

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	73 (1982)
Heft:	23
Artikel:	Elektronische Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen in Fusionsanlagen
Autor:	Maier, F.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905041

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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 Voraussetzungen. 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 supraconducteur 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 Einschluszeit τ ein entscheidender Parameter des Fusionsprozess ist (Lawson-Kriterium: $n\tau > 10^{14} \text{ s/cm}^3$ bei $T = 100 \cdot 10^6 \text{ K}$).

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 $10^{15} \dots 10^{17}$ Teilchen pro cm^3 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: $n = 10^{23} \dots 10^{26} \text{ cm}^{-3}$, $T = 10^7 \dots 10^8 \text{ K}$),
- 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 (toroidal) Einschlüsse 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 schraubenförmiges Feldlinienverlauf (Fig. 1b).

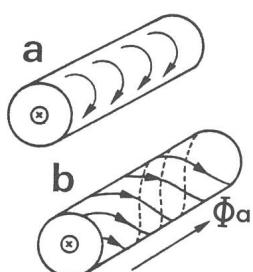


Fig. 1
Zylindrische Plasmagleichgewichte
a Durch Plasmastrom in der Zylinderachse erzeugtes Feld
b Schraubenförmiges Feld

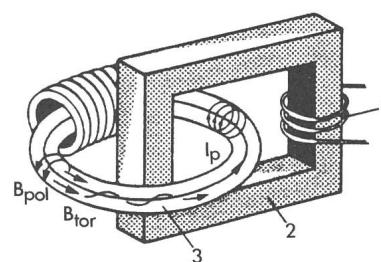


Fig. 2 Toroidaler Plasmaeinschluss durch TOKAMAK

- | | |
|------------------|-----------------------|
| 1 | Primärwicklung |
| 2 | Transformatorkern |
| 3 | Plasma |
| B_{pol} | polares Magnetfeld |
| B_{tor} | toroidales Magnetfeld |
| I_p | Plasmastrom |

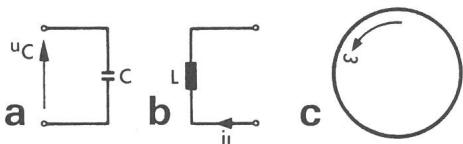


Fig. 3 Vergleich des Speichervermögens von Energiespeichern (Formeln)

a Kapazitiv (Kondensator)

$$W_c = \frac{C U^2}{2} \quad [\text{Ws}]$$

$$w_c = \frac{\epsilon E^2}{2} = \frac{E D}{2} \quad [\text{Ws/m}^3]$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad [\text{F/m}]$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad [\text{F/m}]$$

c Mechanisch (Schwungrad)

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

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

$$K = \frac{1}{V} \int \frac{\sigma}{\sigma_{\text{max}}} dm \quad [\text{kg/m}^3]$$

b Induktiv (Spule)

$$W_\mu = \frac{L I^2}{2} \quad [\text{Ws}]$$

$$w_\mu = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2} \quad [\text{Ws/m}^3]$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad [\text{H/m}]$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{H/m}]$$

örtliche Spannung

σ_{max} [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

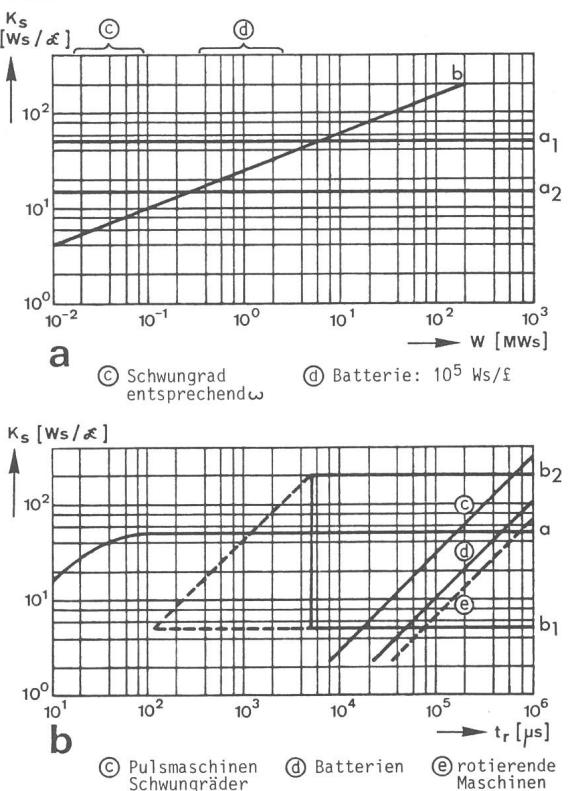


Fig. 4 Kehrwert der relativen Energiespeicher Kosten in Abhängigkeit der gespeicherten Energie W (a) und der Stromansteigungszeit t_r (b)

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

b a Kondensatoren
 b_1 20 kW }
 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 Speicher Kosten ungefähr jenen der im Speicher transferierten Energie während der Anwendungsdauer des Speichers entsprechen. Für die vorgenannten Energiespeicher gilt folgende Rangordnung hinsichtlich Energiedichte:

- Kapazität: $W_C = 0,1 \dots 0,2 \text{ Ws/cm}^3$
- Induktivität: $W_\mu \leq 100 \text{ Ws/cm}^3$
- Schwungrad: $W_k \leq 280 \text{ Ws/cm}^3$ (für Stahl)
 $W_k \leq 800 \text{ Ws/cm}^3$ (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 Entladestzeit 0,1 s unterschreitet (Fig. 4). Durch Verwendung supraleitender Speicherinduktivitäten kann eine massgebliche Kosterniedrigung erreicht werden [6; 10].

Kosten der Energiespeicher

Tabelle I

Speicher	Minimale Entladungszeit τ_E (s)	Kosten K (DM/Ws)
Kapazität	$\geq 2 \cdot 10^{-7}$	0,40...2,0
Induktivität	$\geq 10^{-5}$	0,20
Schwungrad	$\geq 0,5$	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 Speicher Kosten 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, $\approx 6\%$ 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 Werkstofffaktors 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 $CU - LI - J\omega$. Jede Energiespeicherung bedingt also einen Ausgleichsvorgang für Spannung, Strom und Winkelgeschwindigkeit zwischen zwei Systemen (Speisennetz – 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

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

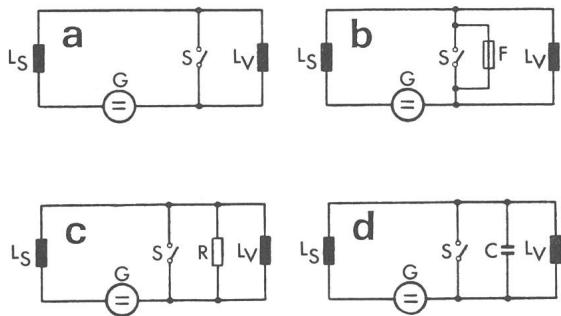


Fig. 5 Herkömmliche Kommutierungsschaltungen zur Energieübertragung aus einem induktiven Speicher

- 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 Induktivitätsverhältnisses 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. Natürgemäß erscheinen mechanische Schalter wegen des un-

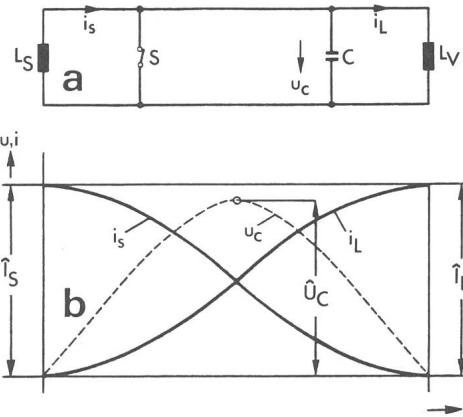


Fig. 6 Kapazitive Energieübertragung mit Zwischenspeicherung [6]

- a Ersatzschaltbild
- b Verlauf von Spannung und Strom

vermeidlichen 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 Entladestromstoss 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].

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 (Thyatron). 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 resistiver Energieübertragung [9]

Tabelle II

Induktivitätsverhältnis L_v / L_s	Übertragene Energie Gespeicherte Energie W_v / W_s	Energieverluste Übertragene Energie W_R / W_v	Stromverhältnis 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

Wirksamkeit kapazitiver Energieübertragung

Tabelle III

Induktivitätsverhältnis L_v / L_s	Übertragene Energie Gespeicherte Energie W_v / W_s	Kondensatorenenergie 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

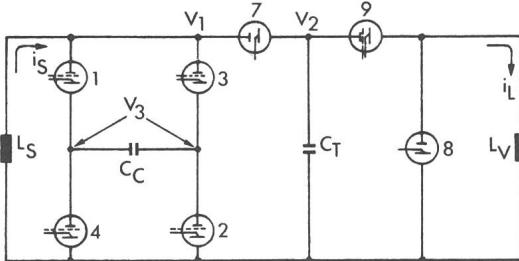


Fig. 7 Induktives Energiespeichersystem mit Ignitronsteuerung [15]

- | | |
|-------|-----------------------------|
| 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 Ventilpaars 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.

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:

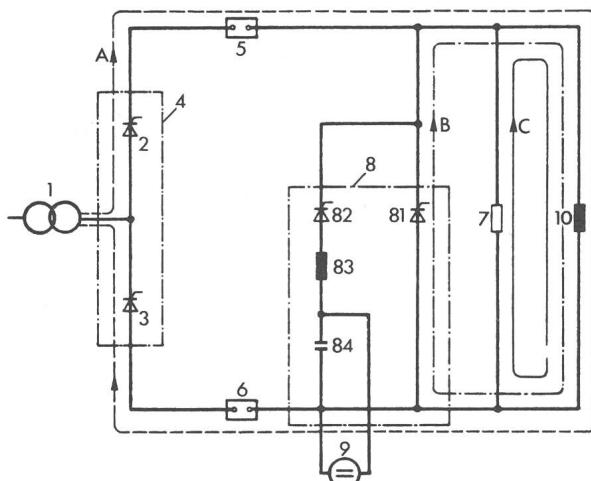


Fig. 8 Induktives Energiespeichersystem mit gesteuertem Freilaufkreis und separatem Löschkreis [16; 17]

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

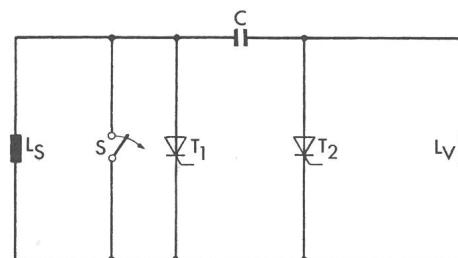


Fig. 9 Energieübertragung zwischen zwei Induktivitäten durch kapazitive Zwischenspeicherung [16]

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

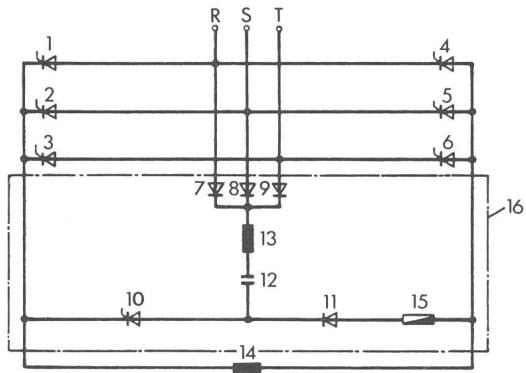


Fig. 10 Induktives Energiespeichersystem mit gemeinsamem, gesteuertem Freilauf- und Löschkreis und zweistufiger Kommutierung [19]

- | | | | |
|---------|---------------------------------|----|-------------------------------------|
| 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 | | |

- 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 Brückenventile werden die gerade leitenden Ventile einer Brückenhälfte (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 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 Transformatorkundärwicklungen (12) um. Der

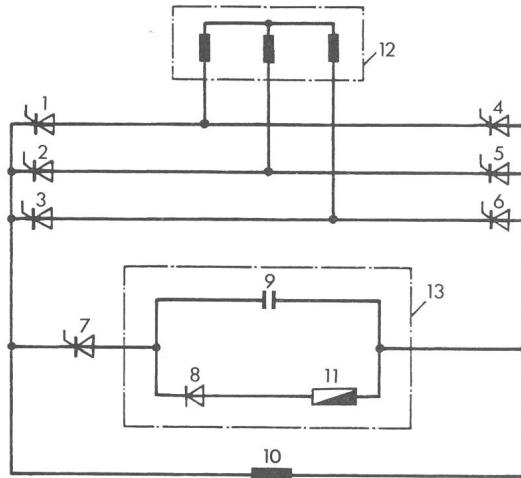


Fig. 11 Thyristorschalter für einstufige Kommutierung [19]

- | | | | |
|-------|---------------------------------|----|---------------------------------------|
| 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 |

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 Widerstandsentsregung 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 Kondensatorstrom 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-

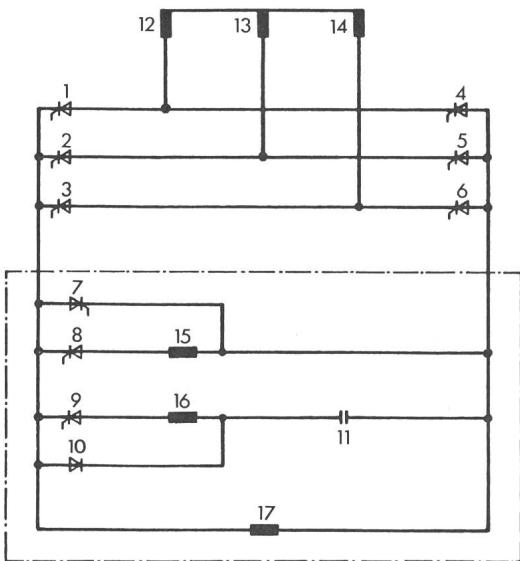


Fig. 12 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung [20]
(einstufige Kommutierung)

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

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

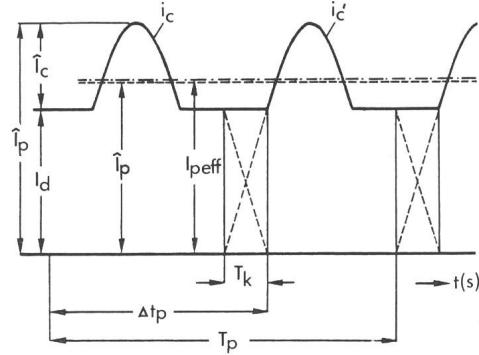


Fig. 14 Stromimpulsform bei kapazitiver Zwischenspeicherung und vernachlässiger Dämpfung [20]

T_k	Kommutierungszeit
T_p	Impulsperiode
ΔT_p	Stromimpulsdauer
\hat{i}_p	Scheitelwert des Primärstromes
I_d	Gleichstrom des induktiven Speichers
I_c	Scheitelwert des Umschwingstromes
I_p	Mittelwert des Primärstromes
I_{peff}	Effektivwert des Primärstromes

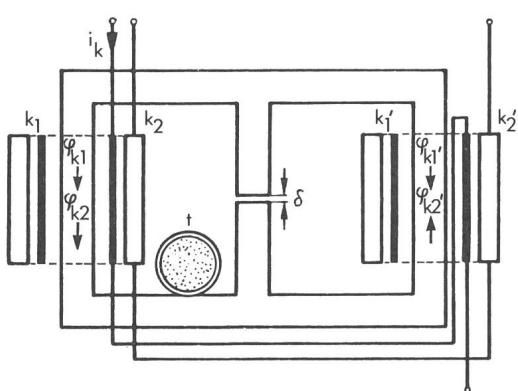


Fig. 13 Transformator mit gegenseitig entkoppelten Primärwicklungen [20]

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

(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 Außen-schenkel 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 ausgetrennten 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

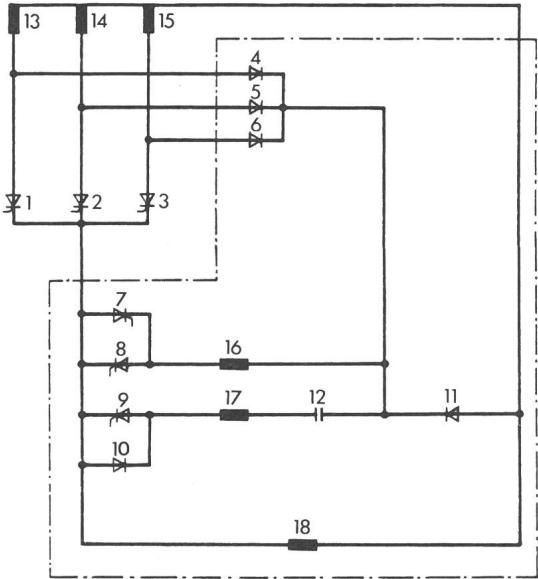


Fig. 15 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung (zweistufige Kommutierung) [20]

1, 2, 3	Stromrichterventile	12	Kommutierungs-kondensator
4, 5, 6	Entkopplungsdioden	13, 14, 15	Transformator-wicklungen
7, 10	Rückladeventile	16, 17	Kommutierungs-induktivitäten
8, 9	Freilauf- und Kommutierungsventile	18	Speicherinduktivität
11	Entkopplungs- und Freilaufdiode		

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 development. 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 Tokamaks permettent-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 und 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. Kopelmann: Anordnung zum Energieaustausch zwischen zwei Gleichstromkreisen. Deutsche Auslegeschrift 1147679 vom 25. April 1963.
- [15] E. Simon und 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.