den Gegebenheiten - miteinander kombiniert werden können.

Ein häufig angewendetes Verfahren besteht darin, die in Betrieb befindlichen Kraftwerksblöcke etwas gedrosselt, also mit einer Leistung zu fahren, die unterhalb der Nennleistung liegt. Die dieser Drosselung entsprechende Leistungsdifferenz zwischen Betriebspunkt und Nennpunkt kann im Bedarfsfall direkt über die Leistungs-Frequenz-Regelung aktiviert werden. Während diese Drosselung bei grossen Netzen etwa bei 5 % der Nennleistung liegt, können in kleineren Netzen (im Inselbetrieb) Werte bis zu 10 % und darüber notwendig sein. Allerdings sind dann bei Dampf-

turbinen schon die Grenzen der Laständerungsgeschwindigkeit zu beachten, und es ist zu berücksichtigen, dass die Erhöhung der Frischdampfmenge zunächst aus dem Volumen des Kessels bestritten werden muss und die Feuerung erst nach einer gewissen Totzeit nachkommt. Ein Teil des Drosselungsbereiches ist auch notwendig, um das Netz regelfähig zu machen. Es kann angenommen werden, dass die der gesamten Drosselung entsprechende Leistung pro Werktag für die Dauer von 15 min benötigt wird. Bei 200 Werktagen im Jahr entspricht dies einer jährlichen Benutzungsdauer von 50 h/a. Diese Benutzungsdauer ist auch von der Art der zur Verfügung stehenden Dauerreserveanlagen abhängig (Bild 14); der genannte Wert dürfte bei der Verwendung von Gasturbinen zutreffen, bei Wasserkraftanlagen könnte er geringer sein, bei Dampfturbinen grösser. Die Kosten für diese Reserve resultieren im wesentlichen aus den Anlagekosten der gedrosselt betriebenen Kraftwerksblöcke.

Eine andere Möglichkeit für die Bereitstellung von Sofortreserve ist das ständige netzsynchrone Mitlaufenlassen von Dampfturbosätzen, die im Bedarfsfall mit Dampf aus Rhythsspeichern betrieben werden. Bei entsprechender Konstruktion können solche Anlagen in wenigen Sekunden voll belastet werden (Bild 14). Für die jährliche Benutzungsdauer gelten Werte zwischen 50 und 100 h/a. Die Kosten dieser Sofortreserve sind relativ hoch. Sie setzen sich aus den Anlagekosten und den nicht unerheblichen Kosten für den Leerlaufverbrauch zusammen, während der Anteil der lastabhängigen Kosten recht gering ist.

Eine indirekte Methode der Bereithaltung von Sofortreserve ist die vertragliche Vereinbarung von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) mit industriellen Eigenerzeugern, im Bedarfsfall eine bestimmte Produktion abzuschalten, um auf diese Weise elektrische Leistung für das Netz verfügbar zu machen. Eine solche Abschaltung könnte zum Beispiel selbsttätig bei einem bestimmten Frequenzeinbruch ausgelöst werden. Über die Kosten dieses Verfahrens kann hier nichts gesagt werden, da solche Vereinbarungen nur Bestandteil umfangreicherer Verträge sind.

Daneben besteht die Möglichkeit der gegenseitigen Reservevorhaltung zweier Stromerzeuger oder der gemeinsamen Vorhaltung in einem grösseren Verbundbetrieb. Der Bezug von Sofortreserve kann dann zunächst - bis zu einem bestimmten Zeitpunkt - kostenlos sein, danach muss der Bezieher Gebühren für die Höhe der in Anspruch genommenen Leistung und für die bezogene Arbeit bezahlen. Die Interessen bezüglich dieses Zeitpunktes können bei den einzelnen Partnern eines Verbundbetriebes je nach ihrer inneren Struktur und ihrer relativen Grösse zueinander recht unterschiedlich sein. EVU, die über ausreichende Leistung aus Wasserkraftanlagen verfügen können, werden - entsprechend Bild 14 - einen möglichst frühen Zeitpunkt für das Ende der kostenlosen Reservelieferung anstreben. Dagegen sind EVU, die ihre Dauerreserve mit Gasturbinen und Spitzenlastdampfturbinen erzeugen, an längeren Zeiträumen für die kostenlose Reserve interessiert.

Schliesslich bleibt noch die Möglichkeit, Sofortreserve teilweise - wenn nur ein Teil der notwendigen Reserve gedeckt ist - oder vollständig zu kaufen. Die dabei zu zahlenden Gebühren sind ausserordentlich stark von vertraglichen Bedingungen abhängig. Die jährlichen Leistungspreise schwanken dabei zwischen 10 DM/kW und 200 DM/kW, die Arbeitspreise zwischen 0,03 DM/kWh und 0,10 DM/kWh. Als mittlere Preise können 100 DM/kW und 0,05 DM/kWh angenommen werden.

4.2.3 Der MHD-Generator als Sofortreserveaggregat

Dank seiner kurzen Hochfahrzeit von 0,3 - 0,5 sec vom Start auf Vollast (Bild 14) ist auch das hier betrachtete MHD-Generator-System zur Deckung von Sofortreserve geeignet. Es wäre naheliegend, mehrere solcher Generatoren zum Beispiel im Bereich der Mittelspannungsnetze in ein Netzwerk einzufügen, um auf diese Weise Frequenzeinbrüche direkt am Ort der Entstehung auffangen zu können. Im Zusammenwirken mit einigen der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Möglichkeiten könnte der MHD-Generator zu einer Verringerung der Gesamtkosten für die Sofortreserve führen. Drei Beispiele sollen dies verdeutlichen.

Betrachtet werde zunächst ein stromerzeugendes Unternehmen, das die Sofortreserve durch Drosselung der laufenden Anlagen deckt und über ausreichend Leistung aus Wasserkraftanlagen für die Dauerreserve verfügt. Da die Wasserkraftanlagen relativ schnell hochgefahren werden können (Bild 14), ist die Benutzungsdauer der Sofortreserve entsprechend gering. Nimmt man pauschal an, dass die volle Sofortreserve an den 200 Arbeitstagen im Jahr jeweils 4 mal für die Dauer von 2 min benötigt wird, dann resultiert daraus eine jährliche Benutzungsdauer von 30 h/a. Beträgt die bereitzuhaltende Sofortreserveleistung 600 MW, dann belaufen sich die arbeitsabhängigen Kosten unter der Annahme eines Brennstoffpreises von $0,8 \text{ Dpfg/kWh}_{e1}$ nur auf $0,144 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$. Die jährlichen Fixkosten dagegen ergeben sich ausgehend von spezifischen Anlagekosten von 500 DM/kW - ein Wert, der etwa für konventionelle Dampfkraftwerke zutrifft - bei einer Annuität von 16 % zu $48 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$, so dass die Gesamtkosten $48,14 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$ betragen. Würde man die 600 MW Reserveleistung in 6 MHD-Anlagen zu je 100 MW installieren - die Grundlastkraftwerke könnten dann im Nennlastpunkt betrieben werden -, dann ergäben sich nach Bild 11 Gesamtkosten in Höhe von $39,0 \cdot 10^6 \text{ DM}$, also eine Ersparnis um $9,14 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$ entsprechend 19 %. Würde man bei den MHD-Anlagen bereits vorhandene Schornsteine verwenden können, dann stiege diese Ersparnis um $1,3 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$ auf $10,44 \cdot 10^6 \text{ DM/a}$ entsprechend 21,7 %.

Im zweiten Beispiel werde ein stromerzeugendes Unternehmen betrachtet, das zwar aufgrund gegenseitiger Vereinbarungen von anderen Unternehmen für einige Minuten Sofortreserve kostenlos beziehen kann, das aber nicht über ausreichende Reserven verfügt, um die restliche Zeitspanne bis zur vollen Leistungsabgabe eigener Gas- oder Dampfturbinen (siehe Bild 14) überbrücken zu können. Diese Zeitspanne, die sich über einen Bereich von jeweils 2 bis 5 min beim Vorhandensein von Gasturbinen und bis zu 12 min beim Vorhandensein von Schnellstartdampfturbinen erstreckt, könnte entweder durch den Ankauf der Reserve von einem anders strukturierten Stromerzeuger gedeckt werden oder aber durch den Einsatz von MHD-Generatoren. Die Kosten für den Ankauf

der Reserve stehen damit in Konkurrenz zu den Kosten, die sich bei der Errichtung und dem Betrieb von MHD-Generatoren ergeben. In Bild 15 wurden zunächst die beim MHD-Generator anfallenden jährlichen Gesamtkosten über den Benutzungsstunden unter Zugrundelegung der spezifischen Installationskosten von Bild 10 im Bereich von 10 - 100 MW aufgetragen (voll ausgezogene Linien). Danach wurden diejenigen Gesamtkosten pro Jahr berechnet, die sich ergeben, wenn der Strom zu einem bestimmten Leistungspreis - hier variiert von 50 bis 150 DM/kW - und einem Arbeitspreis von $0,05 \text{ DM/kWh}_{el}$ bezogen wird. Die gestrichelten Linien in Bild 15 geben abhängig von der Höhe der Reserveleistung (N_{el}) für einen bestimmten Leistungspreis diejenige jährliche Benutzungsdauer an, bei denen die Gesamtkosten in beiden Fällen gleich sind. So erhält man zum Beispiel bei 100 MW und 100 DM/kW eine Benutzungsdauer von 95 h/a (Gesamtkosten $10,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$). Ist die tatsächliche Benutzungsdauer des MHD-Generators bzw. die Strombezugsdauer kleiner, dann sind die Kosten für die MHD-Eigenerzeugung geringer als die aus dem Ankauf des Stromes resultierenden Kosten. Die Kostendifferenz in diesem Zahlenbeispiel ist durch den Abstand der strichpunktierten Linie von der für 100 MW geltenden ausgezogenen Linie gegeben. Bei einer Benutzungsdauer von 50 h/a - dem entspricht ein 4-maliges Einschalten für jeweils fast 4 min an 200 Tagen im Jahr - beträgt die Ersparnis bei Verwendung eines MHD-Generators fast 25 %. Bei Verwendung eines bereits vorhandenen Schornsteins erhöht sich diese Ersparnis auf 26,5 %.

Würde der zu zahlende Leistungspreis 150 DM/kW betragen, dann wäre die Gleichheit der Gesamtkosten erst bei einer Benutzungsdauer von etwas mehr als 180 h/a erreicht. Bei einer Benutzungsdauer von 50 h/a wären die bei der MHD-Eigenerzeugung entstehenden Gesamtkosten nur halb so hoch wie diejenigen, die sich beim Kauf des Stromes ergeben. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der zeitlich gestaffelte Betrieb zunächst eines MHD-Generators, dann einer Gasturbine und danach möglicherweise auch noch einer Spitzenlastdampfturbine sowohl zu einer optimalen Sofort- und Dauerreserve als auch zu einer hohen Aus-

nutzung der in Grundlastanlagen installierten Leistung führen könnte. Zusätzlich könnte der MHD-Generator noch als Regglied im Netz eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.3).

Besonders gross werden die mit dem MHD-Generator erzielbaren Einsparungen, wenn - und das ist das dritte Beispiel - ein mittleres EVU für Vorhaltung und Lieferung von Sofortreserve an ein überregionales EVU genau so viel bezahlen muss als ob es diese Leistung das ganze Jahr hindurch ununterbrochen bezöge. Für eine Reserveleistung von 10 MW müssten demnach bei einem Preis von 2,3 Dpfg/kWh etwa $2 \cdot 10^6$ DM/a, bei 3,2 Dpfg/kWh entsprechend fast $2,8 \cdot 10^6$ DM/a aufgebracht werden. Man kann davon ausgehen, dass die Notwendigkeit, diese Reserve in Anspruch zu nehmen, nur sehr selten und kurzzeitig, also insgesamt höchstens wenige Stunden im Jahr vorkommt. Beim Einsatz eines MHD-Generators könnte also in diesem Fall nahezu der gesamte Differenzbetrag zwischen den eben berechneten Kosten und den jährlichen Fixkosten für den MHD-Generator - sie betragen bei der 10 MW-Anlage $1 \cdot 10^6$ DM/a - eingespart werden. Die jährliche Einsparung beträgt damit $1 \cdot 10^6$ DM/a bzw. $1,8 \cdot 10^6$ DM/a, mithin also 18 % bzw. 37 % der gesamten Installationskosten der kompletten MHD-Anlage. Führt man diese Betrachtung für eine Leistung von 100 MW durch, dann erbringt die MHD-Anlage Einsparungen in Höhe von $15,3 \cdot 10^6$ DM/a bzw. $23,3 \cdot 10^6$ DM/a entsprechend 59 % bzw. 90 % der gesamten MHD-Installationskosten. Das MHD-Kraftwerk kann sich demnach als "Versicherung" gegen Kraftwerksausfall und unvorhersehbare Spitzen ausserordentlich schnell amortisieren. Bei grossen Anlagen ist dies je nach Anzahl der jährlichen Benutzungsstunden bereits nach etwa 2 Jahren zu erwarten. Von diesem Zeitpunkt an kann ein 100 MW-MHD-Kraftwerk unter den angenommenen Bedingungen einen jährlichen Gewinn von über 50 % seiner Erstellungskosten erwirtschaften.

Die drei erläuterten Beispiele, die sich auf EVU und teilweise auch auf industrielle Eigenerzeuger beziehen können, zeigen recht deutlich, dass das dieser Studie zugrundeliegende MHD-Generator-System als Sofortreserveaggregat verwendet werden kann.

Der Vollständigkeit halber sollen in diesem Zusammenhang die anderen Geräte zur Kurzzeit-Energieversorgung, die zum Teil im Abschnitt 4.1 bereits diskutiert wurden, erwähnt werden. Stoss-umformer und Kondensatorbatterien können zwar sofort, aber nur unzureichend lange Leistung abgeben. Andere Verfahren wie z. B. Heisswasserturbinen-getriebene Generatoren benötigen zu lange, um ihre volle Leistung zu erbringen und können diese auch wegen der begrenzten Speicherkapazität nur kurze Zeit aufrechterhalten. Die Anlauf- und Betriebszeiten dieser Aggregate sind ebenfalls in Bild 14 dargestellt.

4.3 Der MHD-Generator als Regelglied im Netz

Wenn die Sofortreserveversorgung von MHD-Generatoren übernommen würde - die Grundlastkraftwerke würden dann weitgehend im Nennpunkt betrieben -, dann würde es sich anbieten, die MHD-Anlagen auch als Regelglied im Netz zur Deckung kurzzeitiger Lastspitzen mit steilen Leistungsgradienten zu verwenden. Solche Spitzen können in regelmässiger oder unregelmässiger, dabei jedoch häufiger Pulsfolge ausgehend von Industriebetrieben auftreten. Im Walzwerksbetrieb liegen solche Leistungsstösse im Bereich von 40 - 60 MW. Von gleicher Grösse sind auch die Leistungsstösse, die sich bei Al-Gewinnung mit der Schmelzfluss-elektrolyse - jeweils beim Eintauchen der Elektrode - ergeben. Die Pulsdauer liegt hier jeweils im Sekundenbereich. Die Deckung dieser Spitzen mit MHD-Generatoren könnte auch unabhängig vom Netz von den Industriefirmen selbst vorgenommen werden. Ein solcher Einsatz wäre dann nahezu identisch mit der im Abschnitt 4.1 erläuterten Energieversorgung von Fusionsexperimenten.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Für die technische Verwendung des Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generators ergibt sich auf der Basis der im vorigen Abschnitt diskutierten speziellen Anwendungsfälle ein relativ fest umrissener Bereich. In technischer Hinsicht - die volle Leistung ist sehr schnell verfügbar - und in wirtschaftlicher Hinsicht - die Anlagekosten sind sehr niedrig - eignet sich das Generator-system für die Deckung von Leistungsspitzen mit sehr steilem Anstieg. Aufgrund der relativ hohen Treibstoffkosten ist der Einsatz dieses Systems nur bis zu einer bestimmten jährlichen Benutzungsdauer wirtschaftlich, die von den im Einzelfall geltenden speziellen Bedingungen abhängig ist.

Darüberhinaus ist deutlich geworden, dass es sinnvoll ist, das schon früher in die Planung aufgenommene 10 MW-10 sec-System zu verwirklichen. Dieses System kann einmal bei der Energieversorgung von Fusionsexperimenten direkt verwendet werden und zum anderen kann es als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung angesehen werden.

6. PLANUNG FÜR DIE WEITERE ENTWICKLUNG

Aus den Betrachtungen über die Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich eindeutige Hinweise bezüglich der Leistungsgrösse und der Betriebsdauer der in der Folgezeit zu entwickelnden MHD-Generatoren.

Bei der Wahl der Leistungsgrösse bietet sich folgende Baureihe an: Dem 10 MW-Generator sollte ein Generator mit einer Leistung im Bereich von 30 - 40 MW folgen. Diese Grössenordnung ist für alle im Abschnitt 4 genannten Verwendungsmöglichkeiten erwünscht. Gegenüber dem 10 MW-Generator müssten die Linearabmessungen des Systems - hauptsächlich Brennkammer, Kanal und Magnetinnenraum - mit dem Faktor 1.5 vergrössert werden. Die Vergrösserung dieser Abmessungen um den Faktor 2.0 schliesslich würde auf die 3.

Leistungsstufe - etwa 100 MW - führen. Auch diese Leistung ist für die erörterten Anwendungsfälle interessant. (Es sei darauf hingewiesen, dass nach Aussagen eines Herstellers supraleitender Magnete Änderungen in der Lineardimension um den Faktor 2.0 noch keine Änderung des Konstruktionsprinzips des Magneten erfordern.)

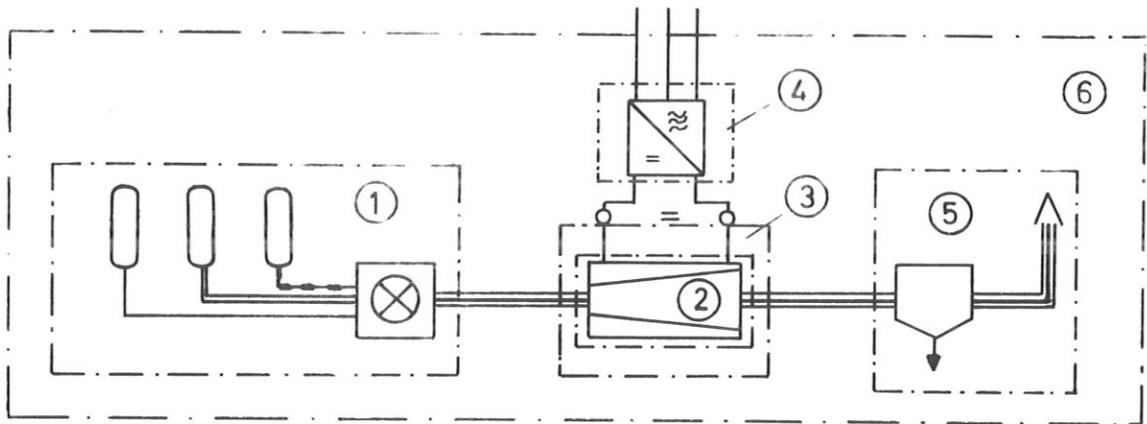
Hinsichtlich der Frage der jeweiligen Betriebszeiten bietet es sich aus zwei Gründen an, diese Leistungsreihe zunächst für den Sekundenbetrieb (ca. 10 sec) zu entwickeln und danach - zeitlich um die halbe Entwicklungszeit eines Systems versetzt - mit der Entwicklung von Generatoren für den Minutenbetrieb (bis ca. 30 min) zu beginnen. Der eine Grund liegt darin, dass aufgrund der Zeitpläne im Bereich der Fusionsforschung die Sekundengeneratoren zuerst benötigt werden, während der Einsatz der MHD-Generatoren in der öffentlichen und industriellen Energieversorgung zeitlich ungebunden ist. Ausserdem - und das ist der zweite Grund - ist eine Betriebszeit von 10 sec einerseits ausreichend, um die noch nicht völlig beherrschten physikalischen Probleme zu untersuchen und zu klären, andererseits jedoch kurz genug, um mit kapazitiver Kanalkühlung auszukommen. Dadurch werden eine Reihe technischer Probleme ausgeklammert, deren Lösung die physikalischen Untersuchungen aufhalten würde, und ausserdem erlaubt nur der Verzicht auf ein Kühlsystem die Anwendung der notwendigerweise komplizierten Messmethoden. Die genannte Reihenfolge - zuerst Sekundenbetrieb, dann Minutenbetrieb - hat zusätzlich den Vorteil, dass die für den Sekundenbetrieb erstellten MHD-Anlagen auch bei der Entwicklung von Bauteilen für den Minutenbetrieb verwendet werden können. Es sei noch darauf hingewiesen, dass die gesamte Entwicklungszeit verkürzt werden kann, wenn schon bald mit den Arbeiten an einigen Bauelementen für den Minutenbetrieb begonnen wird.

Bild 16 enthält im unteren Teil eine grafische Darstellung der eben beschriebenen möglichen weiteren Kurzzeit-MHD-Generator-Entwicklung, während im oberen Teil der Leistungsbedarf dargestellt ist. Die mit diesem Bild zum Ausdruck gebrachten Vor-

stellungen über die Planung können im Rahmen dieser Studie nur sehr grob sein. Genauere Aussagen könnten nur auf der Basis detaillierter Untersuchungen gemacht werden.

7. SCHRIFTTUM/QUELLENANGABE

- /1/ MAN-IPP: MHD-Kurzzeit-Generatoren und ihre Anwendungsmöglichkeiten, Bericht vom 21. August 1969.
- /2/ Bünde R., Freudenberger K., Klüber O., Kottmair M. und Muntenbruch H.: Stellungnahme zu den Möglichkeiten der Verwendung von Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generatoren bei der Energieversorgung von Fusionsexperimenten. Interner Bericht des IPP.
- /3/ Arp V.D.: Possible Cryogenic Magnet System for Magneto-hydrodynamic Application. National Bureau of Standards Report 9290.
- /4/ Bohn T.: persönliche Mitteilung.
- /5/ Bohn T., Grawatsch K., Komarek P. und Noack G.: Angewandte Magnetohydrodynamik, Heft 5, MHD-Kernkraftwerke. Jül-689-TP, August 1970.
- /6/ Kunze N.: Erstes Gasturbinen-Spitzenlastkraftwerk mit Strahltriebwerken in Deutschland. BBC-Nachrichten 48 (1966), Heft 6, S. 374-378.
- /7/ Franzke H.-H.: Gasturbinen für die Spitzenlastdeckung "Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen" Heft 6 (1966), S. 15-31.
- /8/ Grabitz R.: Eigenschaften von Pumpspeicherwerken als Spitzenstromerzeuger. BBC-Nachrichten 48 (1966), Heft 6, S. 339-344.
- /9/ Eiermann A.: Gasturbinen für Spitzenlastdeckung. BBC-Nachrichten 48 (1966), Heft 6, S. 379-385.
- /10/ Potthast U.: Dampfkraftwerke für Spitzenlast. BBC-Nachrichten 48 (1966), Heft 6, S. 354-360.



- 1 Brennsystem
- 2 MHD-Generatorkanal
- 3 Supraleitender Magnet
- 4 Stromwandler
- 5 Abgasanlage
- 6 Kraftwerksgebäude und -ausrüstung

Bild 1. Schematische Darstellung des MHD-Kraftwerks

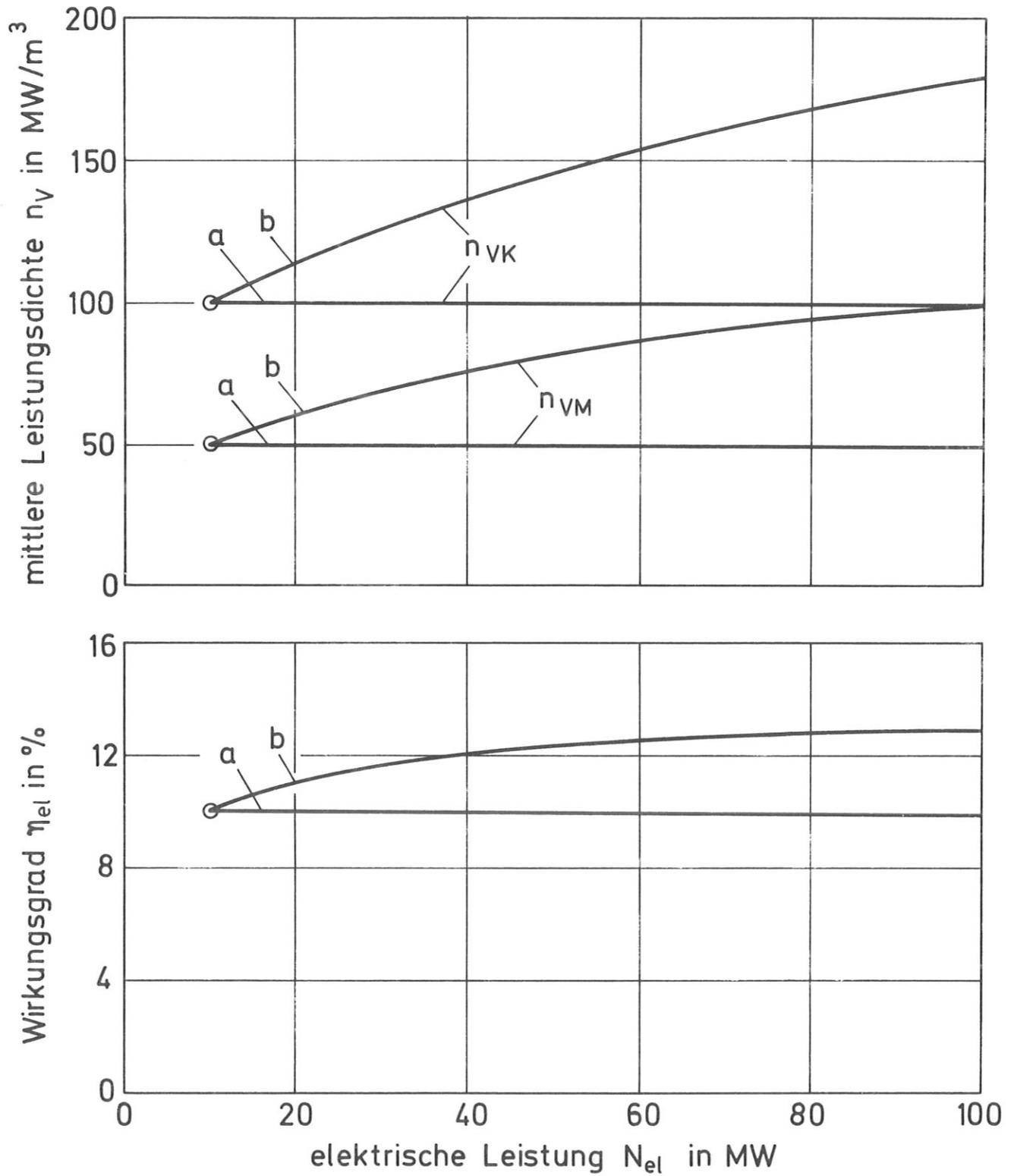


Bild 2. Leistungsdichte und Wirkungsgrad abhängig von der elektrischen Leistung

n_{VK} = Leistungsdichte im Generatorkanal

n_{VM} = Leistungsdichte im Magnetinnenraum

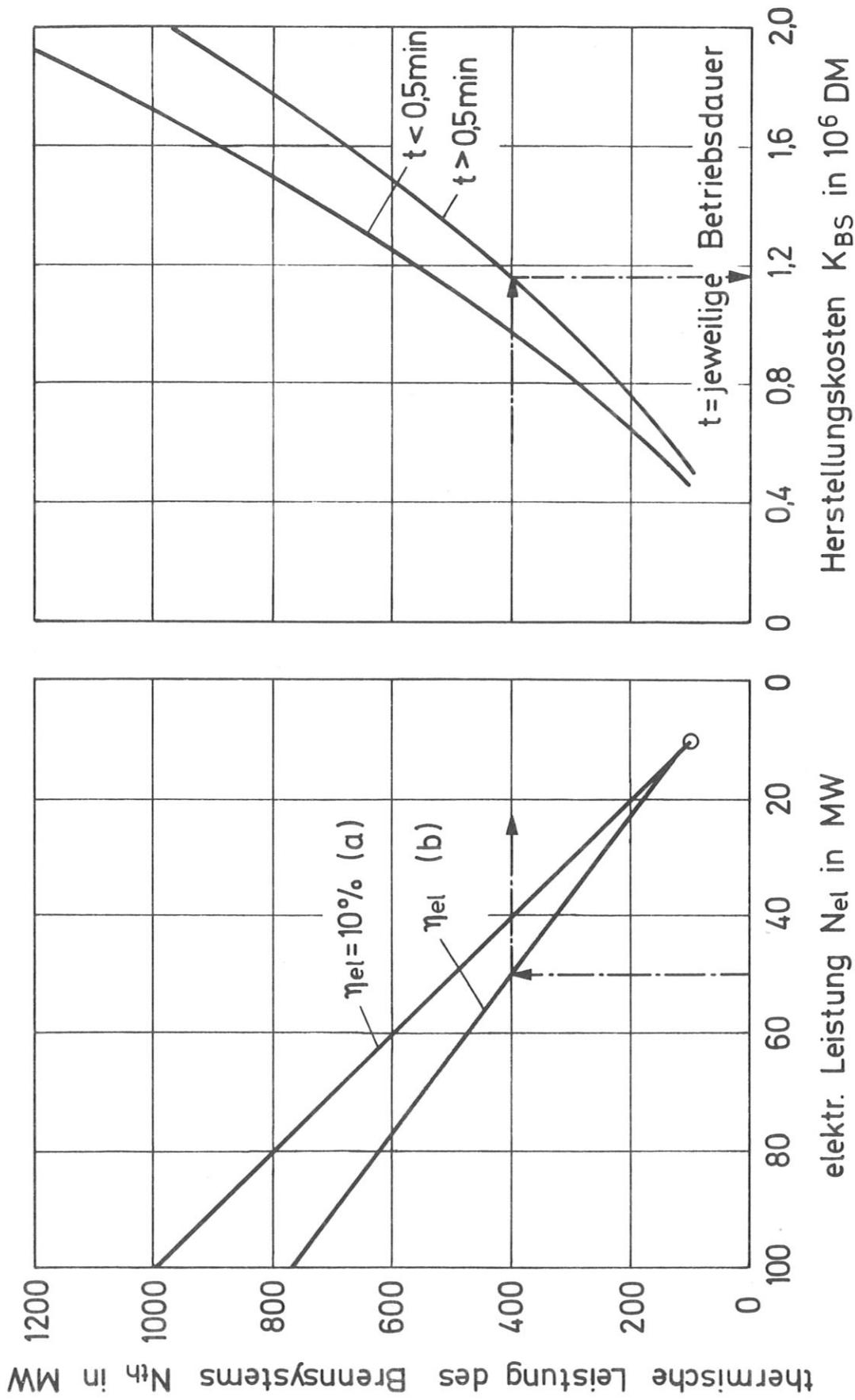


Bild 3. Herstellungskosten des Brennsystems

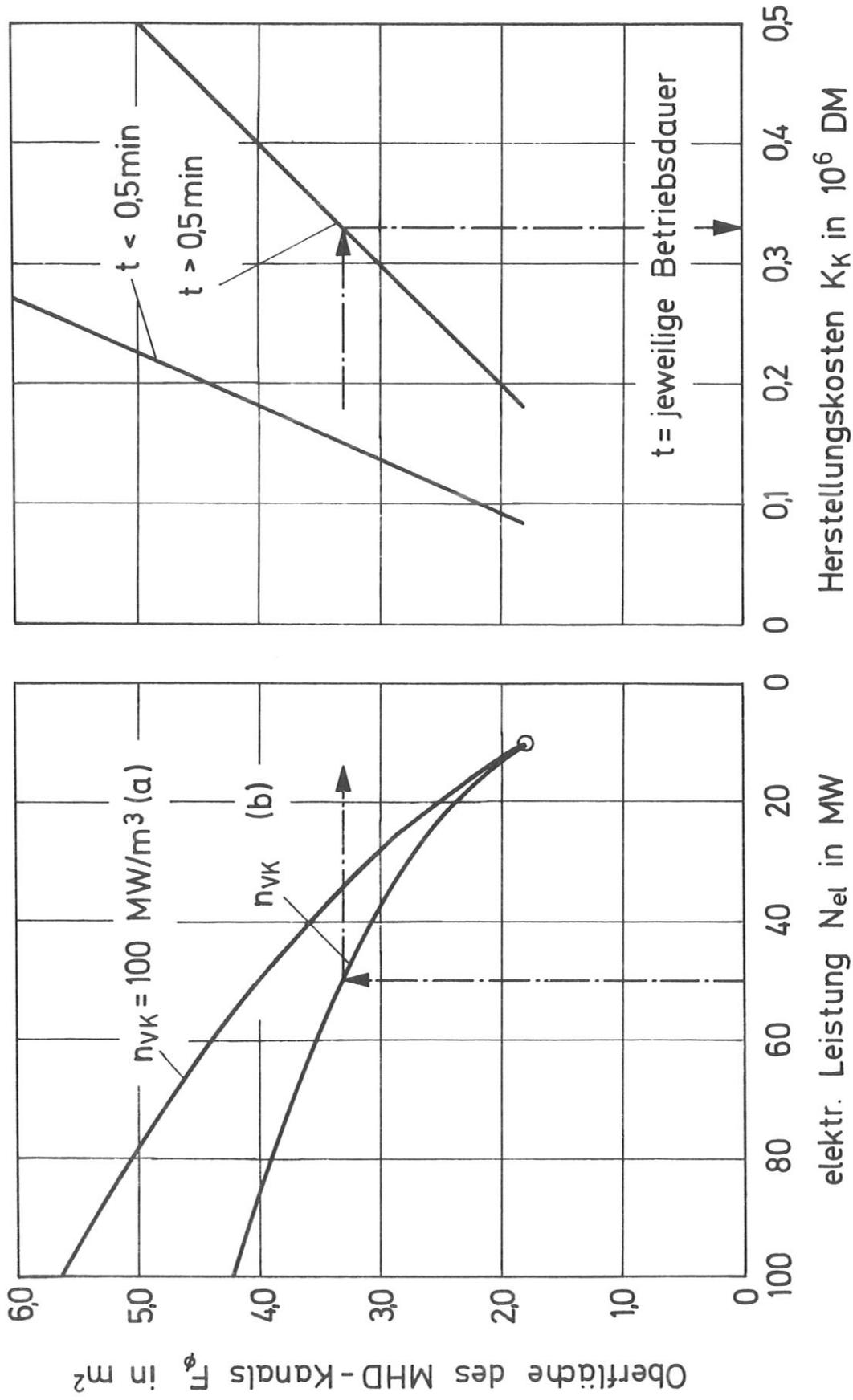


Bild 4. Herstellungskosten von MHD-Kanälen

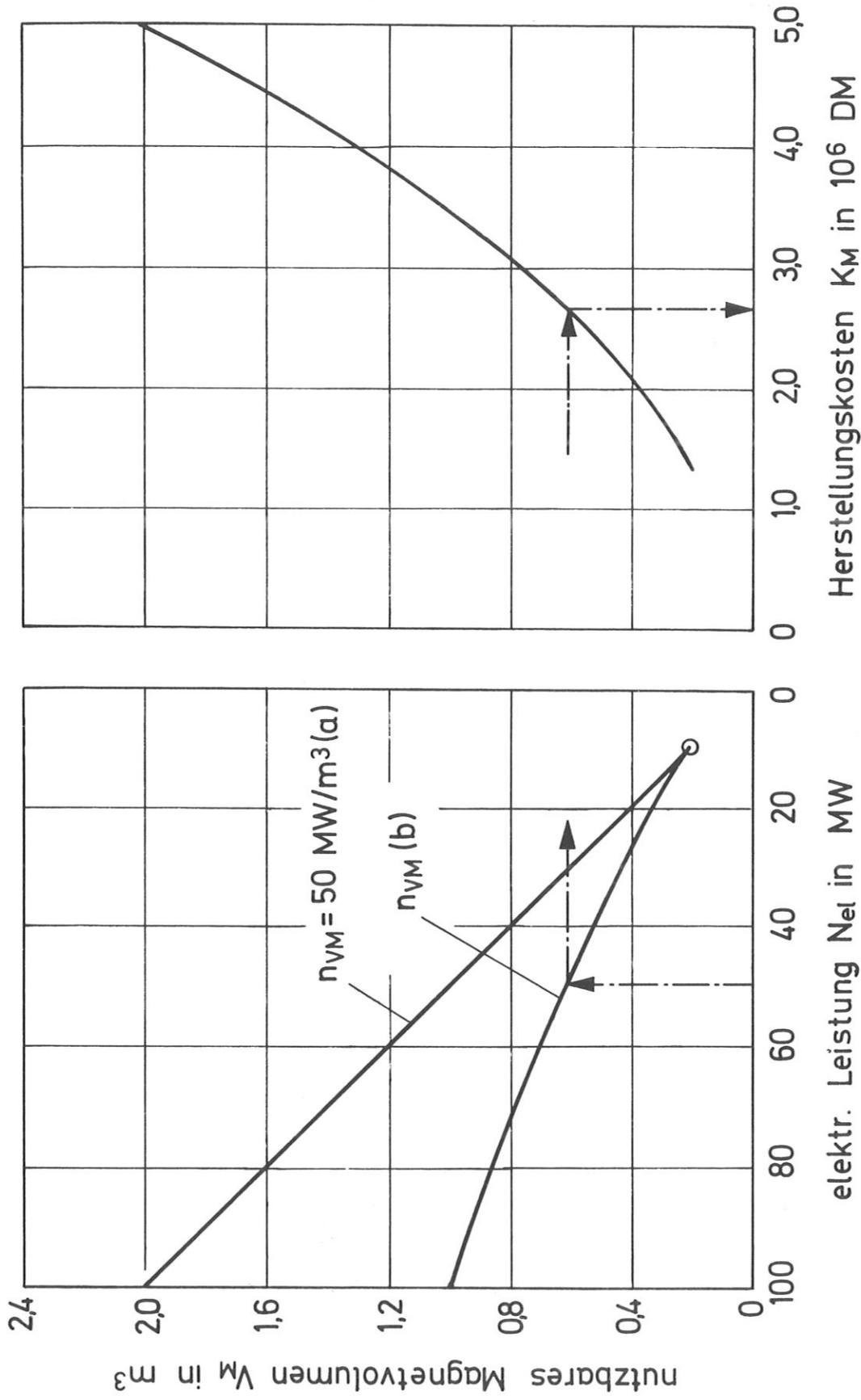


Bild 5. Herstellungskosten von supraleitenden Magneten in Sattelspulenbauweise
(maximale magnetische Induktion 5 Tesla)

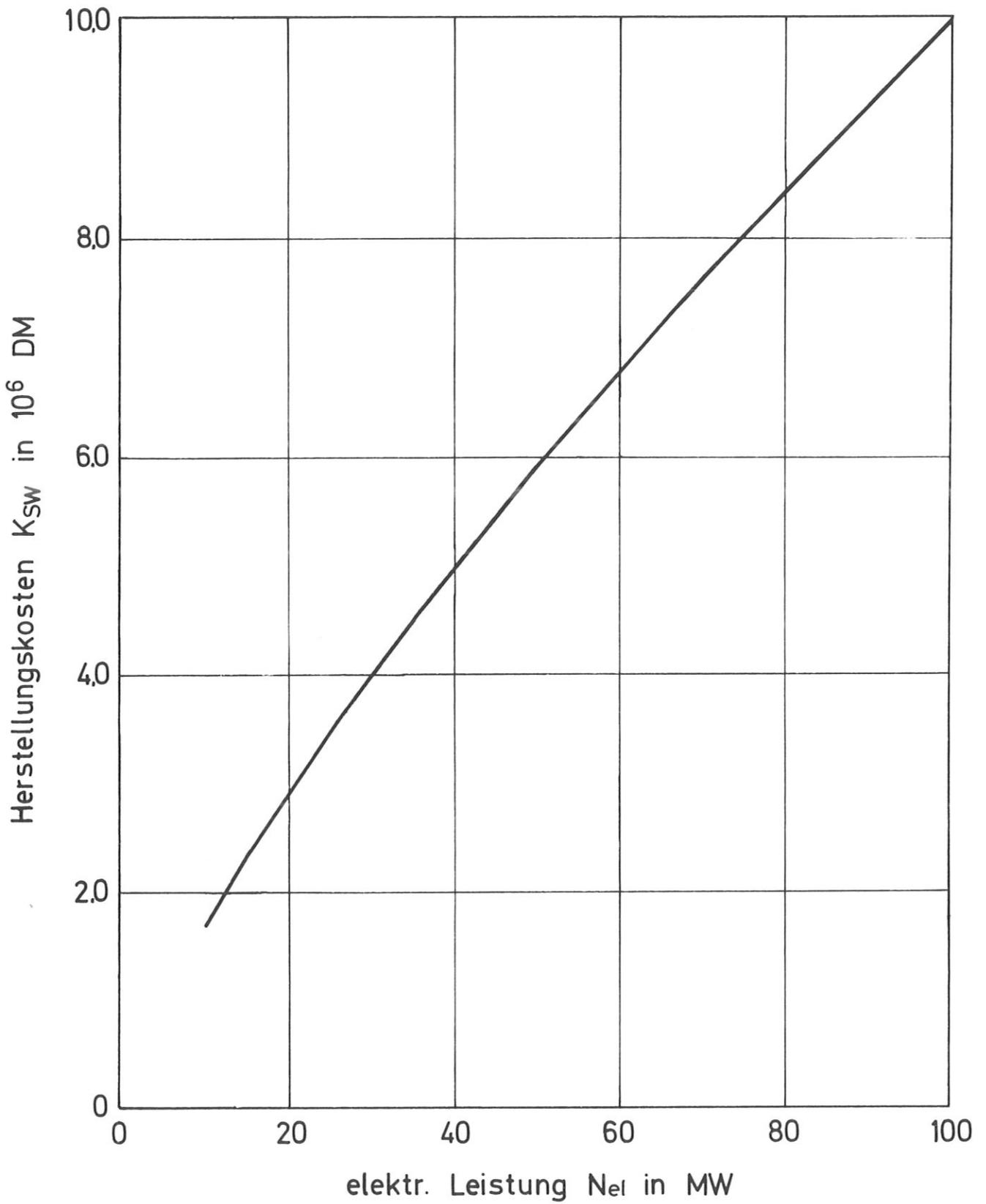


Bild 6. Herstellungskosten für Stromwandler (Wechselrichter) abhängig von der elektrischen Leistung

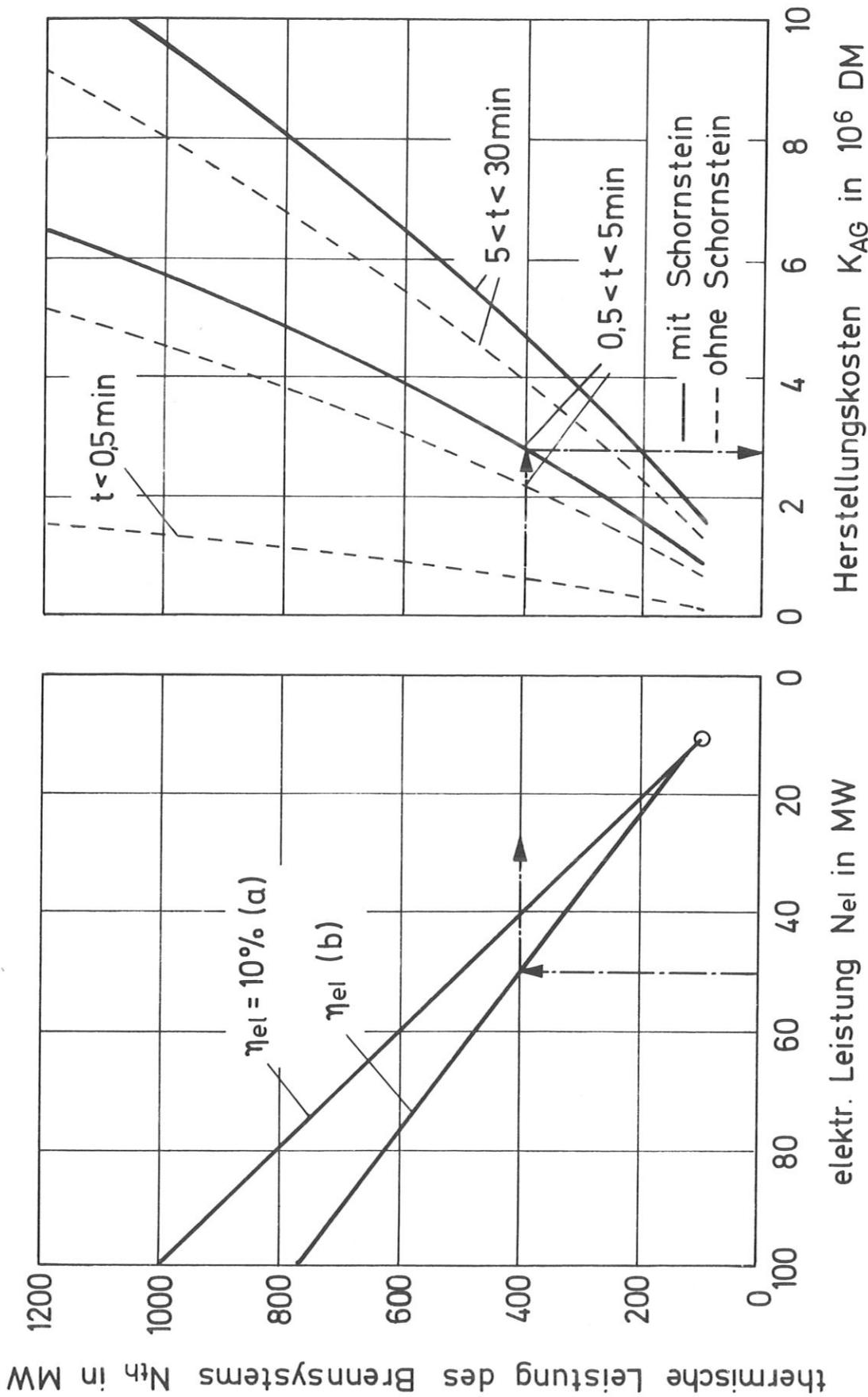


Bild 7. Herstellungskosten der Abgasanlage

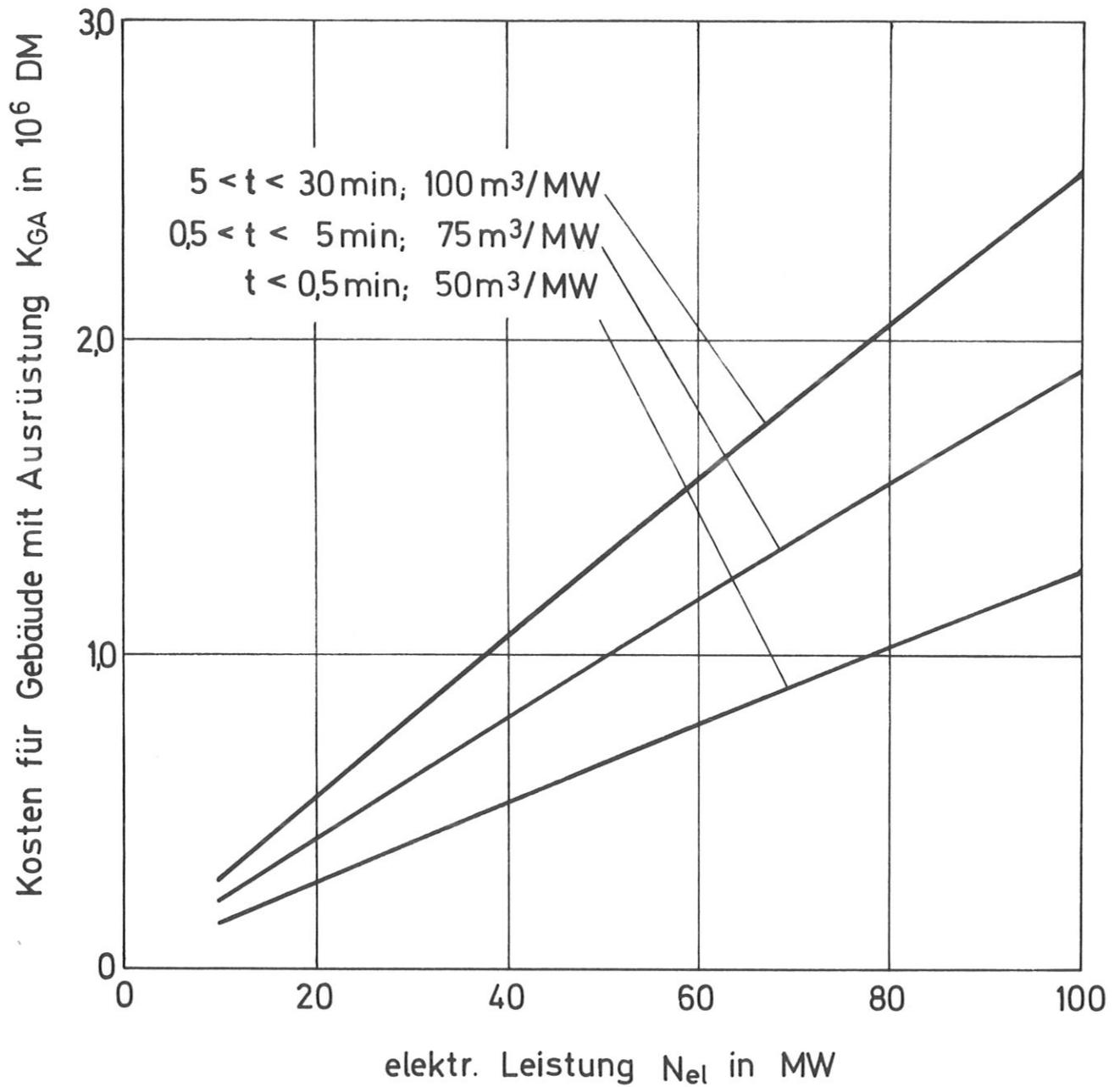


Bild 8. Kosten für Gebäude einschliesslich Ausrüstung

Annahme: spez. Kosten für Gebäude: $120 \text{ DM}/\text{m}^3$

spez. Kosten für Ausrüstung: $200 \text{ DM}/\text{m}^3$

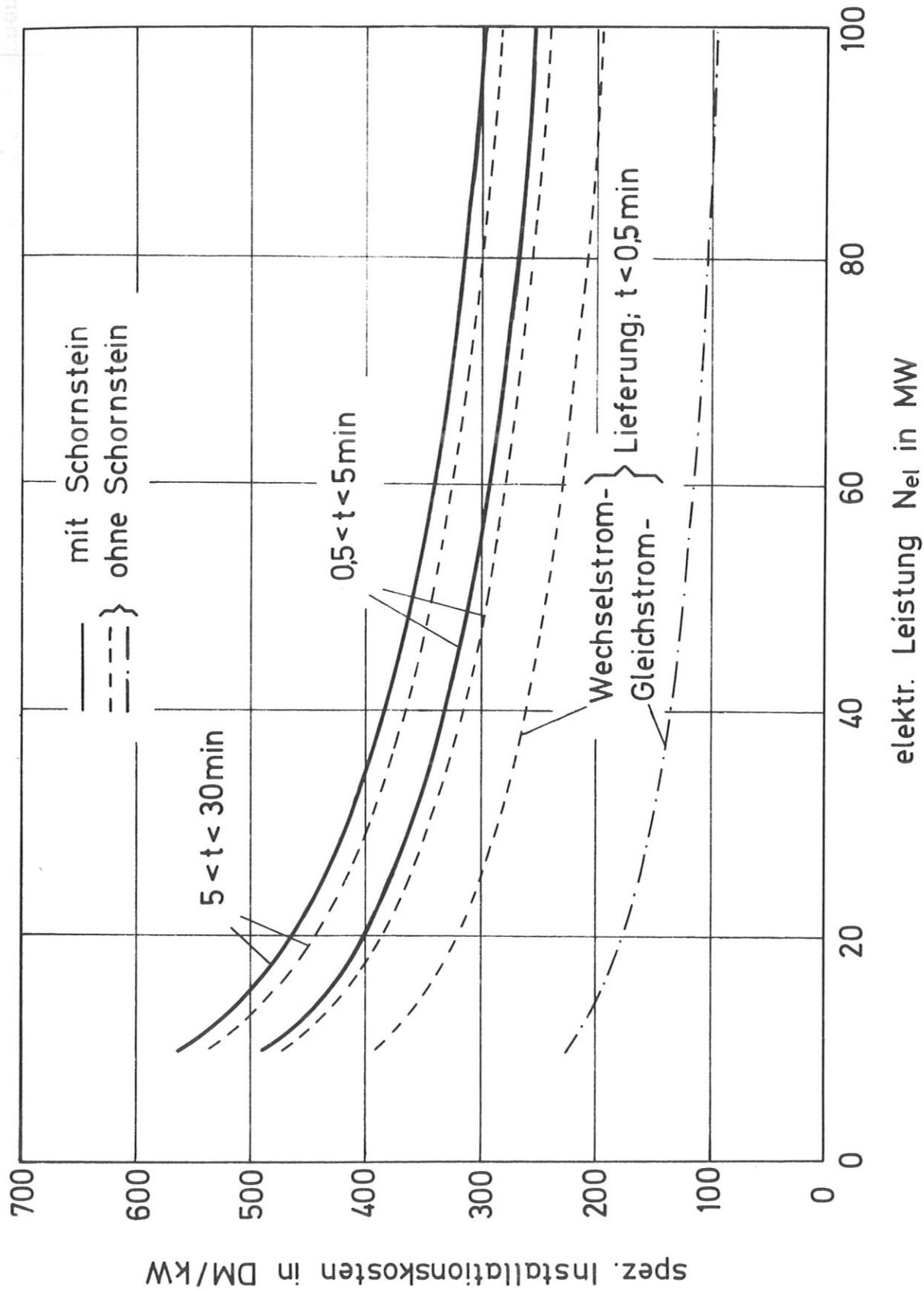
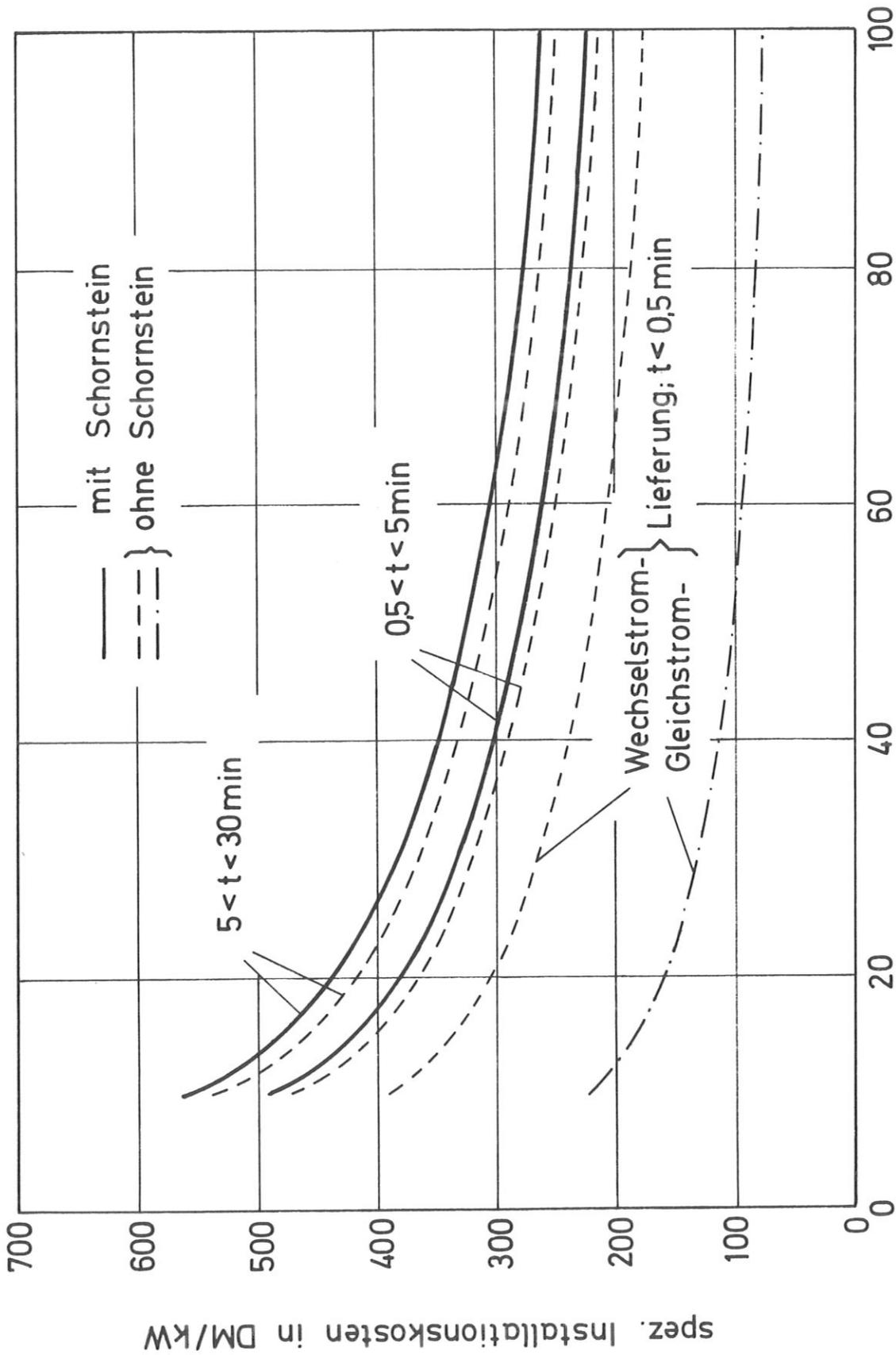


Bild 9. Spezifische Installationskosten für MHD-Kraftwerke abhängig von der elektrischen Leistung (gültig für die Kurven a in Bild 2)



elektr. Leistung N_{el} in MW

Bild 10. Spezifische Installationskosten für MHD-Kraftwerke abhängig von der elektrischen Leistung
(gültig für die Kurven b in Bild 2)

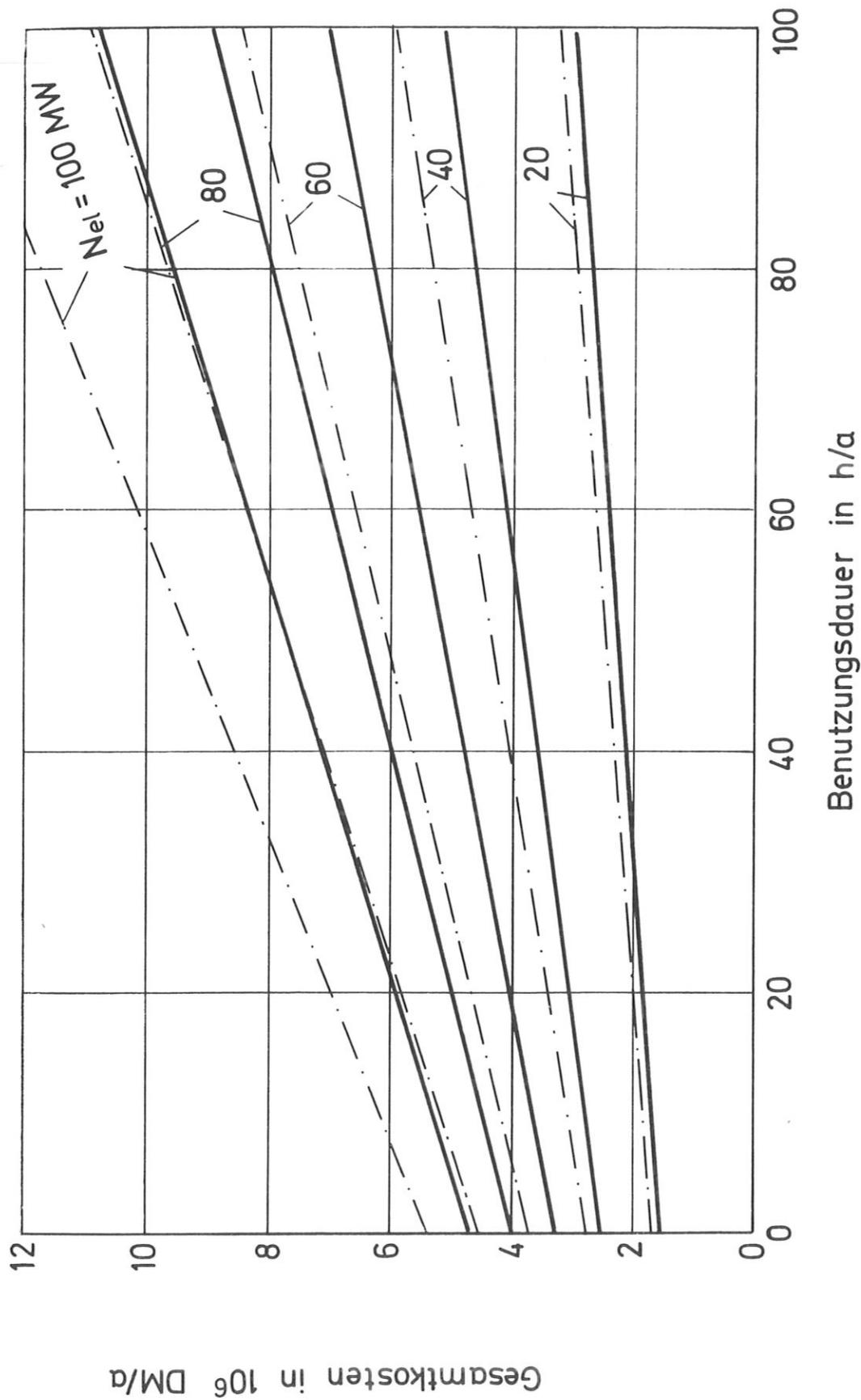


Bild 11. Jährliche Gesamtkosten der Stromerzeugung abhängig von der jährlichen Benutzungsdauer (16 % Kapitaldienst + 2 % Wartung; Treibstoffpreis 0,08 DM/kWh_{th}; Anlage für $t \leq 30$ min, mit Schornstein)

- spez. Installationskosten nach Bild 9;
- spez. Installationskosten nach Bild 10

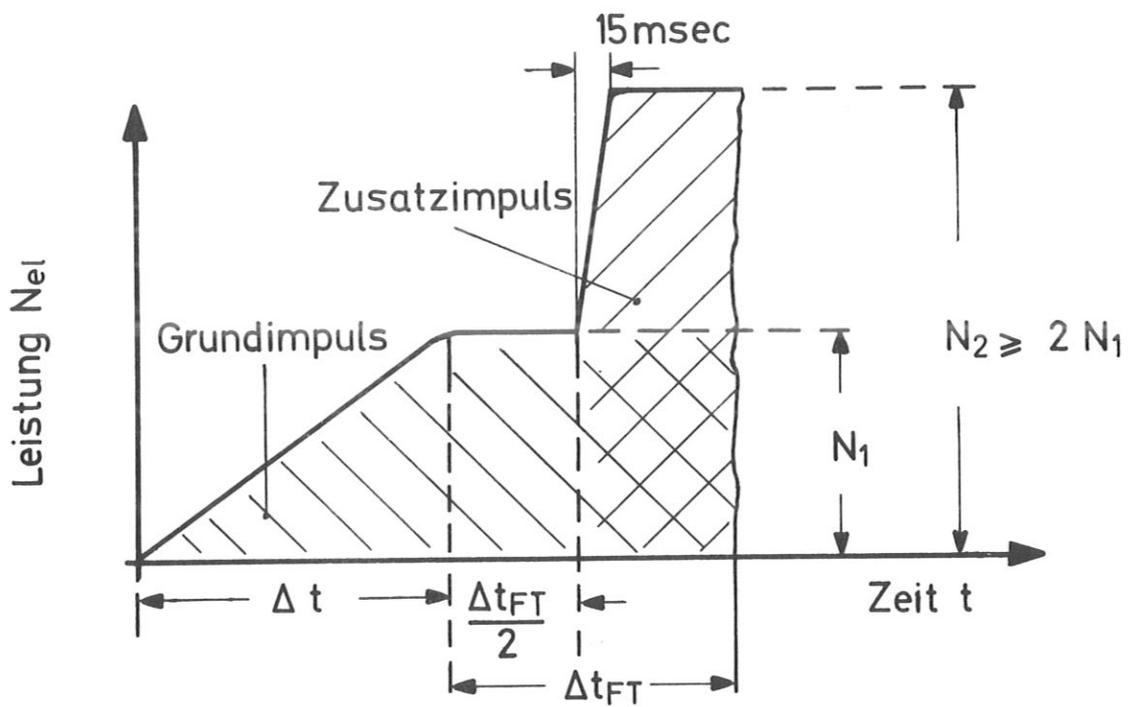
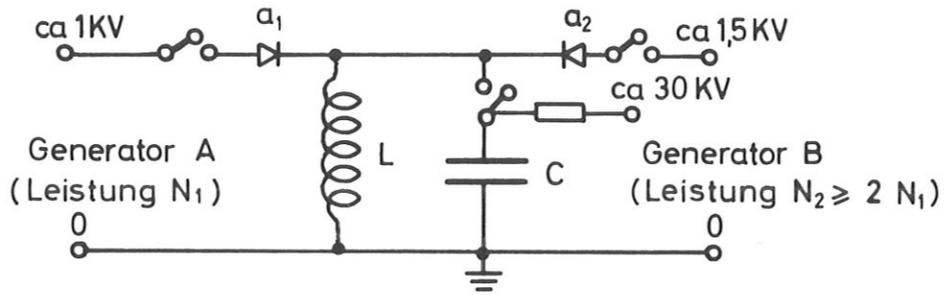


Bild 12. Leistungsbedarf des Magneten am Pulsator



L = Verbraucher
(Magnetfeldspule)

C = Kondensator

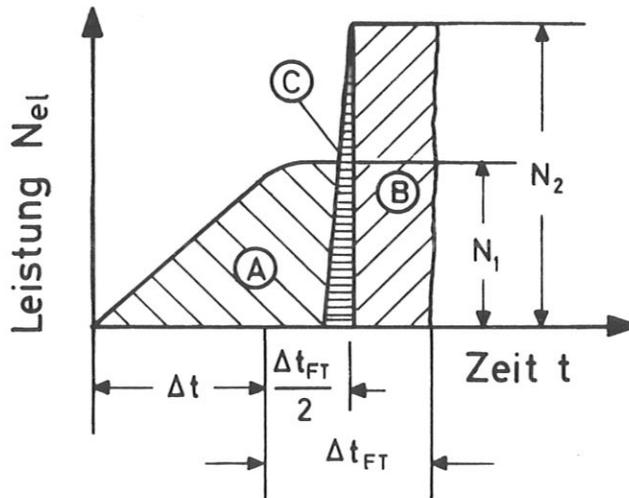
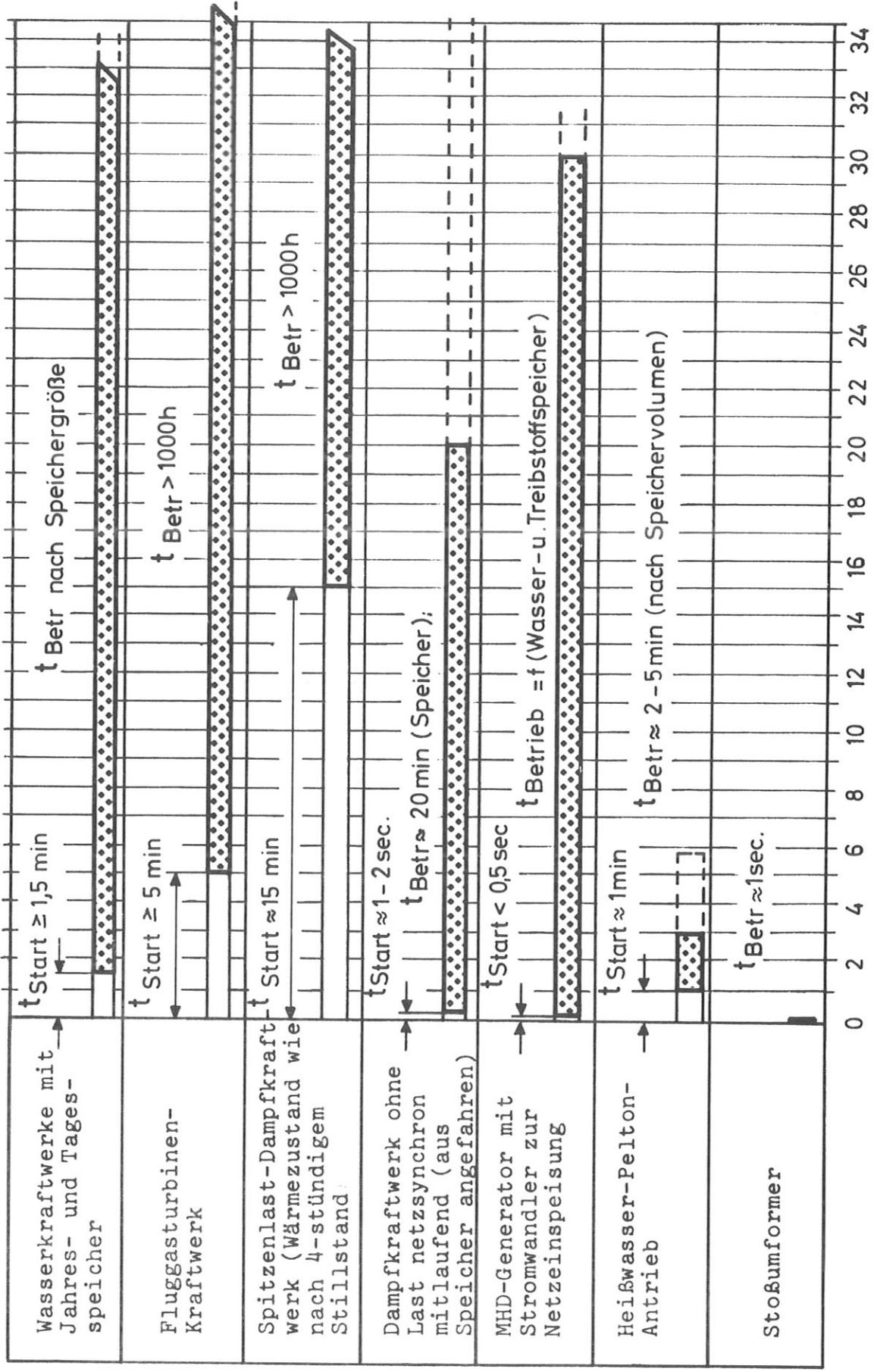


Bild 13. Mögliche Schaltung und Leistungsaufnahme des Magneten am Pulsator



Zeit in Minuten

Bild 14. Anfahr- und Betriebszeiten von Sofort- und Dauerreserveaggregaten

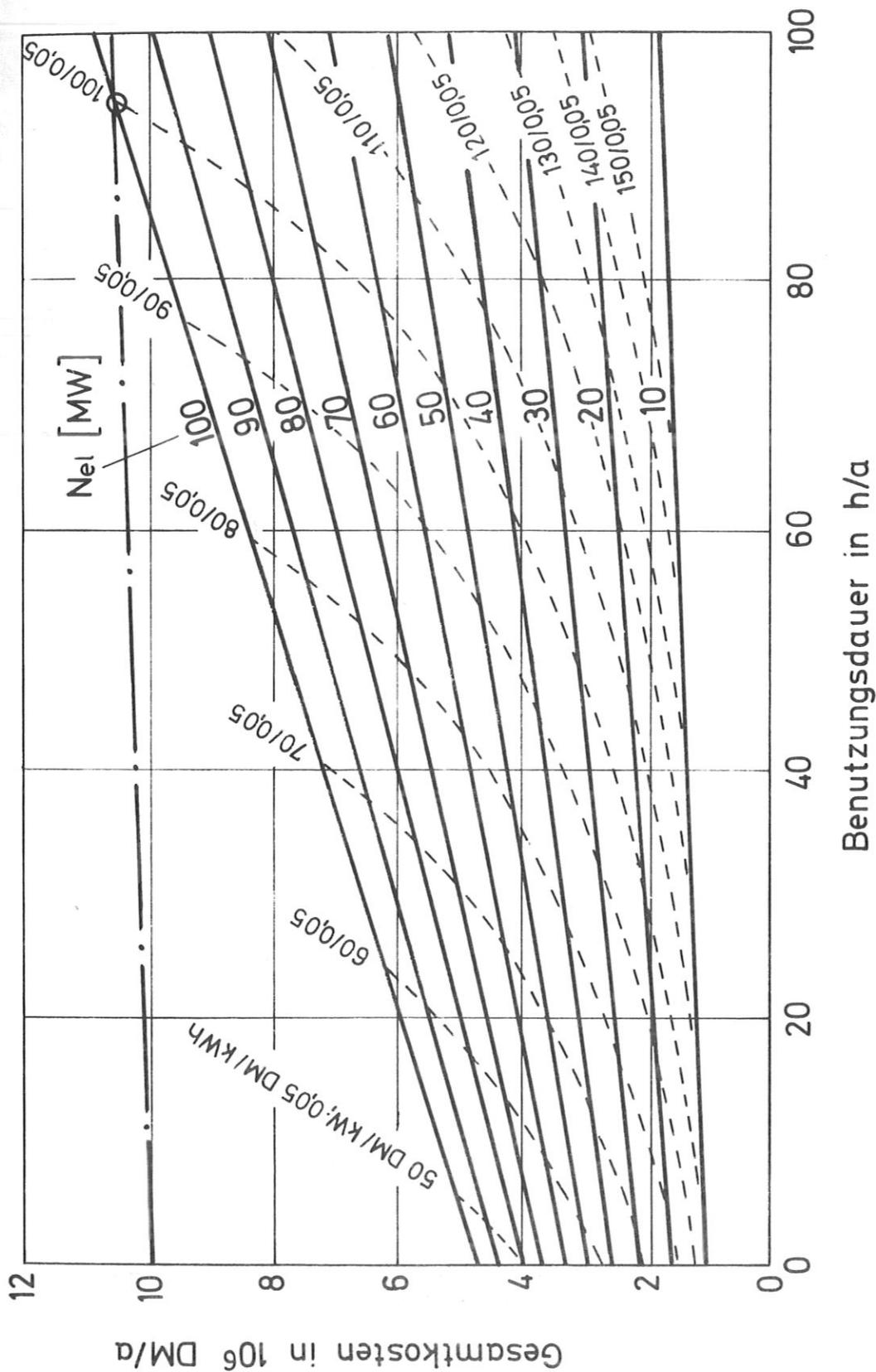


Bild 15. Jährliche Gesamtkosten der Stromerzeugung im MHD-Kraftwerk abhängig von der jährlichen Benutzungsdauer

(16 % Kapitaldienst + 2 % Wartung; Treibstoffpreis $0,08 \text{ DM/kWh}_{th}$; spez. Installationskosten nach Bild 10, Anlage für $t \leq 30 \text{ min}$, mit Schornstein)

- — — Gesamtkosten bei Strombezug von 100 MW zu 100 DM/kWh und $0,05 \text{ DM/kWh}$;
- — — Gesamtkosten bei MHD-Stromerzeugung

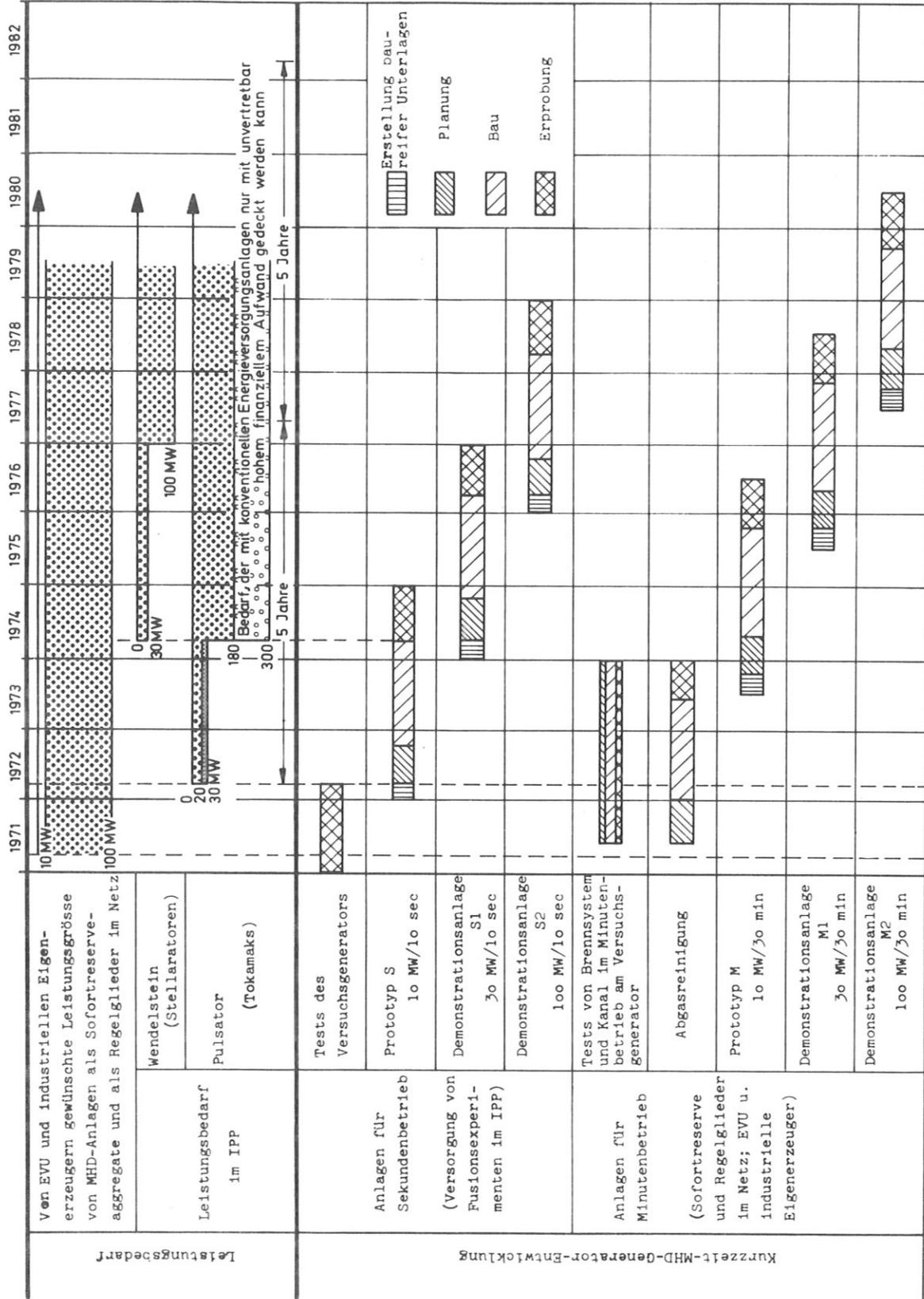


Bild 16.
Planungsvorschlag für die Entwicklung des Kurzzeit-
Verbrennungs-MHD-Generators