Elektronische Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen in Fusionsanlagen

Autor(en): **Maier, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 23

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905041

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

Elektronische Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen in Fusionsanlagen

F. Maier

621.318.57:621.039.6;

Für das Gelingen der Energiegewinnung durch gesteuerte Kernfusion sind Einschluss und Heizung eines vollionisierten Plasmas wesentliche Vorbedingungen. Sie sollten durch Mittel der Elektrotechnik erreicht werden können. Die für die Einleitung eines Fusionsvorganges erforderliche elektromagnetische Energie soll bei gutem Wirkungsgrad gespeichert und durch eine geeignete Kommutierungsschaltung vom Speicher wirkungsvoll in das Plasma übertragen werden. Die damit zusammenhängenden Probleme der Supraleitung und das Schalten sehr grosser Gleichströme stellen hohe Ansprüche an die technische Entwicklung und Schaltungstechnik. Es werden neue elektronische Schaltungen beschrieben, welche kontaktloses Kommutieren sehr grosser Gleichströme ermöglichen.

Pour obtenir de l'énergie par fusion nucléaire contrôlée, il importe avant tout qu'un plasma entièrement ionisé puisse être enfermé et chauffé, ce qui devrait être réalisé par des moyens électrotechniques. L'énergie électromagnétique requise pour amorcer la fusion doit être emmagasinée avec un bon rendement et transmise efficacement au plasma par des circuits de commutation appropriés. Les problèmes de supraconduction et de couplage de courants continus de très forte intensité posent de très grandes exigences au développement de la technique, notamment de celle du couplage. De nouveaux circuits électroniques sont décrits, qui permettent de commuter sans contact des courants continus de très forte intensité.

1. Einleitung, Übersicht zum Problem der kontrollierten Kernfusion

1.1 Energiewandlung durch Kernfusion

Aus dem Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon für die verschiedenen Atomkerne ergibt sich, dass Kernenergie nicht nur durch Spaltung schwerer Atomkerne, sondern auch durch Verschmelzung (Fusion) leichter Kerne gewonnen werden kann [1]. Derartige Prozesse laufen in den Fixsternen ab. Auf der Erde ist es bisher nur in unkontrollierter Form (Wasserstoffbombe) gelungen, grössere Mengen von Fusionsenergie freizusetzen. Wahrscheinlich bedarf es noch sehr grosser Anstrengungen, um die Energiegewinnung durch Fusion im technischen Maßstab unter irdischen Bedingungen zu verwirklichen [2].

Damit eine Kernfusion eintreten kann, müssen die gegeneinander bewegten Kerne genügend Energie besitzen, um die *Coulomb*-Barriere zu überwinden. Dazu wird ein vollionisiertes Plasma gebraucht. Aus theoretischen Überlegungen ergibt sich, dass neben der Plasmatemperatur das Produkt aus Teilchendichte n und Einschlusszeit τ ein entscheidender Parameter des Fusionsprozess ist (*Lawson*-Kriterium: $n\tau > 10^{14}$ s/cm³ bei $T = 100 \cdot 10^6$ K).

Da die nötigen Stossenergien im Plasma erst bei sehr hohen Temperaturen erreicht werden und Kettenreaktionen nur bei in grosser Anzahl auftretenden Stössen zu erwarten sind, wird dieser Vorgang als *thermo-nukleare Reaktion* bezeichnet. Zur rationellen Energiegewinnung müssen Teilchendichten der Grössenordnung $10^{15}...10^{17}$ Teilchen pro cm³ angestrebt werden. Das heisse Plasma muss mehrere Sekunden bei stabilem Einschluss existieren. Somit können für die thermo-nukleare Reaktion folgende wesentliche Grundbedingungen angegeben werden:

- hinreichende Dichte und Ausdehnung des Plasmas über genügend lange Zeiträume (Plasmaeinschluss);
- hohe Reinheit der Entladung (keine Verunreinigung durch direkte Wandberührung: Einschluss durch magnetisches Feld);
- Aufrechterhaltung der Minimaltemperaturen (Plasmaheizung).

1.2 Plasmaeinschluss

Es muss verhindert werden, dass das Hochtemperaturplasma mit festen Umhüllungen in Berührung kommt. Es gibt drei bekannte Mechanismen für den Einschluss eines thermonuklearen Plasmas, nämlich

- Gravitationseinschluss (Fixsterne: $n = 10^{23}...10^{26}$/cm³, $T = 10^7...10^8$ K),
- Trägheitseinschluss (Laser-Elektronen-Ionenstrahlen),
- Magnetfeldeinschluss.

Da geladene Teilchen durch ein Magnetfeld beeinflusst werden, kann ein aus solchen Teilchen bestehendes Plasma durch ein elektromagnetisches Feld eingeschlossen werden [1]. Dafür werden offene Systeme (z.B. zylindrische Plasmagleichgewichte gemäss Fig. 1) oder geschlossene (toroidaler Einschluss gemäss Fig. 2) verwendet. In Figur 1a wird das Magnetfeld um die Zylinderachse erzeugt. Wird diesem Feld noch ein äusseres in Richtung der Achse wirkendes überlagert, so entsteht resultierend ein schraubenförmiger Feldlinienverlauf (Fig. 1b).

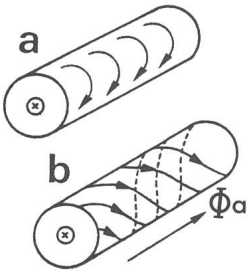

Fig. 1
Zylindrische Plasmagleichgewichte
a Durch Plasmastrom in der Zylinderachse erzeugtes Feld
b Schraubenförmiges Feld

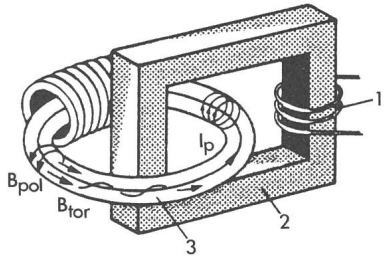

Fig. 2 Toroidaler Plasmaeinschluss durch TOKAMAK
1 Primärwicklung
2 Transformatorkern
3 Plasma
B_{pol} polares Magnetfeld
B_{tor} toroidales Magnetfeld
I_p Plasmastrom

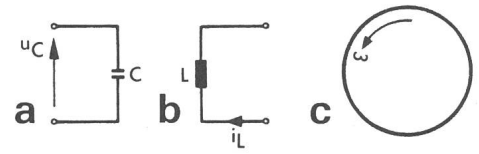

Fig. 3 Vergleich des Speichervermögens von Energiespeichern (Formeln)

a Kapazitiv (Kondensator)

$$W_c = \frac{CU^2}{2} \quad [\mathrm{Ws}]$$

$$w_c = \frac{\varepsilon E^2}{2} = \frac{\underline{E}\underline{D}}{2} \quad [\mathrm{Ws/m^3}]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o \quad [\mathrm{F/m}]$$

$$\varepsilon_o = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad [\mathrm{F/m}]$$

b Induktiv (Spule)

$$W_\mu = \frac{LI^2}{2} \quad [\mathrm{Ws}]$$

$$w_\mu = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{\underline{B}\underline{H}}{2} \quad [\mathrm{Ws/m^3}]$$

$$\mu = \mu_r \mu_o \quad [\mathrm{H/m}]$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\mathrm{H/m}]$$

c Mechanisch (Schwungrad)

$$W_m = \frac{J\omega^2}{2} \quad [\mathrm{Ws}]$$

$$w_m = K\frac{\sigma}{\rho} \quad [\mathrm{Ws/m^3}]$$

$$K = \frac{1}{V}\int_V \frac{\sigma}{\sigma_{tmax}}\,\mathrm{dm} \quad [\mathrm{kg/m^3}]$$

σ [N/m²]	örtliche Spannung
σ_{tmax} [N/m²]	maximale Tangentialspannung
ρ [kg/m³]	Materialdichte
V [m³]	Volumen
dm [kg]	Massenelement

Durch Verbiegen dieser Anordnung und Zusammenfügen der Enden ergibt sich die toroidale Einschlusskonfiguration des Tokamak. Als Vorteil einer solchen geschlossenen Anordnung wird gewertet, dass die Feldlinien endlos sind und daher das heisse Plasma, das sich frei entlang der Feldlinien bewegt, nicht durch Kontakt mit materiellen Wänden abgekühlt oder verunreinigt wird. Das toroidale (achsenparallele) Magnetfeld wird durch stationär betriebene Spulen erzeugt. Da ein heisses Plasma infolge Inhomogenität des Feldes gegen die Aussenwand driftet, muss dies durch Tordierung der Feldlinien verhindert werden. Dies kann auf verschiedene Weise erfolgen.

Beim Tokamak wird durch Induktion mit Hilfe eines Transformators ein starker achsenparalleler Strom I_p induziert, wobei der Plasmatorus als Sekundärwicklung wirkt. Das polare Feld dieses Stromes addiert sich zum achsenparallelen toroidalen der Spulen und bewirkt so die Verdrillung. Der induzierte Strom I_p heizt auch das Plasma. Die Heizwirkung nimmt jedoch mit zunehmender Plasmatemperatur ab, da bei $\approx 10^6$ K die Leitfähigkeit von Kupfer erreicht wird. Weitere zusätzliche Heizmethoden sind aber möglich und auch erfolgreich erprobt worden (Einstrahlung von Hochfrequenzenergie, Einschuss energiereicher neutraler Teilchen).

Ein Tokamak kann wegen des erforderlichen Induktionsstromes I_p nicht stationär betrieben werden. Weltweit werden jedoch dieser Anordnung die grössten Chancen im Hinblick auf die Fortentwicklung zu einem Fusionsreaktor gegeben. Die Erfolge der letzten Jahre geben Anlass zu der Hoffnung, in Tokamaks zu Fusionsplasmen vorzustossen, wie sie im Reaktorbetrieb erforderlich sind [2...5].

1.3 Energiespeicher

Die für den Betrieb eines Tokamaks periodisch erforderliche impulsförmige Energie kann aus praktischen Gründen nicht direkt einem elektrischen Netz entnommen werden [6; 7; 8]. Sie wird über längere Zeit bei geringerer Leistung

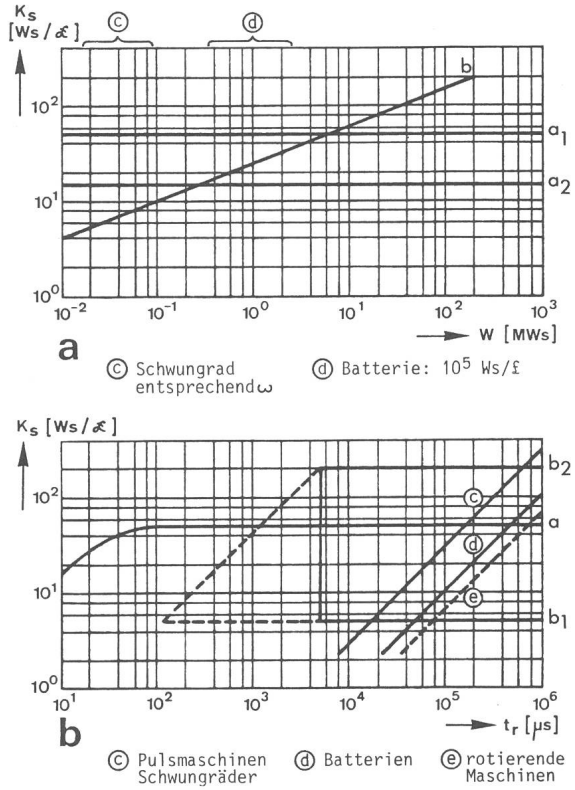

Fig. 4 Kehrwert der relativen Energiespeicherkosten in Abhängigkeit der gespeicherten Energie W(a) und der Stromanstiegszeit t_r (b)

a a_1 langsam, a_2 schnell } Kondensatoren
b Induktivität einschliesslich Speisung

b a Kondensatoren
b_1 20 kWS, b_2 200 MWs } Induktivität einschliesslich Speisung

durch Speicherung in Kondensatoren, Induktivitäten oder rotierenden Maschinen aus dem Versorgungsnetz für den Impulsbetrieb bereitgestellt (Fig. 3).

Zu den wichtigsten Eigenschaften, nach welchen Energiespeicher zu beurteilen sind, gehören die Energiedichte und die Leistungsdichte. Die eine ergibt die Energie, die pro Volumen- oder Gewichtseinheit gespeichert werden kann, die andere die mögliche Leistungsentnahme bzw. Entladedauer.

Nach [9] ergibt sich eine gute Wirtschaftlichkeit für einen Energiespeicher, wenn die Speicherkosten ungefähr jenen der im Speicher transferierten Energie während der Anwendungszeit des Speichers entsprechen. Für die vorgenannten Energiespeicher gilt folgende Rangordnung hinsichtlich Energiedichte:

- Kapazität: $W_C = 0{,}1...0{,}2$ Ws/cm³
- Induktivität: $W_\mu \leqq 100$ Ws/cm³
- Schwungrad: $W_k \leqq 280$ Ws/cm³ (für Stahl)
  $W_k \leqq 800$ Ws/cm³ (für Faserwerkstoffe)

Für die bei Fusionsanlagen geforderten Energien im Bereich von GWs scheidet die Kapazität aus Preisgründen aus [9]. Normalleitende induktive Speicher sind auch billiger als rotierende Maschinen, sofern die Entladezeit 0,1 s unterschreitet (Fig. 4). Durch Verwendung supraleitender Speicherinduktivitäten kann eine massgebliche Kostenerniedrigung erreicht werden [6; 10].

Kosten der Energiespeicher Tabelle I

Speicher	Minimale Entladungszeit τ_E(s)	Kosten K(DM/Ws)
Kapazität	$\geqq 2{,}10^{-7}$	0,40...2,0
Induktivität	$\geqq 10^{-5}$	0,20
Schwungrad	$\geqq 0{,}5$	0,10...0,30

Für die Entladegeschwindigkeit gilt die gleiche Rangordnung mit Kondensatoren für schnelle Entladungen im µs-Bereich, Induktivitäten im ms-Bereich und mechanische Speicher im s-Bereich. Für die Speicherkosten gelten die in Tabelle I angegebenen Werte [3].

Kapazitive Speicher: Die Energiedichte des elektrischen Feldes ist gering. Sie ist proportional dem Produkt εE^2. Die Entladung kann unipolar oder durch Schwingungen erfolgen. Die Lebensdauer der Speicherkondensatoren ist abhängig von den Schaltkreisbedingungen.

Induktive Speicher: Untersuchungen haben ergeben, dass ein Kostenminimum für induktive Energiespeicherung erreicht wird, wenn die Kosten des Speichers jenen des Speisesystems (Transformator, Stromrichter) entsprechen. Dabei betragen die Totalkosten der induktiven Speicherung ungefähr 10% der Kosten bei entsprechender kapazitiver Speicherung.

Die gespeicherte Energie ist proportional dem Produkt $B \cdot H$. Bei Luftinduktivitäten wird ein grosser Wert für dieses Produkt erreicht. Bei konstantem Strom wird im Zeitraum von einer halben Zeitkonstante ($\Delta t = \tau/2 = L/2R$) ebensoviel Energie durch Verluste verbraucht als gespeichert wurde. Daher sollte in solchen Speichern die Energie nicht länger als gefordert gespeichert werden.

Mechanische Speicher: Kennzeichnend für den mechanischen Energiespeicher ist seine geringe Leistungsdichte. Die Energieentnahme kann also nicht so kurzzeitig wie beim kapazitiven oder induktiven Speicher erfolgen. In rotierenden Maschinen können etwa 100 Ws/cm³ gespeichert werden.

Die in Fusionsversuchsanlagen verwendeten Lastkreise ermöglichen höchstens ein Verhältnis der Impulsleistung/Nennleistung von 10:1. Es ist daher während einer Halbperiode des Stromes nur möglich, ≈ 6% der gespeicherten Energie zu entnehmen. Folgende Besonderheiten der verschiedenartigen mechanischen Energiespeicher sind zu erwähnen:

Synchronmaschinen: Das Speichervermögen und die Entladegeschwindigkeit werden durch die elektromagnetischen und mechanischen Beanspruchungen bzw. durch die Maschinenreaktanz begrenzt. Synchronmaschinen können in Kombination mit einem Stromrichter auch für das Aufladen induktiver Speicher verwendet werden.

Homopolare Gleichstrommaschinen: Auch solche Maschinen können für die Erzeugung von Hochstromimpulsen eingesetzt werden. Sie eignen sich am besten für Impulse längerer Dauer (Bruchteile von Sekunden). Es wurden Ströme bis gegen 200 kA bei 90 V Spannung erreicht.

Schwungrad: Durch Anordnung eines Schwungrades auf der Motorgeneratorwelle kann die kinetische Energie des Generators erhöht werden. Aus Figur 3 kann entnommen werden, dass die Energiedichte des Schwungrades von den Parametern K und σ/ϱ abhängt. Eine wesentliche Steigerung des Werkstoffaktors σ/ϱ ist lediglich durch hochzugfeste Faserwerkstoffe erreichbar. Eine weitere Möglichkeit für die Steigerung der Energiedichte besteht in der Erhöhung des Nutzungsfaktors K. Er kann aus der Spannungsverteilung des Schwungrades bestimmt werden.

Für alle Speicher (Kapazität, Induktivität, rotierende Masse) gilt die Gesetzmässigkeit, dass bei einem Speichervorgang ebensoviel Energie in Wärme umgesetzt wird, als nach Abschluss dieses Vorganges im Speicher enthalten ist.

Es ergibt sich die paarweise Zuordnung der physikalischen Grössen $CU - LI - J\varphi$. Jede Energiespeicherung bedingt also einen Ausgleichsvorgang für Spannung, Strom und Winkelgeschwindigkeit zwischen zwei Systemen (Speisenetz - Speicher), die sich in verschiedenem Zustand befinden. Dabei wird elektrische Energie in Wärme umgesetzt.

2. Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen

2.1 Hochstrom-Impulssysteme

Fusionsversuchsanlagen können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Eine Möglichkeit ist die Art des Plasmaeinschlusses und der dazu erforderlichen Feldkonfiguration). Ein weiteres Kriterium bildet die Art des verwendeten Hochstrom-Impulssystems. Entsprechend der Anstiegszeit und Impulsdauer werden folgende Hochstrom-Impulssysteme unterschieden:

- Systeme mit relativ langsamer, quasi-gleichstrommässiger Impulstechnik mit einer Impulsdauer von der Grössenordnung Sekunden;
- Systeme mit mittelschneller Impulstechnik, Impulsdauer in der Grössenordnung von ms;
- Systeme mit schneller Impulstechnik, Impulsdauer von der Grössenordnung µs.

Ein Hochstrom-Impulssystem besteht allgemein aus einem Energiespeicher, einem Leitungssystem, welches Energiespeicher und Last verbindet, sowie einem Schalter, der das Aufschalten des Speichers an die Last zu einem definierten Zeitpunkt ermöglicht (Fig. 5). Die Art der Last (resistiv, induktiv) ist bei den verschiedenen Fusionsversuchen vorwiegend durch deren jeweilige plasmaphysikalische Gegebenheiten bestimmt. Sie erscheint im allgemeinen Fall als Reihenschaltung einer veränderlichen Induktivität mit einem veränderlichen Wirkwiderstand (temperaturabhängige Leitfähigkeit des Plasmas).

2.2 Impulserzeugung und Übertragung durch Stromkommutierung mit herkömmlichen Schaltungskomponenten

In Figur 5 sind verschiedene Schaltungen mit induktivem Energiespeicher und mechanischem Schalter dargestellt. Dabei erfolgt die Energieübertragung vom Speicher L_S auf die Lastinduktivität L_V durch Öffnen des mechanischen Schalters S. Die auf L_V übertragene Energie ergibt sich zu

$$W_v = \frac{1}{2} L_s I_s^2 \left(\frac{L_v}{L_s + L_v}\right)^2$$

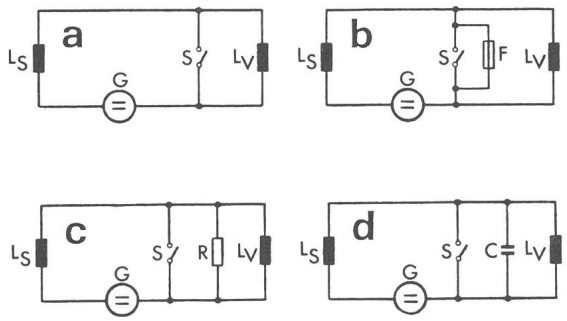

Fig. 5 Herkömmliche Kommutierungsschaltungen zur Energieübertragung aus einem induktiven Speicher

a Grundschaltung
b Mit Schalter und Sicherung
c Mit Schalter und Widerstand
d Mit Schalter und Kondensator für Zwischenspeicherung
G Gleichstromquelle
L_S Speicherinduktivität
L_V Verbraucherinduktivität
S Schalter
F Sicherung
R Widerstand
C Kondensator

Im günstigsten Fall ($L_S = L_V$) wird ein Viertel der gespeicherten Energie auf den Verbraucher übertragen. Ebensoviel verbleibt im Speicher L_S. Die Hälfte der Energie geht also als Verlust ΔW im Schalter verloren. Für diese Energieverluste ist weder der Widerstand noch die Geschwindigkeit des Widerstandsanstieges im Schalter von Bedeutung. Aus Tabelle II kann die Wirksamkeit der Energieübertragung in Abhängigkeit des Induktivitätsverhältnisse L_V / L_S entnommen werden.

Durch kapazitive Zwischenspeicherung mit einem Parallelkondensator gemäss Figur 5d können jedoch die Energieverluste ΔW vermieden werden [6]. Es ergibt sich der in Figur 6 dargestellte Verlauf für Spannung und Strom in den Schaltungskomponenten *C*, L_S und L_V. Der Kondensator muss dabei die Hälfte der in L_S gespeicherten Energie aufnehmen können. Wegen der geringen Energiedichte kapazitiver Speicher bedingt diese Schaltung einen erheblichen Aufwand für den Kondensator. Für die Wirksamkeit einer solchen Energieübertragung besteht die Abhängigkeit gemäss Tabelle III [9].

Die in relativ kurzen zeitlichen Abständen zu wiederholende Impulserzeugung und Übertragung bedingt einen periodischen Schaltbetrieb ($\Delta t \approx 10$ min). Dabei müssen Ströme von 100 kA und auch mehr kommutiert werden. Naturgemäss erscheinen mechanische Schalter wegen des unvermeidlichen Kontaktabbrandes für einen solchen Betrieb wenig geeignet. Es wurden sehr grosse Anstrengungen zur Lösung des Schalterproblems in solchen Fusionsanlagen unternommen [7; 11; 12; 13]. Die Stromkommutierung kann erleichtert werden, indem mit einem Entladestromstross aus einer Kondensatorbatterie in Gegenrichtung zum Laststrom dessen Nulldurchgang kurzzeitig erzwungen wird. Die Synchronisierung der Schalterkontaktebewegung stellt jedoch beachtliche Anforderungen an einen solchen Schalter [12; 13].

Wirksamkeit resistiver Energieübertragung [9] Tabelle II

Induktivitäts-verhältnis L_V/L_S	Übertragene Energie / Gespeicherte Energie W_V/W_S	Energieverluste / Übertragene Energie W_R/W_V	Strom-verhältnis I_S/I_V
3	0,188	4	4
2	0,222	3	3
1,0	0,25	2	2
0,6	0,234	1,6	1,6
0,2	0,14	1,2	1,2

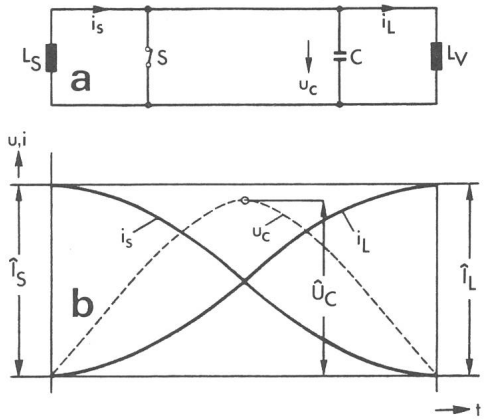

Fig. 6 Kapazitive Energieübertragung mit Zwischenspeicherung [6]

a Ersatzschaltbild
b Verlauf von Spannung und Strom

2.3 Stromkommutierung mit elektrischen Ventilen auf einen Lastkreis

Grundsätzliche Überlegungen zum Einsatz von elektrischen Ventilen für den Energieaustausch zwischen Schaltkreisen sind in der Patentschrift [14] enthalten.

Bei der in [15] dargestellten Schaltung (Fig. 7) erfolgt der Energieaustausch zwischen Speicher- und Lastinduktivität ohne mechanischen Schalter durch elektrische Ventile (Thyratron). Dabei wird die Energie durch kapazitive Zwischenspeicherung bei entsprechend gutem Wirkungsgrad übertragen. Diese Wechselrichterschaltung ist jedoch ziemlich aufwendig. Sie erfordert mindestens fünf steuerbare Ventile sowie zusätzlich zum Parallelkondensator (Zwischenspeicher) einen Kommutierungskondensator. Die gesteuerten Ventile (1), (2), (3) und (4) bilden eine Brückenschaltung. Es werden jeweils diagonal gegenüberliegende Ventile gleichzeitig gezündet (1–2, 3–4). Der über den Kommutierungs-

Wirksamkeit kapazitiver Energieübertragung Tabelle III

Induktivitätsverhältnis L_V/L_S	Übertragene Energie / Gespeicherte Energie W_V/W_S	Kondensatorenergie / Übertragene Energie W_C/W_V
1,0	1,0	0,5
0,8	0,99	0,46
0,6	0,94	0,4
0,4	0,82	0,35
0,3	0,71	0,32
0,2	0,55	0,3
0,1	0,33	0,28

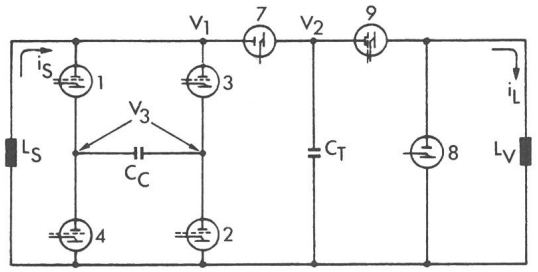

Fig. 7 Induktives Energiespeichersystem mit Ignitronsteuerung [15]

L_S Speicherinduktivität
L_V Lastinduktivität
C_C Kommutierungskondensator
C_T Zwischenspeicherkondensator
1...4 Brückenventile (gesteuert)
7 Sperrdiode
8 Freilaufdiode
9 Speicherventil (gesteuert)

kondensator C_C fliessende Anteil des Speicherstromes i_s bedingt je nach Stromrichtung eine alternierende Kondensatorspannung, so dass der Kondensator für den nachfolgenden Löschvorgang stets die richtige Polarität hat und beim Zünden des folgenden Ventilpaares durch das Umschwingen die Löschung der vorher leitenden Ventile bewirkt.

Ein Teil des Speicherstromes i_s fliesst bei positivem Anodenpotential V_1 über das ungesteuerte Ventil (7) und den Zwischenspeicher-Kondensator C_T. Dieser wird dadurch aufgeladen. Die Entladung von C_T auf den Verbraucherkreis L_V erfolgt durch Zündung des gesteuerten Ventils (9). Parallel zur Verbraucherinduktivität L_V ist das Ventil (8) als Freilaufdiode geschaltet. Diese leitet stets während der Aufladephase des Kondensators C_T. Wird die gesamte Energie aus dem Speicherkreis L_S übertragen, so leitet die Freilaufdiode dauernd. Der Ventil- und Steueraufwand bei dieser Schaltung ist erheblich, da Reihen- und Parallelschaltung von Ventilen erforderlich sind.

In den Patentschriften [16; 17] wird eine Kommutierungsschaltung mit einem gesteuerten Freilaufkreis und einem separaten Löschkreis angegeben (Fig. 8). Die Kommutierung des Speicherstromes erfolgt durch Wechselrichteraussteuerung ($U_d < 0$) des Speisegleichrichters (4) bei gleichzeitiger Zündung des Freilaufthyristors (81). Dabei kommutiert der Laststrom vom Kreis (A) auf den Kreis (B). Gleichzeitig mit dieser Kommutierung vollzieht sich der Stromunterbruch in den Schaltern (5) und (6). Diese können somit stromlos geöffnet werden. Nach Zündung des Löschthyristors (82) erfolgt die Kommutierung des Laststromes vom Freilaufkreis (B) auf den Löschkreis (82–83–84). Nach Umpolung der Spannung des Löschkondensators (84) durch den Laststrom kommutiert dieser schliesslich auf den Entregungskreis (C) mit dem Widerstand (7).

Die Impulserzeugung erfolgt also durch Kommutierung des Stromes auf einen Widerstand, über welchen die Speicherinduktivität entladen wird. Die über dem Widerstand abfallende Entregungsspannung bedingt die Reihenschaltung von Ventilen im Freilauf- und Löschkreis. Somit ergibt sich auch bei dieser Schaltung ein beachtlicher Ventil- und Steueraufwand. Ausserdem besteht der Nachteil des schlechten Wirkungsgrades bei resistiver Entladung.

In der Patentschrift [18] wird im Gegensatz zu [15] eine einfache Schaltung mit gutem Wirkungsgrad bei kapazitiver Zwischenspeicherung angegeben (Fig. 9). Sie enthält einen mechanischen Schalter im Speicherkreis, welcher zur Einleitung des Übertragungsvorganges geöffnet werden muss. Da der Übertragungs- und Umschwingkreis (C-T_1-L_V) die Lastinduktivität L_V enthält, ergibt sich eine entsprechend lange Umschwingzeit des Kondensators C bis das Ventil T_1 durch Zündung des Ventils T_2 wieder gesperrt werden kann.

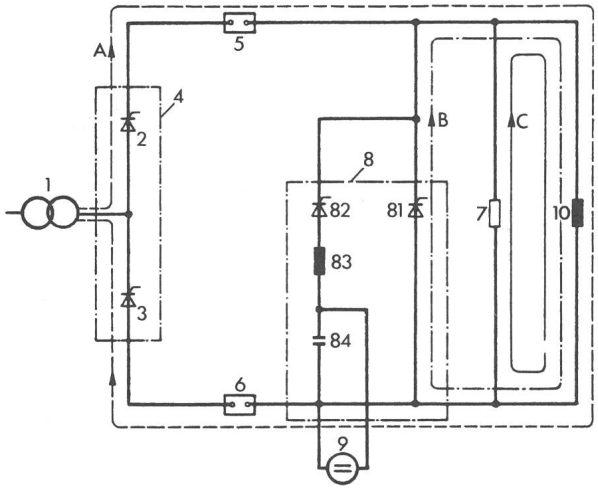

Fig. 8 Induktives Energiespeichersystem mit gesteuertem Freilaufkreis und separatem Löschkreis [16; 17]

1 Transformator
2, 3 Stromrichterventil
4 Stromrichter
5, 6 Schalter
7 Widerstand
8 Löschkreis und Freilaufventil
81 Freilaufventil
82 Löschventil
83 Löschkreisinduktivität
84 Löschkreiskondensator
9 Ladestromquelle für 84
10 Verbraucherinduktivität

2.4 Vereinfachte Kommutierungsschaltungen

Der naturgemäss grosse Ventilaufwand infolge Reihen- und Parallelschaltung zwingt zu einer Vereinfachung der bisher bekannten Schaltungen.

Für die neuen Schaltungen [19; 20] können folgende kennzeichnenden Merkmale angegeben werden:

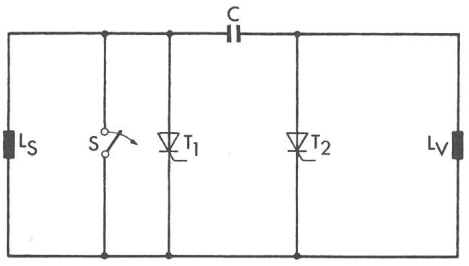

Fig. 9 Energieübertragung zwischen zwei Induktivitäten durch kapazitive Zwischenspeicherung [16]

L_S Speicherinduktivität
L_V Lastinduktivität
C Kondensator
S Schalter
T_1, T_2 gesteuerte Ventile

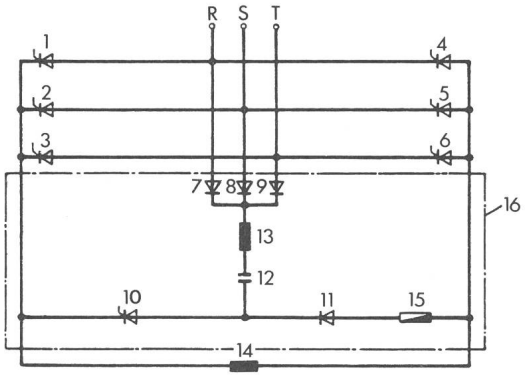

Fig. 10 Induktives Energiespeichersystem mit gemeinsamem, gesteuertem Freilauf- und Löschkreis und zweistufiger Kommutierung [19]

1...6	Stromrichterventile	13	Löschkreisinduktivität
7, 8, 9	Entkopplungsdioden	14	Lastinduktivität
10	Lösch- und Freilaufthyristor	15	Entregungswiderstand
11	Freilauf- und Entkopplungsdiode	16	Thyristorschalter und Freilaufkreis
12	Löschkondensator		

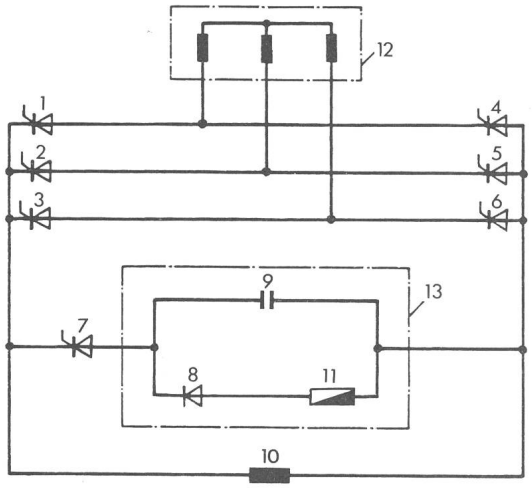

Fig. 11 Thyristorschalter für einstufige Kommutierung [19]

1...6	Stromrichterventile	11	Entregungswiderstand
7	Lösch- und Freilaufventil	12	Sekundärwicklungen des Transformators
8	Entkopplungs- und Freilaufdiode	13	Thyristorschalter und Freilaufkreis
9	Löschkondensator		
10	Lastinduktivität		

- Verwendung der Ventile des Speisestromrichters als Schaltthyristoren;
- gemeinsamer Stromzweig des Lösch- und Freilaufkreises, wodurch das Kommutierungsventil gleichzeitig als Freilaufventil wirkt;
- vollständige Ausnutzung der gespeicherten Impulsenergie durch Erzeugung unipolarer oder bipolarer Impulse.

2.4.1 Kommutierungsschaltungen mit resistivem Entladekreis

Brückenschaltung mit zweistufiger Kommutierung: Bei der in Figur 10 dargestellten Schaltung wird die Stromkommutierung vom Speise- auf den Freilaufkreis durch Kombination eines herkömmlichen Löschkreises (Komponenten 7...10, 12, 13) mit einem gesteuerten Freilaufkreis (10, 11, 15) erreicht. Bei Zündung des Lösch- und Freilaufventils (10) und gleichzeitiger Sperrung der Zündimpulse der Brükkenventile werden die gerade leitenden Ventile einer Brükkenhälfte (z.B. 1, 2, 3) durch den von der Kondensatorspannung getriebenen Löschstrom gelöscht. Der Speicherstrom i_d einer Brückenhälfte kommutiert somit auf den Löschkreis. Nach Umpolung des Löschkondensators durch den Strom i_d beginnt die Kommutierung von den Ventilen der zweiten Brückenhälfte (4, 5, 6) auf den Entregungskreis (11, 15). Der durch den Entregungswiderstand (15) bewirkte Stromabbau in (14) bedingt eine entsprechende Flussänderung im Transformator des Tokamak und somit einen Stromimpuls im Plasmakreis.

Brückenschaltung mit einstufiger Kommutierung: Die in Figur 11 dargestellte Schaltung ermöglicht die kontaktlose Trennung des Speisekreises in einer Stufe. Grundsätzlich kann auch eine halbgesteuerte Brückenschaltung als Speisestromrichter verwendet werden. Die Löschung der Stromrichterventile (1...6) erfolgt praktisch gleichzeitig bei Zündung des Lösch- und Freilaufventils (7). Der über einem parallel zu (7) liegenden Ladekreis (antiparallele Diode mit Reihenwiderstand) stets richtig aufgeladene Löschkondensator (9) schwingt über die genannten Stromrichterventile und die Transformatorsekundärwicklungen (12) um. Der Strom i_d kommutiert vom Stromrichter auf den Löschkreis (7, 9) und fliesst bis zur Umpolung des Kondensators (9) über diesen. Nach erfolgter Umpolung beginnt die Kommutation des Speicherstromes auf den Entregungskreis (8, 11). Der durch den Entregungswiderstand (11) bewirkte Stromabbau bedingt wiederum eine entsprechende Flussänderung im Transformator des Tokamak und einen Stromimpuls im Plasmakreis.

2.4.2 Kommutierungsschaltungen bei kapazitiver Zwischenspeicherung

Um den von der Widerstandsentregung bedingten schlechten Wirkungsgrad der Energieübertragung in den Plasmakreis zu verbessern, wurde eine Schaltung mit kapazitiver Zwischenspeicherung angegeben (Figur 12). Dabei erfolgt die Energieauskopplung aus dem Speicher- in den Plasmakreis schrittweise bei niedriger Spannung. Damit kann die Reihenschaltung von elektrischen Ventilen vermieden werden. Dies bedingt eine wesentliche Reduktion des Ventilaufwandes. Für die in Figur 12 dargestellte Schaltung ergibt sich folgender Wirkungsablauf:

- *Ladevorgang der Speicherinduktivität:* Die Speicherinduktivität (17) wird während längerer Zeit über den gesteuerten Stromrichter (Ventile 1...6) auf das erforderliche Energieniveau (Speicherstrom I_d) aufgeladen.

- *Kommutierungsvorgang auf den Freilaufkreis (9–11–16):* Bei Zündung des Ventils (9) wird bei richtig gepoltem Kondensator (11) der Lösch- und Kommutierungsvorgang eingeleitet. Es werden die gerade leitenden Ventile (1, 2 oder 3 und 4, 5 oder 6) durch den Kondesatorstrom i_c gelöscht. Der Speicherstrom i_d fliesst somit über den Kondensator (11), und der Strom wurde auf den Freilaufkreis kommutiert. Nach Beendigung des Löschvorgangs ($i_c = i_d$) kann das Umschwingventil (7) gezündet werden. Der Kondensator schwingt entsprechend der geforderten Freihaltezeit um. Die Schaltthyristoren des Stromrichters, deren Steuerim-

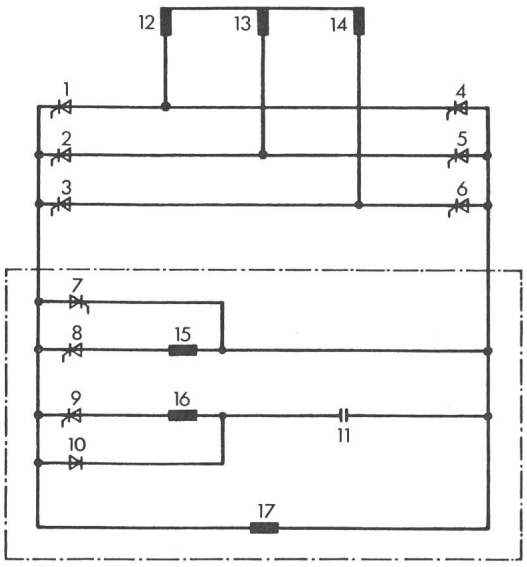

Fig. 12 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung [20] (einstufige Kommutierung)

1...6	Stromrichterventile	12, 13, 14	Transformatorwicklungen
7, 10	Rückladeventile		
8, 9	Freilauf- und Kommutierungsventile	15, 16	Kommutierungsinduktivitäten
11	Kommutierungskondensator	17	Speicherinduktivität

pulse bei Einleitung des Schaltvorganges bereits gesperrt werden müssen, sperren nach Ablauf ihrer Freiwerdezeit.

- *Kommutierungsvorgang zwischen den Freilaufventilen (8) und (9):* Der Speicherstrom i_d fliesst über den Löschkreis weiter, bis die Kondensatorspannung u_c einen bestimmten Wert erreicht hat. Sodann wird das Ventil (8) gezündet, und die so gepolte Kondensatorspannung bewirkt das Löschen des Ventils (9). Der Kondensator schwingt über das Ventil (10) um und erreicht wieder die Löschbereitschaft für den nächsten Kommutierungsvorgang. Dieser Umschaltvorgang mit kapazitiver Zwischenspeicherung wird fortgesetzt, bis der Strom in der Speicherinduktivität durch die natürliche Dämpfung auf null absinkt.

- *Impulsübertragung in den Plasmakreis:* Die mit den Ventilen (8) und (9) in Reihe geschalteten Induktivitäten

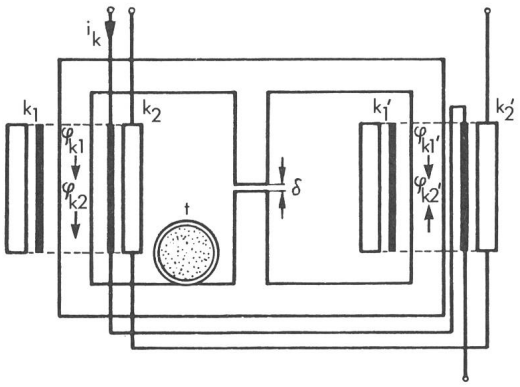

Fig. 13 Transformator mit gegenseitig entkoppelten Primärwicklungen [20]

k_1, k_1' Teilspulen der Induktivität 15
k_2, k_2' Teilspulen der Induktivität 16
t Plasmatorus

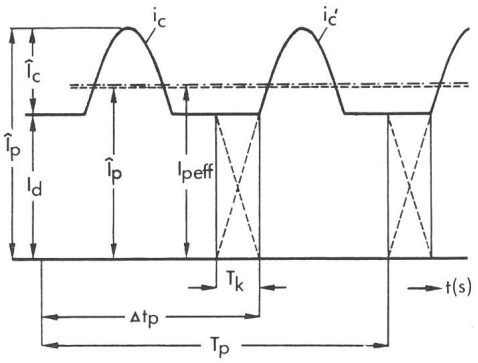

Fig. 14 Stromimpulsform bei kapazitiver Zwischenspeicherung und vernachlässigter Dämpfung [20]

T_k Kommutierungszeit
T_p Impulsperiode
Δt_p Stromimpulsdauer
$\hat{I}_p$ Scheitelwert des Primärstromes
I_d Gleichstrom des induktiven Speichers
$\hat{I}_c$ Scheitelwert des Umschwingstromes
I_p Mittelwert des Primärstromes
I_{peff} Effektivwert des Primärstromes

(15) und (16) werden als Transformatorwicklungen ausgebildet und auf einem Eisenkern gemäss Figur 13 angeordnet. Jede Wicklung besteht aus den Teilspulen k_1 und k_2 sowie k_1' und k_2', welche konzentrisch die beiden Aussenschenkel des Eisenkerns umfassen. In einem Fenster des Kerns befindet sich der als Sekundärwicklung wirksame Plasmatorus *t*. Die gewählte Wicklungsanordnung und Schaltung bewirkt, dass die Wicklungen *k* und *k'* (Induktivitäten 15 und 16) gegenseitig magnetisch entkoppelt sind und nur die Toruswicklung t induzieren können.

Die so ausgekoppelten Stromimpulse der Wicklungen *k* und *k'* ergeben einen wirksamen Beitrag zur Heizung des Plasmas und verbessern den Wirkungsgrad der Anlage massgeblich. In Figur 14 sind die dabei erzeugten Stromimpulse dargestellt. Deren Amplituden nehmen mit der natürlichen Zeitkonstante des Lastkreises entsprechend einer e-Funktion ab. Zur Verbesserung des Wirkungsgrades können diese Wicklungen supraleitend ausgeführt sein.

Bei Mittelpunktschaltung des Speisegleichrichters kann eine Kommutierungsschaltung gemäss Figur 15 verwendet werden. Dabei ist über die Entkopplungsdioden (4, 5, 6) ein Löschkreis (9, 12, 17) parallel zu den Stromrichterventilen (1, 2, 3) geschaltet. Die im Freilaufkreis liegende Diode (11) verhindert den Kurzschluss der Transformatorstrangspannungen über den Induktivitäten (13, 14, 15). Parallel zum vorgenannten Löschkreis wird wieder ein Freilaufkreis mit dem gesteuerten Ventil (8) und der Induktivität (16) geschaltet.

Der Ablauf der Kommutierungsvorgänge erfolgt sinngemäss zu den vorher beschriebenen.

3. Schlusswort

Bei den beschriebenen Schaltungen, welche die Anforderungen bei geringem Materialaufwand in optimaler Weise erfüllen, wurde also die Funktion des herkömmlichen mechanischen Schalters von elektrischen Halbleiterventilen

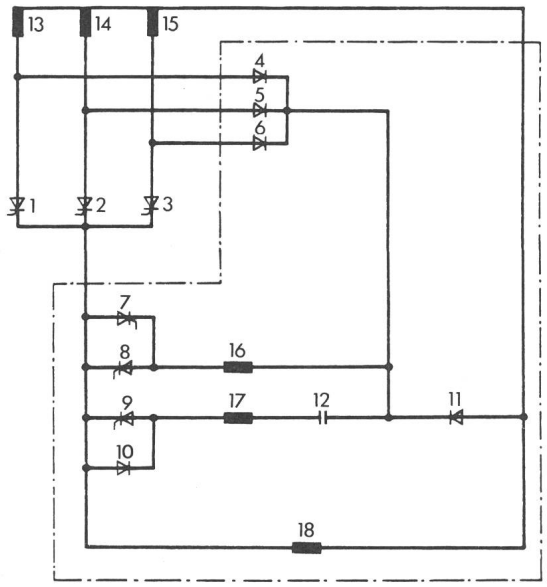

Fig. 15 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung (zweistufige Kommutierung) [20]

1, 2, 3	Stromrichterventile	12	Kommutierungskondensator
4, 5, 6	Entkopplungsdioden		
7, 10	Rückladeventile	13, 14, 15	Transformatorwicklungen
8, 9	Freilauf- und Kommutierungsventile	16, 17	Kommutierungsinduktivitäten
11	Entkopplungs- und Freilaufdiode	18	Speicherinduktivität

übernommen. Somit erfolgt die Kommutierung des Stromes kontaktlos. Die einfache und bewährte Steuerung solcher Ventile ermöglicht den Aufbau einer für den periodischen Betrieb geeigneten und sicher wirkenden Schaltung. Die Wirkungsweise der Schaltkreise wurde durch eine rechnerische Analyse mit dem Digitalrechner überprüft. Die praktische Bemessung der Kommutierungskreise solcher Schaltungen soll in einem späteren Aufsatz dargestellt werden.

Literatur

[1] *H. Bertele* und *J. Mitterauer:* Hochstromtechnik in der modernen Forschung und Entwicklung der Kernfusion. E und M 87(1970)3, S. 139...152, Nr. 6, S. 304...313 und Nr. 7, S. 343...353.

[2] Special Issue on Magnetic fusion developement. Proc. IEEE 69(1981)8, p. 867...1082.

[3] *A. Knobloch, K.-H. Schmitter* und *S. L. Wipf:* Elektrotechnische Probleme in Fusionsmaschinen. ETZ-A 92(1971)5, S. 265...272.

[4] *A. Samain:* Les Tokomaks permettront-ils la fusion contrôlée? Annales de Physique 4(1979)5/6, p. 395...446.

[5] *R. W. Conn:* Controlled fusion and reactors of the Tokamak type. Advances in Nuclear Science and Technology 10(1977), p. 405...586.

[6] *S. L. Wipf:* Supraleitende Energiespeicher. Garching, Max Planck Institut für Plasmaphysik, Bericht IPP 2/211, 1973.

[7] *P. Dokopoulos:* Erzeugung von Hochleistungsimpulsen aus induktiven Energiespeichern. E und M 95(1978)1, S. 6...10.

[8] *B. Giesen* and *F. Petree:* Power system disturbances by fusion reactor experiments. Third International Conference on Sources and Effects of Power System disturbances. London 5...7 May, 1982. IEE Conference Record (1982)210, p. 277...281.

[9] *R. Carruthers:* The storage and transfer of energy. In: Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields, Cambridge/Massachusetts, november, 1...4, 1961. Cambridge/Massachusetts, Press Massachusetts Institute of Technology and New York/London, John Wiley, 1962; p. 307...318.

[10] *P. F. Smith:* Synchrotron power supplies using superconductive energy storage. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnet Technology, Oxford, 1967. Didcot/Berkshire, Rutherford Laboratory, 1967.

[11] *W. O. Eckhardt* a. o.: Proposed Gigawatt LMPV switch for inductive energy storage system. Malibu/California, Hughes Research Laboratories, Research Report 479, 1973.

[12] *P. Dokopoulos* und *K. Kriechbaum:* Gleichstromschalter-Anordnung für 73 kA und 24 kV in der Plasmaphysik. ETZ-A 97(1976)8, S. 499...503.

[13] *K. Kriechbaum:* Eine neue Schalteinrichtung für Kernfusionsexperimente. E und M 94(1977)12, S. 576...578.

[14] *F. Koppelmann:* Anordnung zum Energieaustausch zwischen zwei Gleichstromkreisen. Deutsche Auslegeschrift 1147679 vom 25. April 1963.

[15] *E. Simon* and *G. Bronner:* An inductive energy storage system using ignitron switching. IEEE Trans. NS 14(1967)5, p, 33...40.

[16] *K. Iwata:* High D.C. voltage generator. US Patent 3 978 346, 1976.

[17] *K. Iwata, Otagiri* and *J. Matsuda:* High D.C. voltage generating apparatus. US Patent 3 984 751, 1976.

[18] *P. Dick* und *C. H. Dustmann:* Schaltungsanordnung zum Übertragen elektrischer Energie. Deutsche Patentschrift 2461245 vom 4. September 1980.

[19] *F. Maier:* Verfahren zum Erzeugen von Hochleistungsimpulsen aus einem induktiven Energiespeicher. Schweizer Patentgesuch 9452/80 vom 22. Dezember 1980.

[20] *F. Maier:* Schaltungsanordnung zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen, sowie ein Verfahren zu deren Betrieb. Deutsches Patentgesuch P 32 29 326.7 vom 6. August 1982.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. Dr. techn. *Franz Maier,* BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abt. NLP (Turgi), 5401 Baden.