

Projekt 500 kV-Theta-Pinch
(500 kV Theta Pinch Project)

G. Herppich

IPP 4/68

November 1969

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MUNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

(in German)

Projekt 500 kV-Theta-Pinch
(500 kV Theta Pinch Project)

G. Herppich

IPP 4/68

November 1969

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

G. Herppich

November 1969 (in German)

Abstract

The designed theta-pinch with a four times fed coil (43 cm diameter, 100 cm length) will be driven by Blumlein-type transmission lines (0.58Ω). The lines generate a 125 kV pulse (total voltage 500 kV at the closed circuit) of 500 ns length with a rise time constant of 85 ns. The corresponding field is 5.5 kG. The Blumlein lines are resonance charged by a capacitor bank of the Marx type. The start switches are pressurised multi-channel spark gaps.

The bias field bank consists of two parts. One part is connected directly with the coil like the main bank. The other part feeds into two single-turn coils left and right of the main coil in order to produce a homogeneous field even 20 cm outside the main coil.

Two smaller Blumlein lines (100/200 ns) were built for studying technical and physical properties.

Most of the electrical and discharge data are checked and computed with an ECAP program on the IBM 360/91.

Abstract

1. Einleitung
2. Allgemeiner Batterieaufbau für die Hauptentladung und Vormagnetisierung
 - 2.1 Vorgegebene Verbraucherdaten
 - 2.2 Daten für eine Einspeisestelle
(3x 125 kV-Einheiten parallel)
 - 2.3 Stoßladung
 - 2.4 Funkenstrecken
 - 2.5 Triggerung
 - 2.6 Spannungs- und Stromverlauf
 - 2.7 Erdung
 - 2.8 Vormagnetisierung
 - 2.8.1 Speisung direkt in die Theta-Pinch Spule
 - 2.8.2 Speisung der äußeren Spulen
 - 2.8.3 Betriebsdaten der Vormagnetisierungsbatterie
 - 2.9 Räumliche Aufstellung 500 kV-Experiment
3. Vorversuch
 - 3.1 Daten des Verbrauchers
 - 3.2 Daten einer Batteriehälfte
 - 3.3 Stoßladung
 - 3.4 Funkenstrecke
 - 3.5 Ergebnisse des Vorversuchs
4. 125 kV-Experiment für Abteilung 1
 - 4.1 Hauptentladung
 - 4.2 Vormagnetisierung
5. Theoretische Grundlagen für die Dimensionierung

Literatur

1. Einleitung

Bei der geplanten Anlage handelt es sich um ein Experiment zur Erzeugung quasi-stationärer Stoßwellen hoher Machzahl, in denen das Plasma stoßfrei aufgeheizt wird (Turbulenzaufheizung) [1,2]. Ein ähnliches Experiment ist in Maryland/USA bereits in Betrieb [3]. Die Hauptentladung in der linearen Entladespule wird dabei aus einer als Blumleinleitung [4, 5, 6, 7] ausgeführten Stoßbatterie gespeist. Ein möglichst homogenes Vormagnetisierungsfeld wird von einer zweiten Batterie erzeugt, die auf die Theta-Pinch-Spule und auf getrennte Endspulen links und rechts neben der Hauptspule speist.

Um die experimentell erforderlichen Daten im Entladungsgefäß herzustellen, ist ein bestimmtes zeitliches Spannungs- und Stromprogramm vorgesehen. Zunächst wird ein verhältnismäßig langsam ansteigendes axiales Magnetfeld erzeugt (1kG). Nach dem Zuschalten des Magnetfeldes wird eine schnelle Vorentladung (Strahlungsvorionisierung) gezündet, die das im Gefäß befindliche Gas ionisiert. Nach diesem Vorgang erfolgt die Kompression durch die Hauptentladung mit 85 ns Anstiegszeit ($B_{\max} = 5 \text{ kG}$) und einer Pulslänge von 500 ns.

Als Grundlage für eine Entscheidung über den Bau des Experiments war ein Vorversuch zur Blumleinleitung (100 ns Puls) bestimmt (siehe unter 3.). Für physikalische Voruntersuchungen wurde eine weitere 125 kV-Blumleinleitung (200 ns Puls) mit Vormagnetisierung für die Abteilung 1 aufgebaut (siehe unter 4.).

2. Allgemeiner Batterieaufbau für die Hauptentladung und Vormagnetisierung

Die vorgesehene technische Ausführung ist folgende:

Die Spule wird vierfach eingespeist, und zwar von je drei 1-stufigen Blumleinleitungen mit einer Stufen-
spannung von 125 kV. Die räumliche Anordnung ist aus
Abbildung 1 zu ersehen. Zwei Gruppen zu je drei 125 kV-
Einheiten befinden sich übereinander in einem Gestell.
Die Leitungen liegen in glasfaserverstärkten Polyester-
wannen mit Leitungswasser zur Potentialsteuerung. Die
Entladespule selbst befindet sich außerhalb der Tanks
[8]. Jede Blumleinleitung wird durch eine eigene Stoß-
batterie (Marxgeneratoren) aufgeladen. Als Entlade-
schalter dienen mehrfach getriggerte Druckfunkenstrek-
ken.

Zur Erzielung eines möglichst homogenen Magnetfeldes
auf der z - Achse der Spule besteht die Anlage zur Vor-
magnetisierung aus zwei Batterien. Eine Batterie speist
analog der Hauptbatterie direkt in die vier Anschlußstel-
len der Spule. Die zweite Batterie speist in äußere ein-
windige Spulen, die sich links und rechts neben der Theta-
Pinch-Spule befinden, ein.

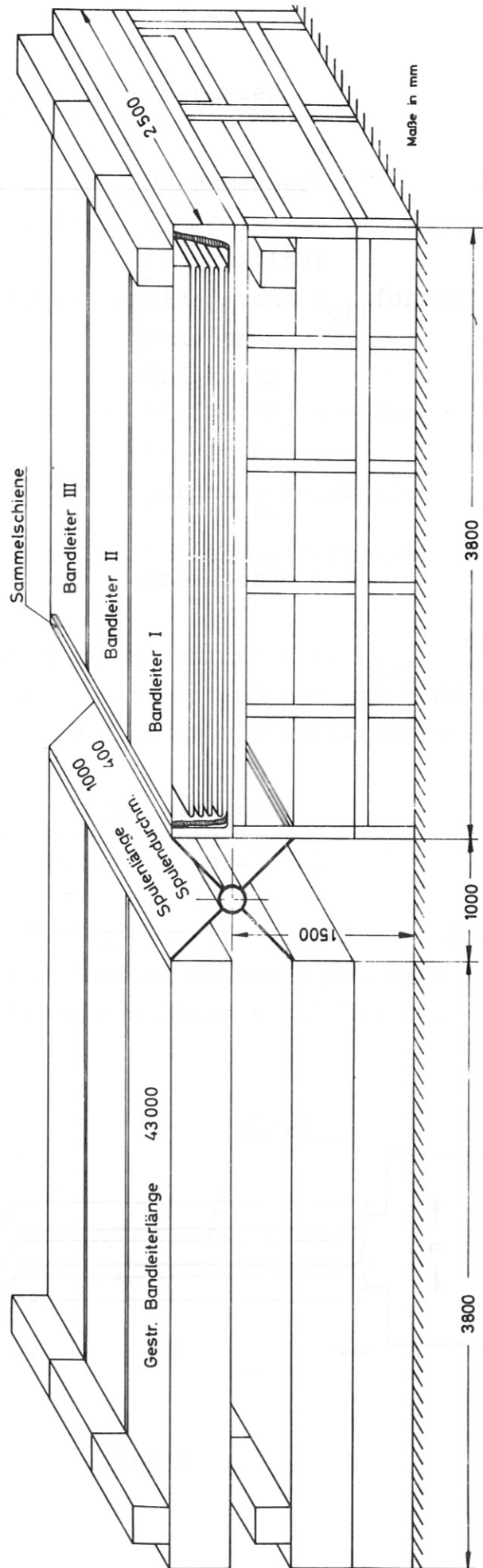


Abb.1

500 KV Theta Pinch Experiment
räumliche Anordnung der Blumleinleitungen mit Spule

2.1 Vorgegebene Verbraucherdaten

| | | |
|-------------------------------|---|---------------------------|
| Einwindige Spule | Durchmesser | $D = 40 \text{ cm}$ |
| (4-fach gespeist) | Länge | $l = 1 \text{ m}$ |
| | Induktivität | $L = 135 \text{ nH}$ |
| äquivalenter Spulenwiderstand | $R_{\text{eff}}(dL/dt)$ | ca. $0,2 \Omega$ |
| | max. Strom | $J = 400 \text{ kA}$ |
| | Induktion | $B = 5 \text{ kG}$ |
| | max. Umfangsspannung | $U_u = 500 \text{ kV}$ |
| | Pulslänge | $t_B = 500 \text{ ns}$ |
| | Stromanstiegszeit- konstante | $T_A = 50-100 \text{ ns}$ |
| | Anpassung Verbraucher/ Energiespeicher | 1 : 3 |

Der äquivalente Spulenwiderstand $R_{\text{eff}} = \frac{dL}{dt}$ ist ein effektiver Plasmawiderstand entsprechend der bei der Kompression der Plasmasäule geleisteten Arbeit.

2.2 Daten für eine Einspeisestelle

(3 x 125 kV-Einheiten parallel)

Aus der Forderung heraus, einen 500 ns-Rechteckpuls mit schnellem Anstieg zu erzeugen, bietet sich die Blumleinleitung als Energiespeicher an.

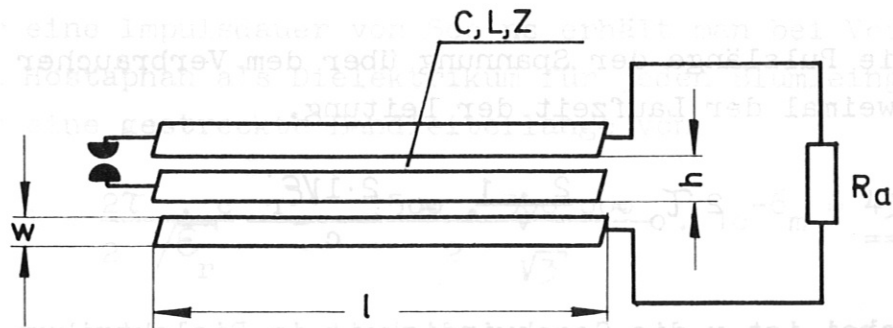


Abb.2

Eine Blumleinleitung besteht aus zwei Leitungen (koaxial oder plattenförmig), die am Verbraucher in Serie geschaltet werden. Geschaltet wird nur an einem Ende einer Leitung (siehe Abbildung 2).

Der Wellenwiderstand einer plattenförmigen Leitung (Bandleiter) ist

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{h}{w} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

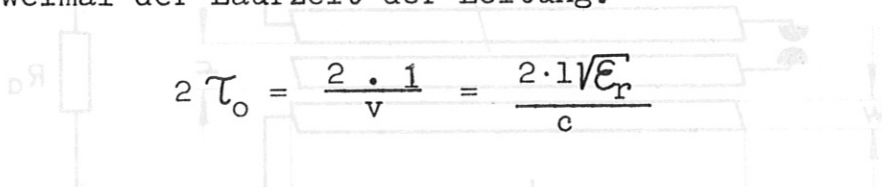
wobei h = Abstand der Platten, w = Breite des Plattenpaares ist.

Durch die Reihenschaltung der Leitungen wird die Impedanz einer Blumleinleitung

$$2 \times Z_0 .$$

Die Leitung wird aufgeladen auf U_0 . Solange die Leitungsenden offen sind, steht keine Spannung am Verbraucher an. Wird nun das eine Ende kurzgeschlossen, so läuft von diesem eine negative Welle in Richtung Verbraucher. Ist die Welle am Ende angelangt (einfache Laufzeit), dreht sich die Polarität der Spannung eines Bandleiters um. Bei offenem Ende der Leitung steht nun die doppelte Ladespannung an. Ist die Blumleinleitung mit $2 \cdot Z_0 = R_a$ abgeschlossen, liegt am Verbraucher die einfache Ladespannung an.

Die Pulslänge der Spannung über dem Verbraucher ist gleich zweimal der Laufzeit der Leitung.



$$2 \tau_0 = \frac{2 \cdot l}{v} = \frac{2 \cdot l \sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

Dabei ist v die Geschwindigkeit im Dielektrikum und c die Lichtgeschwindigkeit.

Der maximale Strom im Verbraucher ergibt sich aus

$$\hat{I} = \frac{2 \cdot U_0}{2 \cdot Z_0 + R_{\text{eff}}}$$

wobei $R_{\text{eff}} = dL/dt$ der effektive Plasmawiderstand ist.

Die Stromanstiegszeit hängt vom Verhältnis der Verbraucherinduktivität zum Leitungswellenwiderstand ab. Die Anstiegszeitkonstante ist für einen am Verbraucher ankommenden idealen Rechteckpuls:

$$T_a = \frac{L_0}{2 \cdot Z_0 + R_{\text{eff}}}$$

Um die Ausbildung schräger Wellenfronten in den Blumlein-Bandleitern zu vermeiden und zur Erzielung geringer Schaltinduktivitäten müssen mehrfach getriggerte Druckfunkenstrecken eingesetzt werden. Eine praktisch erprobte Ausführung solcher Funkenstrecken ist für eine Anschlußbreite von ca. 50 cm geeignet. In Anpassung hieran ergibt sich eine Dreifachunterteilung des 1,5 m breit angenommenen Bandleiters. Damit sollte die Zündhäufigkeitsverteilung für die parallel arbeitenden mehrfach-getriggerten Funkenstrecken näherungsweise dieselbe bleiben wie die der Einzelfunkenstrecke.

Für eine Impulsdauer von 500 ns erhält man bei Verwendung von Hostaphan als Dielektrikum für jeden Blumleingenerator eine gestreckte Bandleiterlänge von

$$l = \frac{2\tau \cdot c}{2 \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{500 \cdot 300\,000}{2 \sqrt{3}} \cdot 10^{-6} \text{ m} = 43,4 \text{ m}$$

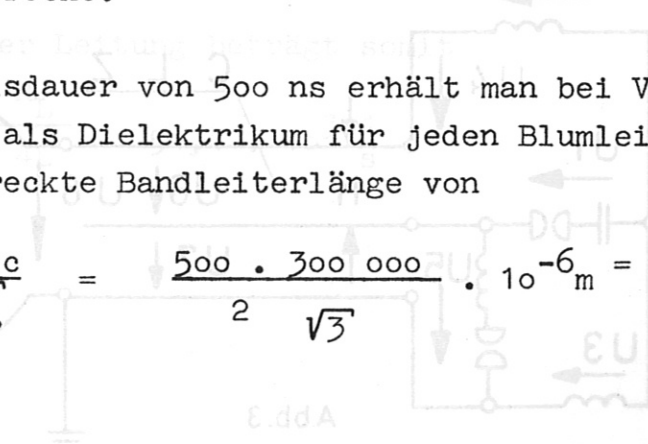


Abbildung 3: Ersatzschaltbild einer Blumleinleitung mit Stoßkondensator

Als experimentell ermittelte zulässige Spannungsbeanspruchung für das Dielektrikum Hostaphan-Wasser wurde von der Gruppe Hochspannungstechnik 250 kV/mm genannt (Schichtdicke 4 x 0,2 mm). Mit einem Sicherheitszuschlag wird vorläufig 125 kV/mm gewählt. Je nach Betriebserfahrung am Vorversuch kann der Wert später erhöht werden.

Es ergeben sich folgende Daten (Abb. 3):

| | |
|--|---|
| Bandleiter-Länge | $l = 43 \text{ m}$ |
| gewählte Breite | $w = 1,5 \text{ m} (3 \cdot 0,5 \text{ m})$ |
| Abstand (Bemessung für Beanspruchung durch $U_{SS} = 250 \text{ kV}$) | $h = 2 \text{ mm}$ |

Die Kapazität wird somit

$$C = 0,0886 \cdot 3 \frac{150 \cdot 4300 \text{ nF}}{0,2} = 860 \text{ nF}$$

Bei einer Ladespannung $U_L = 125 \text{ kV}$ wird die

$$\text{Ladeenergie } E = 0,5 \cdot 172 \cdot 10^{-6} \cdot 125^2 \cdot 10^6 \text{ J} = 13,5 \text{ kJ}$$

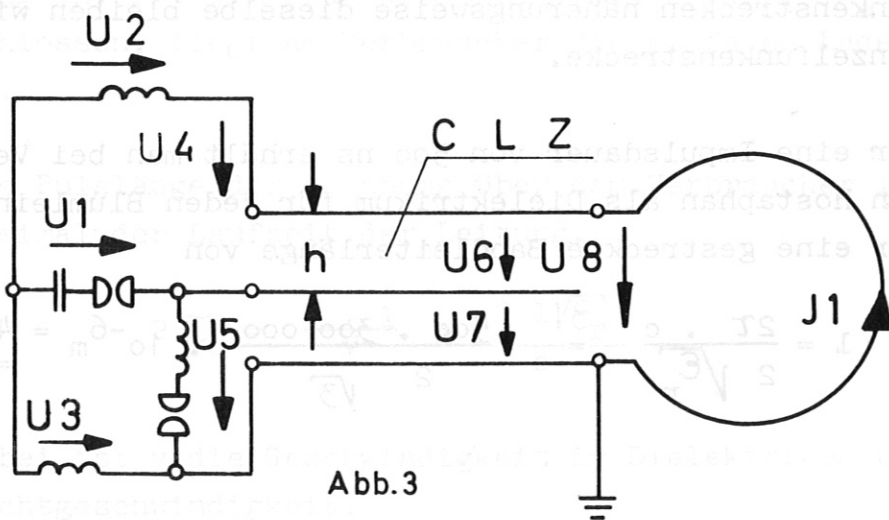


Abb.3
Ersatzschaltbild einer Blumleinleitung mit Stoßladebatterie

Induktivität des Bandleiters $L = \mu_0 \cdot h \frac{1}{w} = 4 \cdot 0,2 \frac{4300 \text{ nH}}{150} = 72 \text{ nH}$

Wellenwiderstand $Z = 377 \frac{h}{w \sqrt{\epsilon_r}} = 377 \frac{0,2}{150 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = 0,29 \Omega$

Für den maximalen Strom im Verbraucher ergibt sich nach einer numerischen Rechnung mit ECAP (siehe 2.6) (Kurvenverlauf siehe Abbildung 8):

$$J = 439 \text{ kA, d.h. } B = 5,5 \text{ kG}$$

Die tatsächliche erreichbare Stromanstiegszeitkonstante hängt im wesentlichen von der erzielten Schalterinduktivität ab. Für eine Induktivität des Einzelschalters von 20 nH ergibt sich eine

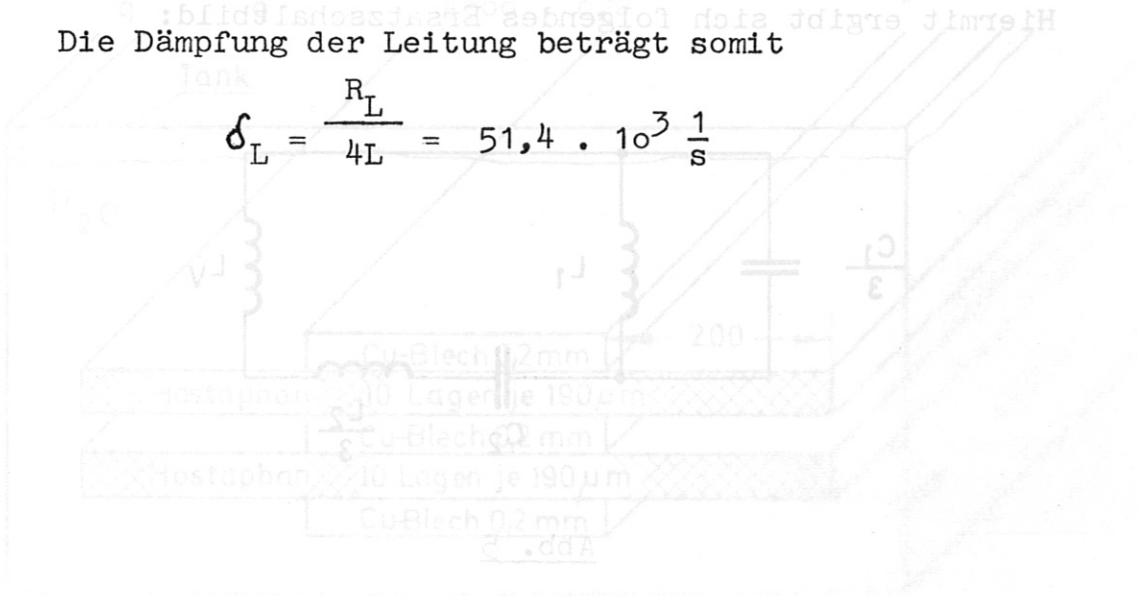
$$\text{Anstiegszeitkonstante von } T_A = 85 \text{ ns}$$

Der Längswiderstand der gesamten Leitung, der das Ausschwingen nach dem 500 ns-Puls bestimmt, ergibt sich wie folgt:

$$R_L = \frac{1 \cdot \rho}{q} = \frac{2,67 \cdot 43 \cdot 0,0178}{1500 \cdot 0,115} = 14,8 \text{ m}\Omega$$

Die Dämpfung der Leitung beträgt somit

$$\delta_L = \frac{R_L}{4L} = 51,4 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{s}}$$



wobei sich die Eindringtiefe in das 0,2 mm starke Kupferblech aus der Frequenz des Ausschwingens und die effektive Länge zur Berechnung der Reaktanzen aus folgendem Ersatzschaltbild für die Blumleitung nach Ende des 500 ns Pulses näherungsweise ergeben:

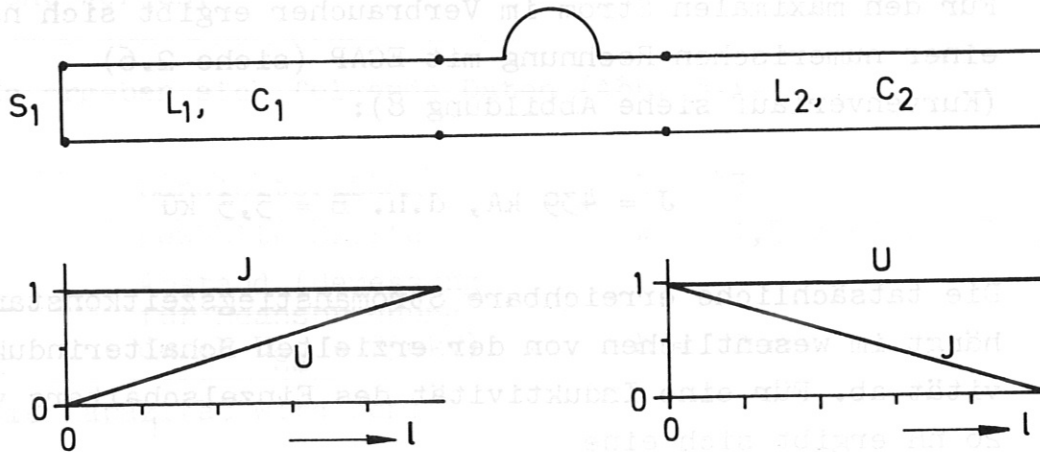


Abb. 4

Nach Schalten des Schalters S_1 und Ablauf des 500 ns Pulses und bei Annahme einer Strom- und Spannungsverteilung nach Abb.4 ist jeweils nur noch ein Drittel der Gesamtkapazität bzw. ein Drittel der gesamten Induktivität der Leitung wirksam (für konstante gespeicherte Energie)

Hiermit ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild:

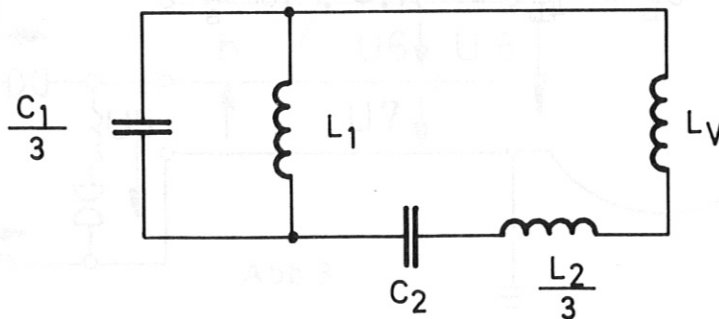


Abb. 5

Die Ausschwing-Frequenz zur Berechnung der Eindringtiefe wird danach

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{0,86 \cdot 10^{-6} \cdot 129,7 \cdot 10^{-9}}} = 485 \text{ kHz}$$

Die Eindringtiefe in Kupfer ergibt sich dann zu

$$\delta = 0,115 \text{ mm}$$

Die effektive Länge der Bandleitung ist

$$l_{\text{eff}} = 2,67 \cdot l$$

Nach ECAP ergibt sich eine Ausschwingfrequenz

$$f = 488 \text{ kHz}$$

Um Koronaeffekte an den Rändern der Leitung zu vermeiden und um nicht zu große Folienüberstände zu erhalten, liegt die gesamte Bandleiteranordnung unter Wasser in einem glasfaserverstärkten Polyester-Tank. Der Wasserableitwiderstand wirkt an den Rändern potentialsteuernd.

Die Querableitung der gesamten Leitung beträgt:

$$R_q = \frac{1 \cdot \rho}{q} = \frac{0,5 \cdot 0,2 \cdot 16 \cdot 10^6}{4300 \cdot 0,2} = 185 \Omega$$

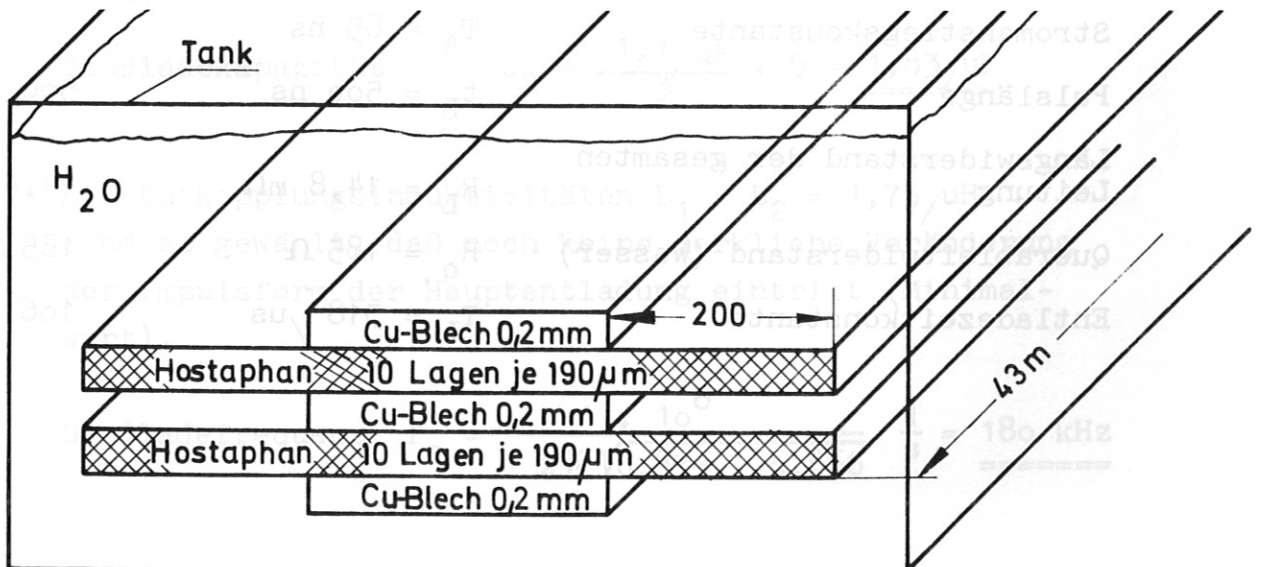


Abb.6 Skizze zur Berechnung des Ableitwiderstandes

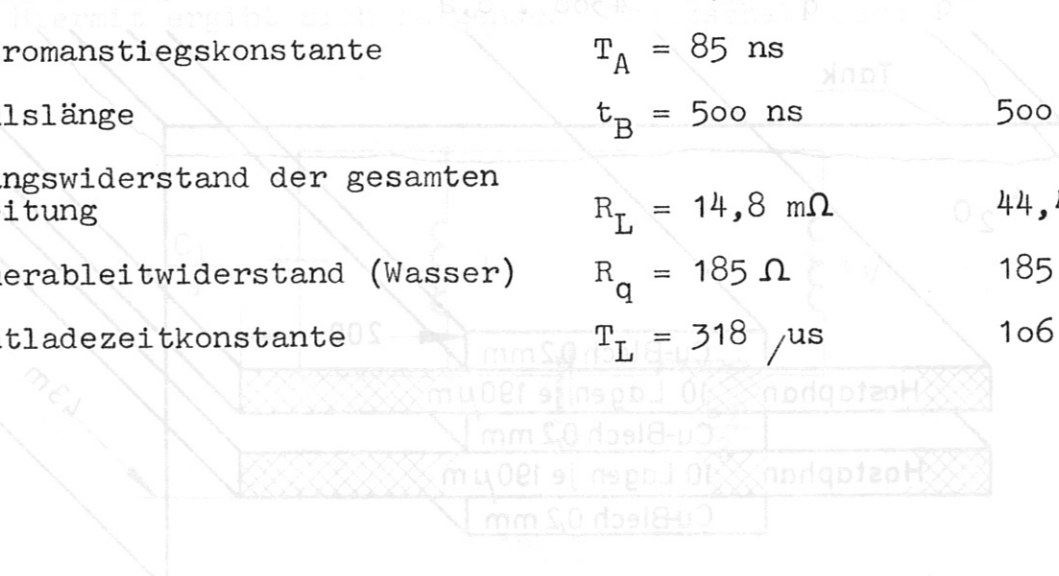
und damit die Selbstentladezeitkonstante

$$T = 1,72 \mu\text{F} \cdot 185\Omega = \underline{\underline{318 \mu\text{s}}}$$

Diese Zeit ist ein Vielfaches der Periodendauer der Stoßladung ($180 \text{ kHz} \approx 5,5 \mu\text{s}$; siehe 2.3)

Zusammenstellung der Daten für eine Einspeisestelle (3 x 125 kV-Einheiten parallel) und einer 125 kV-Einheit:

| | Einspeisestelle | 125 kV-Einheit |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Bandleiter-Länge | $l = 43 \text{ m}$ | 43 m |
| Bandleiter-Breite | $w = 1,5 \text{ m}$ | 0,5 m |
| Abstand | $h = 2 \text{ mm}$ | 2 mm |
| Kapazität | $C = 860 \text{ nF}$ | 287 nF |
| Induktivität | $L = 72 \text{ nH}$ | 216 nH |
| Energie | $E = 13,5 \text{ kJ}$ | 4,5 kJ |
| Wellenwiderstand | $Z = 0,29 \Omega$ | 0,87 Ω |
| Ladespannung | $U_L = 125 \text{ kV}$ | 125 kV |
| max. Strom (nach ECAP) | $J = 439 \text{ kA}$ | 146 kA |
| max. Induktion | $B = 5,5 \text{ kG}$ | |
| Stromanstiegskonstante | $T_A = 85 \text{ ns}$ | |
| Pulslänge | $t_B = 500 \text{ ns}$ | 500 ns |
| Längswiderstand der gesamten Leitung | $R_L = 14,8 \text{ m}\Omega$ | 44,4 m Ω |
| Querableitwiderstand (Wasser) | $R_q = 185 \Omega$ | 185 Ω |
| Entladezeitkonstante | $T_L = 318 \mu\text{s}$ | 106 μs |



2.3 Stoßladung

Die relativ hohe Querableitung bedingt, daß die Bandleitung im Stoß geladen wird. Bei Verwendung von Marxgeneratoren vom Typ ISAR I [9] ergeben sich folgende Werte:

$$\text{Ladeenergie pro Einspeisestelle (3 Einheiten parallel)} \\ = 13,5 \text{ kJ}$$

Durch Ladung des 3-stufigen Marxgenerators auf 125 kV ergibt sich für die

$$\text{Stufenspannung} = 47,7 \text{ kV}$$

$$\text{Bei einer Kapazität pro Stufe } C_M = 1,1 \mu\text{F}$$

wird die Ladeenergie für den Marxgenerator

$$E_m = 0,5 \cdot 3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 47,7^2 \cdot 10^6 \text{ J} = 2,87 \text{ kJ}$$

d.h. pro Einspeisestelle der Spule werden mindestens 5 dreistufige Marxgeneratoren benötigt.

Für die Stoßladung gilt das Ersatzschaltbild gemäß Abb.3 (3 Blumleinleitungen parallel)

$$L_{\text{Verbraucher}} = \frac{135 \text{ nH}}{4} = 33,7 \text{ nH}$$

$$\text{Stoßladekapazität } C_S = \frac{1,1 \mu\text{F}}{3} \cdot 5 = 1,83 \mu\text{F}$$

Die Entkopplungsinduktivitäten $L_1 = L_2 = 1,75 \mu\text{H}$ sind so gewählt, daß noch keine merkliche Veränderung der Impulsform der Hauptentladung eintritt (Minimalwert).

$$\text{Stoßladefrequenz } f_s = \frac{1 \cdot 10^6}{2\pi \sqrt{0,875 \cdot 0,866}} \frac{1}{\text{s}} = 180 \text{ kHz}$$

Wegen des Wunsches, mit Teilspannung arbeiten zu können, ist es zweckmäßig, die bestehenden Marxgeneratoren mit Druckfunkenstrecken auszurüsten.

Datenzusammenstellung für die Stoßladung pro Marxgenerator:

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Ladeenergie (Marxgen.) | $E = 2,87 \text{ kJ}$ |
| Stufenspannung | $U_L = 42 \text{ kV}$ |
| Kapazität pro Stufe | $C_m = 1,1 \mu\text{F}$ |

2.4 Funkenstrecken

Der Schalter ist eine mehrfach getriggerte Druckfunkenstrecke [10,11] mit 2 Hauptelektroden und 4 plattenförmigen Triggerelektroden, die in den Raum zwischen den Hauptelektroden eingreifen. Die beiden Gehäusehälften werden aus Gießharzformstoff gefertigt. Die Anschlußplatten haben eine Anschlußlänge (=Bandleiterbreite) von 50 cm. Die Hauptisolation zwischen den Elektrodenplatten besteht aus einer 4 mm starken Polyäthylenplatte. Der Funkenstreckeninnenraum wird mit trockener Luft mit einem Druck bis zu 6 ata gefüllt, der genaue Arbeitsdruck wird je nach Betriebsspannung an einem vorgeschalteten Konstantdruckminderer eingestellt.

Daten der Funkenstrecken sind:

Induktivität $\sim 20 \text{ nH}$, Jitter $\sim 5 \text{ ns}$.

Pro 125 kV-Einheit wird eine Funkenstrecke benötigt (50 cm Anschlußbreite).

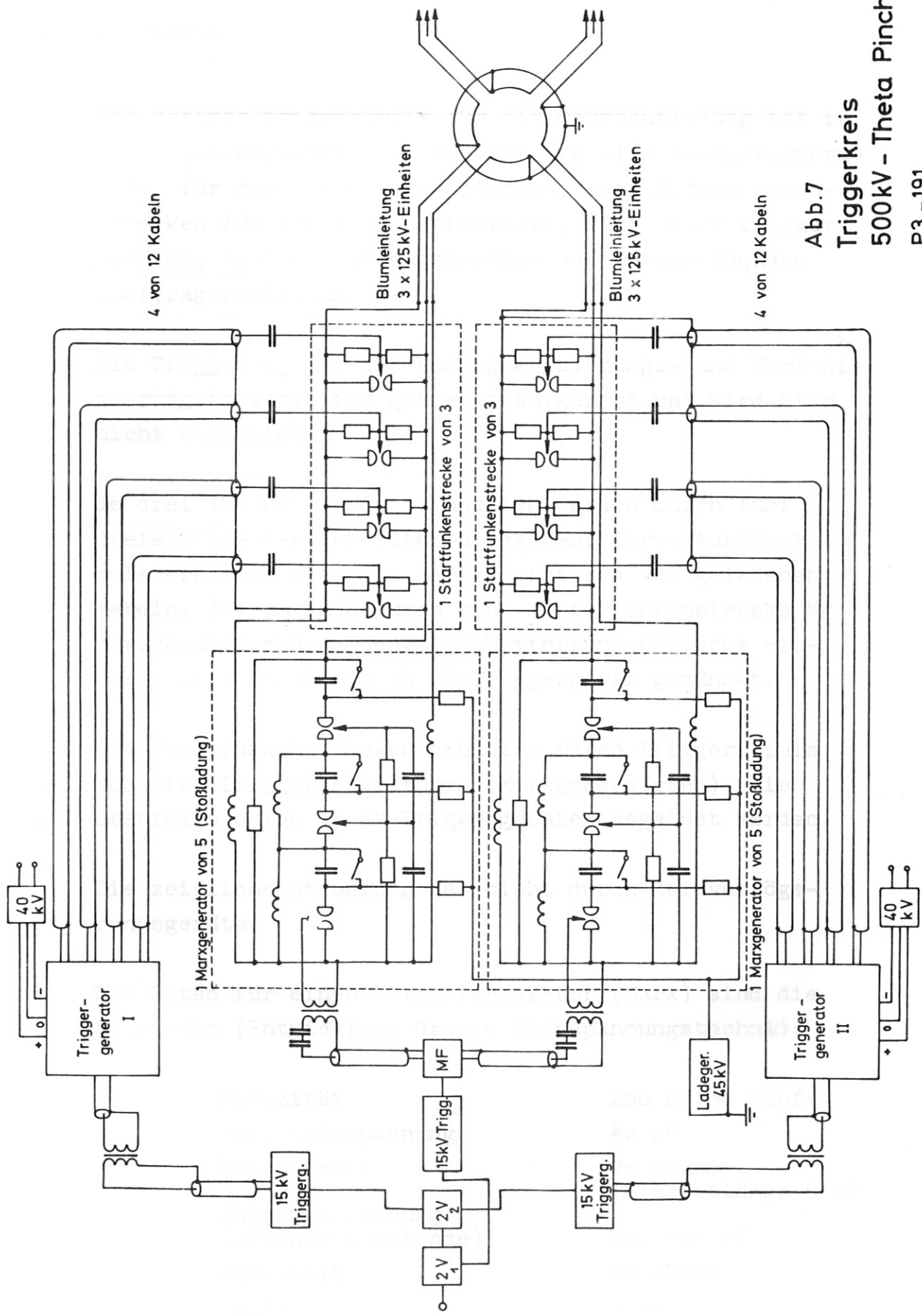


Abb.7

Triggerkreis

500kV - Theta Pinch

P3 -191

2.5 Triggerung

Der gesamte Triggerkreis für die Hauptentladung ist in Abb.7 wiedergegeben. Er besteht aus vier Triggergeneratoren für die Startfunkenstrecken, zwei Mutterfunkenstrecken für die Stoßladebatterie, fünf 15 kV Triggergeräten, Zeitverzögerungsgeräten und entsprechenden Übertragungsleitungen.

Die Triggerung für die Vormagnetisierungs- und Vorionisierungsbatterie ist getrennt aufgebaut und wird hier nicht beschrieben.

Je drei 125 kV-Blumleinseinheiten werden durch fünf dreistufige Marxgeneratoren geladen. Ihren Auslöseimpuls erhalten diese 20 Marxgeneratoren von geladenen Kabeln, die am Ende durch eine Mutterfunkenstrecke MF kurzgeschlossen werden. Die Mutterfunkenstrecke wiederum wird durch ein 15 kV-Triggergerät gezündet.

Die Startfunkenstrecken erhalten ihren Triggerimpuls von vier Triggergeneratoren (Marxgeneratoren), die ebenfalls durch 15 kV-Triggergeräte ausgelöst werden.

Die zeitliche Steuerung geschieht durch Zeitverzögerungsgeräte.

Die Daten für einen Triggergenerator (Marx) sind die folgenden (Entwicklung Gruppe Hochspannungstechnik):

| | |
|---|--------------------------------|
| Kapazität | 200 nF je Stufe |
| max. Ladespannung | 40 kV |
| Kabelanzahl | 20 Stück (Mindestlänge 5 m) |
| Ausgangsspannung (offenes Kabelende) | ca. 140 kV |
| Steilheit | 20 kV/ns |
| Jitter | 5 ns |

2.6 Spannungs- und Stromverlauf

Mit Hilfe des ECAP-Programms [12] wurden sämtliche interessierenden Spannungen und Ströme berechnet. Die Blumleinleitung wurde mit 2×26 LC-Halbgliedern approximiert.

Für die Berechnung gilt das Ersatzschaltbild gemäß Abb. 3 mit folgenden Daten:

Leitung:

Ladespannung

$$U_L = 125 \text{ kV}$$

Lade-Kapazität C ges.

$$= 1720 \text{ nF}$$

Induktivität L ges.

$$= 144 \text{ nH}$$

Wellenwiderstand Z

$$= 0,29 \Omega$$

doppelte Laufzeit 2τ

$$= 500 \text{ ns}$$

Schalterinduktivität

$$7 \text{ nH}$$

Spule:

Vakuuminduktivität L_E

$$33,7 \text{ nH}$$

Anfangsinduktivität

L_E - Anfang

$$33,7 \text{ nH} \cdot 0,2 = 6,74 \text{ nH}$$

(Plasma zündet am Gefäßinnenumfang)

Für das LC Halbglied wird

$$L_T = 5,3733 \text{ nH}$$

und

$$C_T = 66,154 \text{ nF}$$

mit einer Grenzfrequenz

$$\omega_g = \frac{2}{LC} = 106 \cdot 10^6 \frac{1}{s}$$

$$f_g = 16,9 \text{ MHz}$$

Somit ergibt sich für die Anstiegszeit (10% auf 90%)

$$t_A = \frac{0,35}{f_g} = 20,7 \text{ ns} \quad [13]$$

Für die Blumleinleitung gilt folgende Abschätzung zur Spannungsanstiegszeitkonstante:

1) Anstieg an der Funkenstrecke

$$T'_A = \frac{L_{\text{Funkenstrecken}}}{2 \cdot Z_0} = \frac{7 \text{ nH}}{0,29} = 24,1 \text{ ns}$$

2) Anstieg an der Verbraucherspule für einen idealen Rechteckpuls

$$T'_E = \frac{L_0}{2 \cdot Z_0 + R_{\text{eff}}} = 8,6 \text{ ns}$$

Da aber am Verbraucher bereits ein verschliffener Rechteckpuls ankommt, gilt für die wirkliche Anstiegszeit in 1. Näherung

$$T'' \approx \sqrt{T'^2_A + T'^2_E} = 25,6 \text{ ns}$$

d.h. die Approximation mit 26 LC-Halbgliedern, bedingt durch die bei ECAP zur Verfügung stehenden Knotenpunkte, ist ausreichend.

Der äquivalente Spulenwiderstand (dL/dt) wurde durch zeitliches Zuschalten von Induktivitäten nachgebildet. Bei Beginn der Kompression besitzt die Spule durch das in ihr befindliche Plasma nur ca. 20% der Vakuuminduktivität. Die Induktivität der Spule erhöht sich dann im Laufe der Kompression auf 100% der Vakuuminduktivität und zwar in ca. 250 ns.

Im Modell für die ECAP-Rechnung wurde dieser Vorgang, der in Wirklichkeit viel komplexer und nicht linear ist, durch sieben Schaltstufen (7 Schalter standen maximal zur Verfügung) angenähert, wobei die Spuleninduktivität von 20% auf 100% über eine Zeit von 250 ns erhöht wurde.

Auf den folgenden Seiten sind die Eingabedaten für ECAP wiedergegeben. Als Ausgabe erhält man den Spannungs- bzw. Stromverlauf an jedem gewünschten Punkt des Netzwerks.

Den gerechneten Strom- und Spannungsverlauf an der Spule (für Vakuuminduktivität und mit nachgebildetem Plasma in der Spule) zeigt Abb.8

Aus der Stromkurve für nachgebildetes Plasma ist deutlich zu entnehmen, daß durch die bessere Anpassung der Verbraucherspule an die Blumleinleitung der Pulsanstieg steiler wird und die Pulsform sich mehr einem Rechteckpuls nähert.

$$T = \sqrt{T_A^2 + T^2}$$

d.h. die Approximation mit 20 LC-Halbleitern, bedingt durch die bei ECAP zur Verfügung stehenden Knotenpunkte, ist ausreichend.

Der äquivalente Spulenwiderstand (R_{eff}) wurde durch zeitliches Zuschalten von Induktivitäten nachgebildet. Bei Beginn der Kompression besitzt die Spule durch das in ihr befindliche Plasma nur ca. 20% der Vakuuminduktivität. Die Induktivität der Spule erhöht sich dann im Laufe der Kompression auf 100% der Vakuuminduktivität und zwar in ca. 250 ns.

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^8} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 1,6 \text{ ns}$$

Im Modell für die ECAP-Rechnung wurde dieser Vorgang, der in Wirklichkeit viel komplexer und nicht linear ist, durch einen Schaltplan (V-Schalter) stehen maximal zur Verfügung) angenähert, wobei die Spuleninduktivität von 20% auf 100% über eine Zeit von 250 ns erhöht wurde.


```

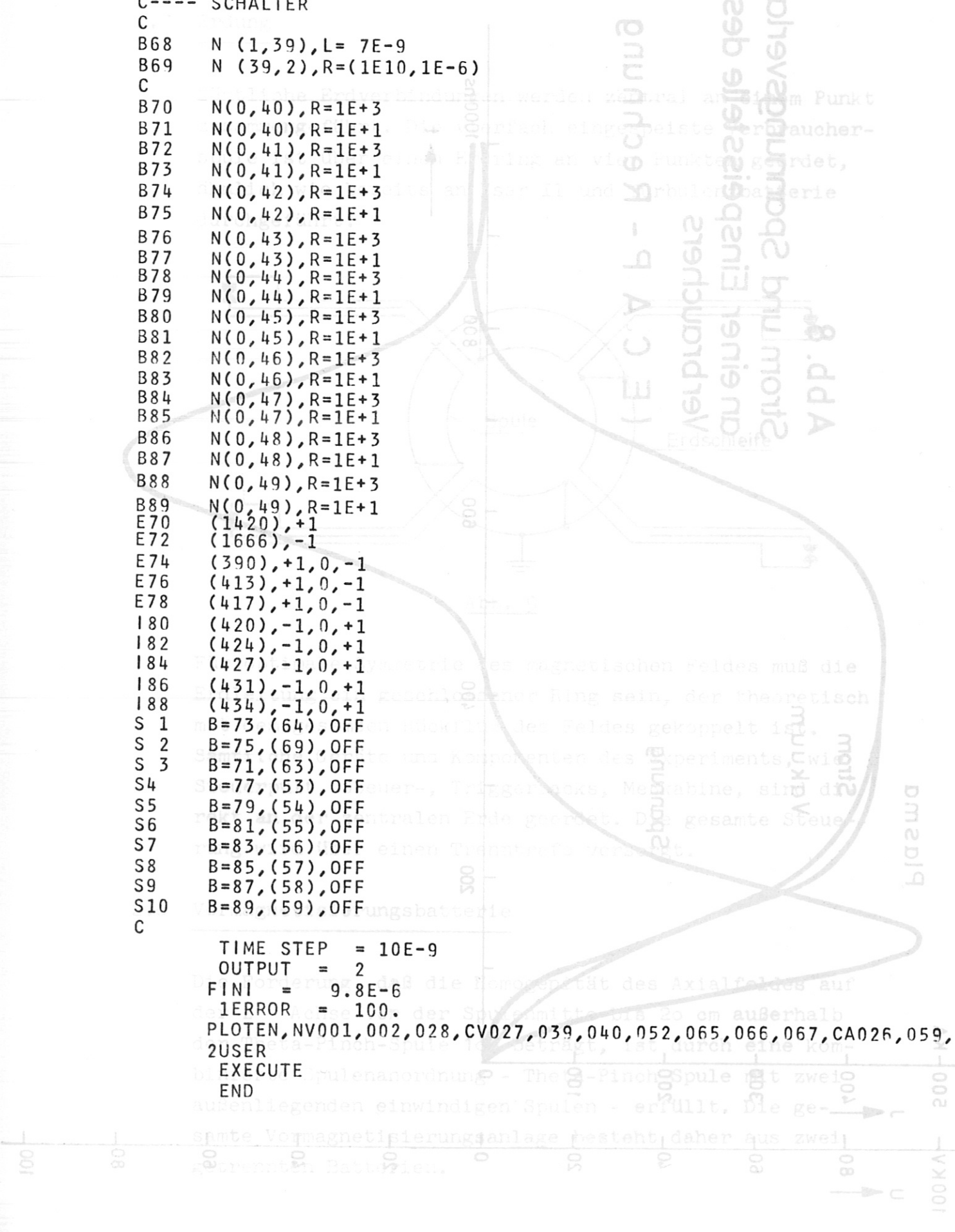
C
C---- SCHALTER
C
B68 N (1,39),L= 7E-9
B69 N (39,2),R=(1E10,1E-6)
C
B70 N(0,40),R=1E+3
B71 N(0,40),R=1E+1
B72 N(0,41),R=1E+3
B73 N(0,41),R=1E+1
B74 N(0,42),R=1E+3
B75 N(0,42),R=1E+1
B76 N(0,43),R=1E+3
B77 N(0,43),R=1E+1
B78 N(0,44),R=1E+3
B79 N(0,44),R=1E+1
B80 N(0,45),R=1E+3
B81 N(0,45),R=1E+1
B82 N(0,46),R=1E+3
B83 N(0,46),R=1E+1
B84 N(0,47),R=1E+3
B85 N(0,47),R=1E+1
B86 N(0,48),R=1E+3
B87 N(0,48),R=1E+1
B88 N(0,49),R=1E+3
B89 N(0,49),R=1E+1
E70 (1420),+1
E72 (1666),-1
E74 (390),+1,0,-1
E76 (413),+1,0,-1
E78 (417),+1,0,-1
I80 (420),-1,0,+1
I82 (424),-1,0,+1
I84 (427),-1,0,+1
I86 (431),-1,0,+1
I88 (434),-1,0,+1
S 1 B=73,(64),OFF
S 2 B=75,(69),OFF
S 3 B=71,(63),OFF
S4 B=77,(53),OFF
S5 B=79,(54),OFF
S6 B=81,(55),OFF
S7 B=83,(56),OFF
S8 B=85,(57),OFF
S9 B=87,(58),OFF
S10 B=89,(59),OFF
C

```

```

TIME STEP = 10E-9
OUTPUT = 2
FINI = 9.8E-6
IERROR = 100.
PLOTEN,NV001,002,028,CV027,039,040,052,065,066,067,CA026,059,
2USER
EXECUTE
END

```



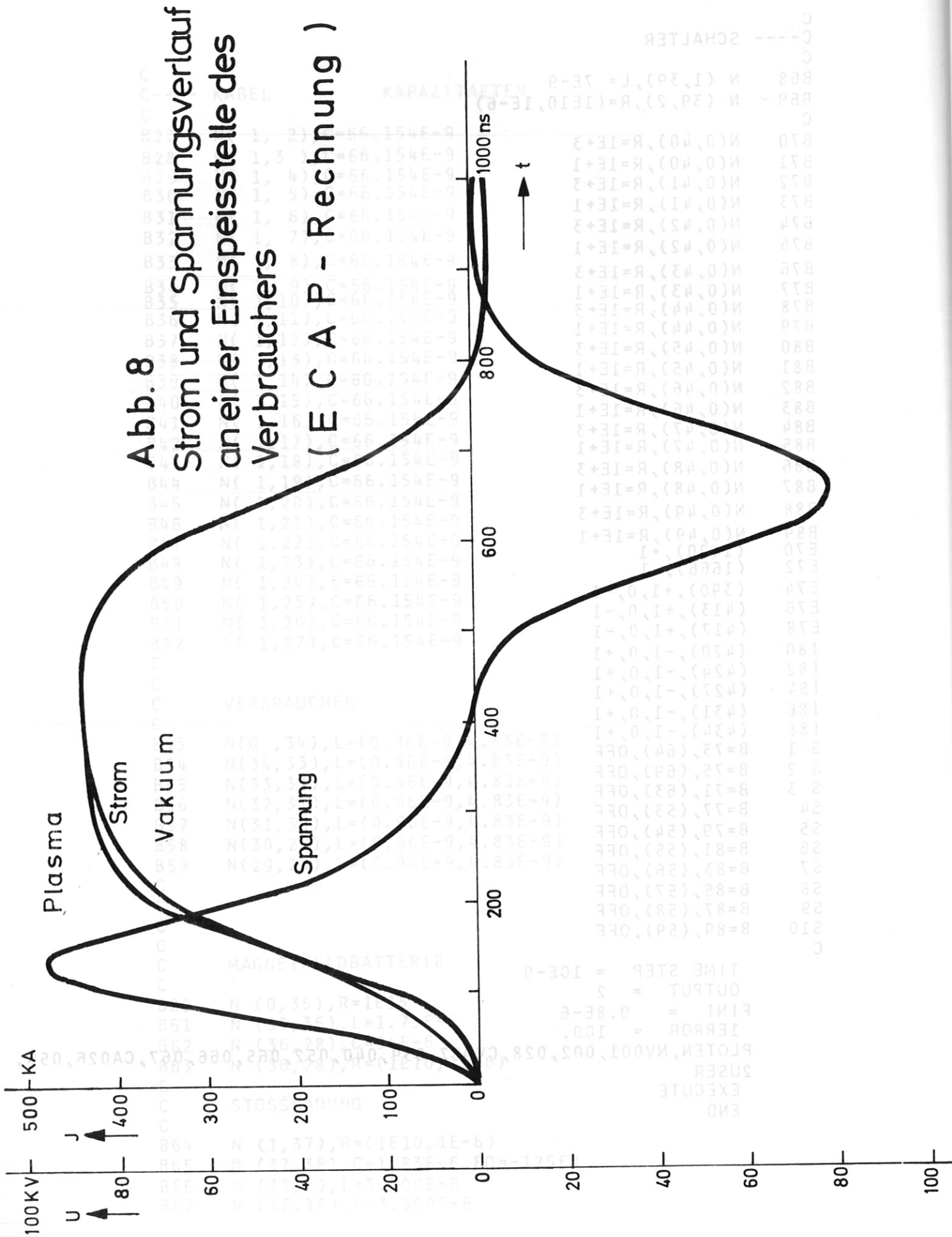


Abb. 8
 Strom und Spannungsverlauf
 an einer Einspeisestelle des
 Verbrauchers
 (E C A P - Rechnung)

SCHALTER

```

C
888 N (1,39), L = 7E-9
889 N (39,2), R = (1E10, 1E-
C
870 N(0,40), R = 1E+3
871 N(0,40), R = 1E+1
872 N(0,41), R = 1E+3
873 N(0,41), R = 1E+1
874 N(0,42), R = 1E+3
875 N(0,42), R = 1E+1
876 N(0,43), R = 1E+3
877 N(0,43), R = 1E+1
878 N(0,44), R = 1E+3
879 N(0,44), R = 1E+1
880 N(0,45), R = 1E+3
881 N(0,45), R = 1E+1
882 N(0,46), R = 1E+3
883 N(0,46), R = 1E+1
884 N(0,47), R = 1E+3
885 N(0,47), R = 1E+1
886 N(0,48), R = 1E+3
887 N(0,48), R = 1E+1
888 N(0,49), R = 1E+3
889 N(0,49), R = 1E+1
E70 (1E6)
E71 (390)
E72 (+1,0,-1)
E73 (+13)
E74 (+17)
E75 (+20)
E76 (+24)
E77 (+27)
E78 (+31)
E79 (+35)
E80 (+39)
E81 (+43)
E82 (+47)
E83 (+51)
E84 (+55)
E85 (+59)
E86 (+63)
E87 (+67)
E88 (+71)
E89 (+75)
E90 (+79)
E91 (+83)
E92 (+87)
E93 (+91)
E94 (+95)
E95 (+99)
E96 (+103)
E97 (+107)
E98 (+111)
E99 (+115)

```

```

TIME STEP = 10E-9
OUTPUT = 2
FINI = 0.8E-6
ERROR = 100.
PROTEN, WVD01, 002, 028, C
ZUSER
EXECUTE
END

```

2.7 Erdung

Sämtliche Erdverbindungen werden zentral an einem Punkt zusammengeführt. Die vierfach eingespeiste Verbraucher-spule ist über einen Erdring an vier Punkten geerdet, ähnlich wie bereits an Isar II und Turbulenzbatterie durchgeführt.

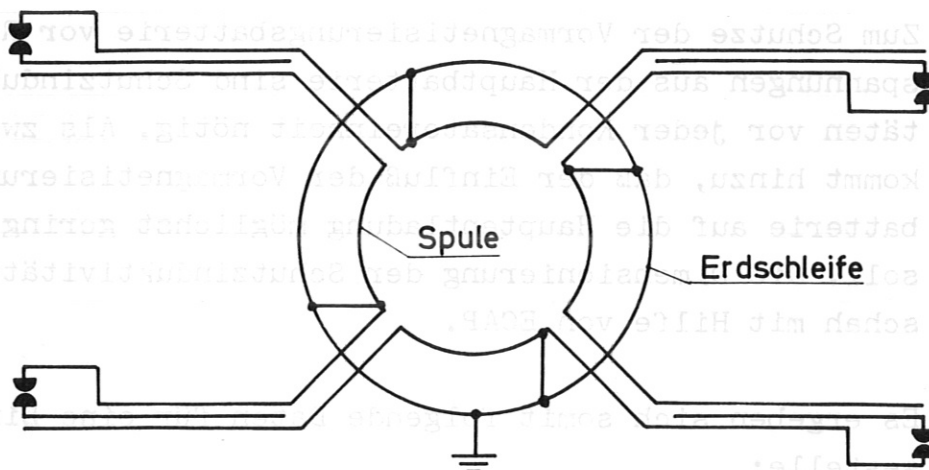


Abb. 9

Für optimale Symmetrie des magnetischen Feldes muß die Erdleitung ein geschlossener Ring sein, der theoretisch mit dem gesamten Rückfluß des Feldes gekoppelt ist. Sämtliche Geräte und Komponenten des Experiments, wie Steuerpult, Steuer-, Triggerracks, Meßkabine, sind direkt an der zentralen Erde geerdet. Die gesamte Steuerung wird über einen Trenntrafo versorgt.

2.8 Vormagnetisierungsbatterie

Die Forderung, daß die Homogenität des Axialfeldes auf der z - Achse von der Spulenmitte bis 20 cm außerhalb der Theta-Pinch-Spule 10% beträgt, ist durch eine kombinierte Spulenanordnung - Theta-Pinch-Spule mit zwei außenliegenden einwindigen Spulen - erfüllt. Die gesamte Vormagnetisierungsanlage besteht daher aus zwei getrennten Batterien.

2.8.1 Speisung direkt in die Theta-Pinch-Spule

Vorgesehen ist die Verwendung der vorhandenen Vormagnetisierungsbatterie von der Turbulenz-Anlage bestehend aus vier Gestellen à 15 kV - Einheiten. Analog der Hauptbatterie wird die Vormagnetisierungsbatterie an den vier Anschlußstellen der Spule einspeisen.

Zum Schutze der Vormagnetisierungsbatterie vor Rückspannungen aus der Hauptbatterie sind Schutzinduktivitäten vor jeder Kondensatoreinheit nötig. Als zweites kommt hinzu, daß der Einfluß der Vormagnetisierungsbatterie auf die Hauptentladung möglichst gering sein soll. Die Dimensionierung der Schutzinduktivitäten geschah mit Hilfe von ECAP.

Es ergeben sich somit folgende Daten für eine Einspeisestelle:

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| max.Ladespannung | 15 kV |
| Kapazität (5 Einheiten à 29 μ F) | 145 μ F |
| max.gespeicherte Energie | 16,3 kJ |
| Entladefrequenz | 8,43 kHz |
| Schutzinduktivität | 2,4 μ H |

2.8.2 Speisung der äußeren Spulen

Mit zwei einwindigen Spulen im Abstand von 130 mm von der Hauptspule ist eine Homogenität des Feldes von 10% auf der z - Achse bis 200 mm außerhalb der Theta-Spule zu erreichen. Die beiden Spulen haben einen Durchmesser von 500 mm und eine Länge von 60 mm. Beide Spulen sind in Reihe geschaltet und werden aus einer 15 kV-Einheit gespeist.

Daten der Batterie:

| | |
|---------------------------|------------|
| max. Ladespannung | 15 kV |
| Kapazität | 29 μ F |
| max. gespeicherte Energie | 3,26 kJ |
| Entladefrequenz | 8,43 kHz |
| Schutzinduktivität | 10 μ H |
| Induktivität einer Spule | 890 nH |

2.8.3 Betriebsdaten der Vormagnetisierungsbatterie

Für eine geforderte Homogenität von 10% und bei einem Feld von 1 kG ergeben sich folgende Daten:

a) Speisung Theta-Pinch-Spule

| | |
|-----------|----------|
| Induktion | 1 kG |
| Spannung | 10,4 kV |
| Strom | 80 kA |
| Frequenz | 8,43 kHz |
| Energie | 7,85 kJ |

b) Speisung der äußeren Spulen

| | |
|-----------|----------|
| Induktion | 860 G |
| Spannung | 2,67 kV |
| Strom | 4,1 kA |
| Frequenz | 8,43 kHz |
| Energie | 1,03 kJ |

2.9 Räumliche Aufstellung des 500 kV-Experiments

Als Aufstellungsort für das 500 kV-Experiment ist das Torgebäude T 1 (Erdgeschoß) vorgesehen. Die räumliche Disposition für das Experiment ist aus Abb.10 zu sehen.

3. Vorversuch

Im Vorversuch wurden die wesentlichen hochspannungstechnischen Fragen im Zusammenhang mit der Dimensionierung der Blumleinleitungen, der Spule und der Schalter geklärt.

Der Aufbau ist für die Erprobung von zwei Blumleinsystemen entworfen, die eine Verbraucherspule zweifach speisen. Analog 2. liegen die Bandleitersysteme in einem gemeinsamen Tank aus glasfaserverstärktem Polyester. Zur Spannungssteuerung wird Leitungswasser verwendet. Die Entladungsspule befindet sich außerhalb des Tanks. Abb.11 zeigt einen Schnitt von der Seitenansicht der Anordnung. Die Blechstärke des Cu-Bandleiters beträgt 0,2 mm.

3.1 Daten des Verbrauchers

Einwindige Spule zweiseitig eingespeist:

Für gleiches Verhältnis L/Z wie für das 500 kV-Experiment wird der Spulendurchmesser für das Modell

$$d_1 = 28,3 \text{ cm}$$

Für eine Spule gleicher elektrischer Feldstärke wäre der Durchmesser

$$d_2 = 20 \text{ cm}$$

gewählt wird $d = 25 \text{ cm } \emptyset$

Länge $l = 0,5 \text{ m}$

Induktivität $L = 33,7 \text{ nH}$

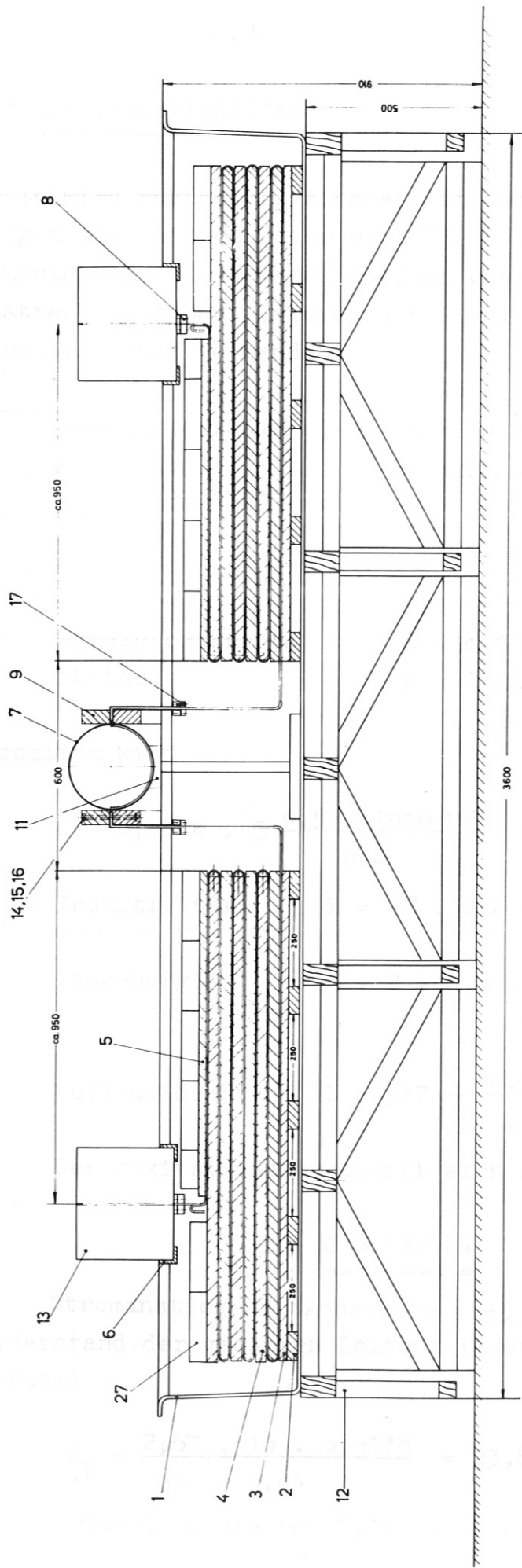


Abb. 11
 Blumleinleitung Vorversuch
 mit zweiseitig eingespeister Spule

3.2 Daten einer Batteriehälfte

Die Spule wird zweiseitig eingespeist, von je einem 1-stufigen Blumleingenerator mit 125 kV Ladespannung. Je Blumleineinheit ist eine mehrfach getriggerte Druckfunkenstrecke angebaut (siehe auch 2.4). Als Dielektrikum wird Hostaphan verwendet.

$$\begin{array}{ll} \text{Bandleiterlänge} & l = 10 \text{ m} \\ \text{Laufzeit } 2\tau & = 2 \cdot l / c \sqrt{\epsilon_r} = 2 \cdot 10 / 300\,000 \\ & \quad \cdot \sqrt{3} \text{ ns} \\ & = 115 \text{ ns} \\ & \text{=====} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Bandleiterbreite} & w = 0,5 \text{ m} \\ \text{Abstand} & h = 2 \text{ mm} \end{array}$$

Die Kapazität wird

$$C = 0,0886 \cdot 3 \frac{0,5 \cdot 1000 \text{ nF}}{0,2} = 66,5 \text{ nF}$$

$$\text{Induktivität } L = 4\pi \cdot 0,2 \frac{1000 \text{ nH}}{50} = 50 \text{ nH}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Ladeenergie} & E = 2 \cdot 0,5 \cdot 66,5 \cdot 10^{-9} \cdot 125^2 \cdot 10^6 \text{ J} \\ & = 1,04 \text{ kJ} \end{array}$$

$$\text{Wellenwiderstand } Z = 377 \frac{0,2}{50 \cdot \sqrt{3}} = 0,870 \Omega$$

Der maximale Strom ergibt sich nach ECAP

$$J = 130 \text{ kA} \\ \text{=====}$$

$$\text{Stromanstieg-Zeitkonstante} = \underline{\underline{45 \text{ ns}}}$$

Längswiderstand der gesamten Leitung (Ausschwingen nach 100 ns-Puls)

$$R_L = \frac{2,67 \cdot 10 \cdot 0,0178}{500 \cdot 0,04} = 23,8 \text{ m}\Omega$$

Eindringtiefe bei 2,14 MHz = 0,04 mm bei Kupfer

Die Querableitung der gesamten Leitung wird für einen spezifischen Wasserwiderstand von $16 \text{ M}\Omega \text{ cm}$

$$R_q = \frac{0,5 \cdot 0,2 \cdot 16 \cdot 10^6}{10\,000 \cdot 0,2} = 795 \Omega$$

und somit die Selbstentladezeitkonstante

$$T = 133 \text{ nF} \cdot 795 = 106 \mu\text{s}$$

3.3 Stoßladung

Für die Ladung der Blumleinleitung werden Marxgeneratoren vom Typ Isar I (2-stufig) verwendet.

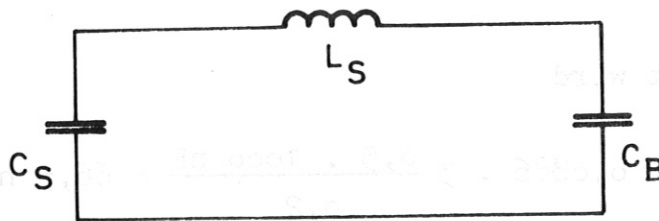


Abb. 12

Für die Ladung gilt das Ersatzschaltbild nach Abb.12 und Abb.3

Für eine Ladung der Blumleinleitung auf 125 kV wird die Marxgenerator-Spannung

$$U_S = U_B \frac{C_S + C_B}{2 C_S} = 125 \text{ kV} \cdot \frac{\frac{1 \cdot 1}{2} + 2 \cdot 0,065}{2 \cdot \frac{1 \cdot 1}{2}} = 77,3 \text{ kV}$$

d.h die Stufenspannung wird ca. 39 kV

$$\begin{aligned} \text{Energie pro Marxgenerator } E_m &= 0,5 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 39^2 \cdot 10^6 \\ &= 1,167 \text{ kJ} \\ &===== \end{aligned}$$



Abb. 13 Blumleinleitung mit einseitig eingespeister Spule und Stoßladebatterie

Für eine Stoßladefrequenz $f = 100 \text{ kHz}$ wird

$$L_S = 23,4 \mu\text{H}$$

3.4 Funkenstrecke und Triggerung

siehe unter 2.4 und 2.5

3.5 Ergebnisse des Vorversuchs

Im 125 kV-Vorversuch wurden die wesentlichen hochspannungstechnischen Fragen im Zusammenhang mit der Dimensionierung der Blumleinleitung, der Spule und dem Schalter einschließlich Triggerung geklärt. Lebensdauertests wurden bisher nur an kleinen Folienproben durchgeführt. Nach Abschluß der Funkenstreckenuntersuchungen wird ein Lebensdauertest mit der gesamten Anordnung durchgeführt.

Als erster Bauabschnitt wurde nur eine Batteriehälfte mit einer einfach eingespeisten Verbraucherspule aufgebaut. Ein Versuch mit einer zweiseitig eingespeisten Spule ist in Vorbereitung, wobei die zweite Bandleitung mit einem geringeren Folienüberstand (anstatt 200 mm nur 70 mm) aufgebaut und anschließend getestet wird.

Das Foto von Abb.13 zeigt die gesamte Anordnung des Vorversuchs. Zum Zeitpunkt der Aufnahme war nur eine Leitung mit einer einseitig eingespeisten einwindigen Spule aufgebaut. Auf der linken Hälfte des Bildes ist die mehrfachgetriggerte Druckfunkenstrecke zu erkennen. Die gesamte Blumleinleitung sowie der Funkenstreck-

ken- und Spulenanschluß liegen unter Wasser in einer Polyesterwanne. Auf der rechten Seite des Bildes befindet sich die Stoßladebatterie (zweistufiger Marx-generator).

Die bisher durchgeführten Versuche haben ergeben, daß das vorgesehene technische Konzept ausführbar ist. Die aus Polyäthylen gefertigte Funkenstrecke wurde anschließend durch eine solche aus Gießharz ersetzt, wobei sich wieder Schwierigkeiten bezüglich der Dichtigkeit ergaben, was zu einer Konstruktionsänderung der Funkenstrecke führte. Nach Fertigstellung der neuen Funkenstrecken werden die Hochspannungsversuche fortgeführt.

Ein Vergleich der gemessenen Spannungskurven mit denjenigen aus einer ECAP - Rechnung zeigt gute Übereinstimmung.

Abb.14 zeigt ein gemessenes Oszillogramm des Spannungsverlaufs an der Spule. Abb.15 zeigt den gerechneten Kurvenverlauf der Spannung mit Hilfe von ECAP auf der 360/91.

4. 125 kV-Experiment für Abteilung 1

Für physikalische Voruntersuchungen wurde eine 125 kV-Einheit mit einer Pulslänge von 200 ns aufgebaut. Die komplette Anlage besteht aus der Einrichtung für die Hauptentladung (Blumleinleitung), einer Vormagnetisierungsbatterie und einer Anlage zur Strahlungsvorionisierung (Abt.1)

4.1 Hauptentladung

Die Hauptentladungsbatterie besteht aus einer 125 kV-Einheit, wie unter 2.2 beschrieben. Die Länge der Bandleitung beträgt hier allerdings nur 20 m ; das entspricht einer Pulslänge von 200 ns.

Die Verbraucherspule hat folgende Abmessungen:

| | |
|--------------|----------------------|
| Länge | $l = 1 \text{ m}$ |
| Durchmesser | $D = 43 \text{ cm}$ |
| Induktivität | $L = 156 \text{ nH}$ |

Es ergeben sich somit folgende Daten:

| | |
|-------------------|------------------------|
| Bandleiter-Länge | $l = 20 \text{ m}$ |
| Bandleiter-Breite | $w = 0,5 \text{ m}$ |
| Isolier-Abstand | $h = 2 \text{ mm}$ |
| Kapazität | $C = 133 \text{ nF}$ |
| Induktivität | $L = 100 \text{ nH}$ |
| Energie | $E = 2,08 \text{ kJ}$ |
| Wellenwiderstand | $Z = 0,87 \Omega$ |
| Ladespannung | $U_L = 125 \text{ kV}$ |

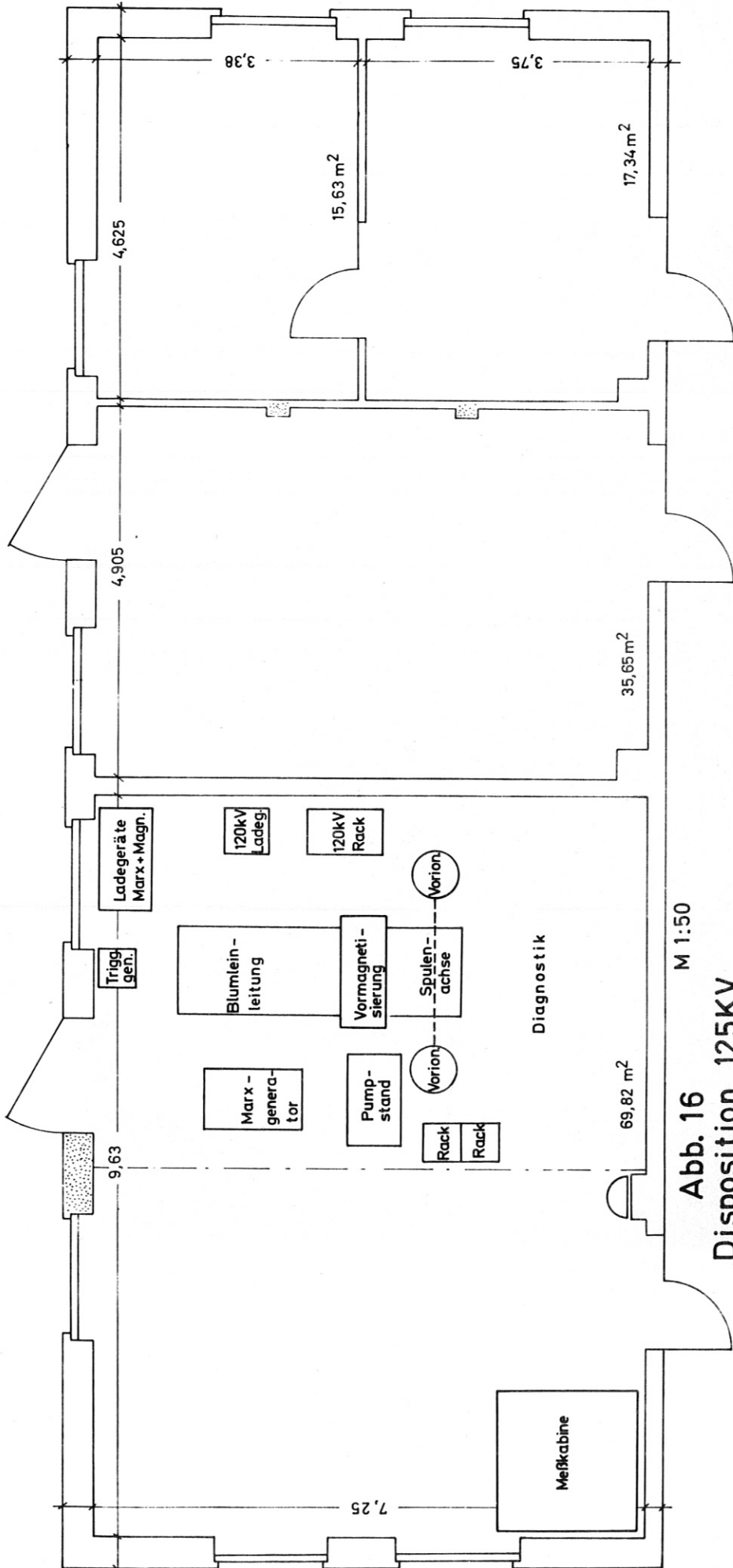


Abb. 16
Disposition 125KV
Blumleinleitung
 M 1:50

W1 125 kV - Blumleinleitung
 M 1:50
 P 3 - 181

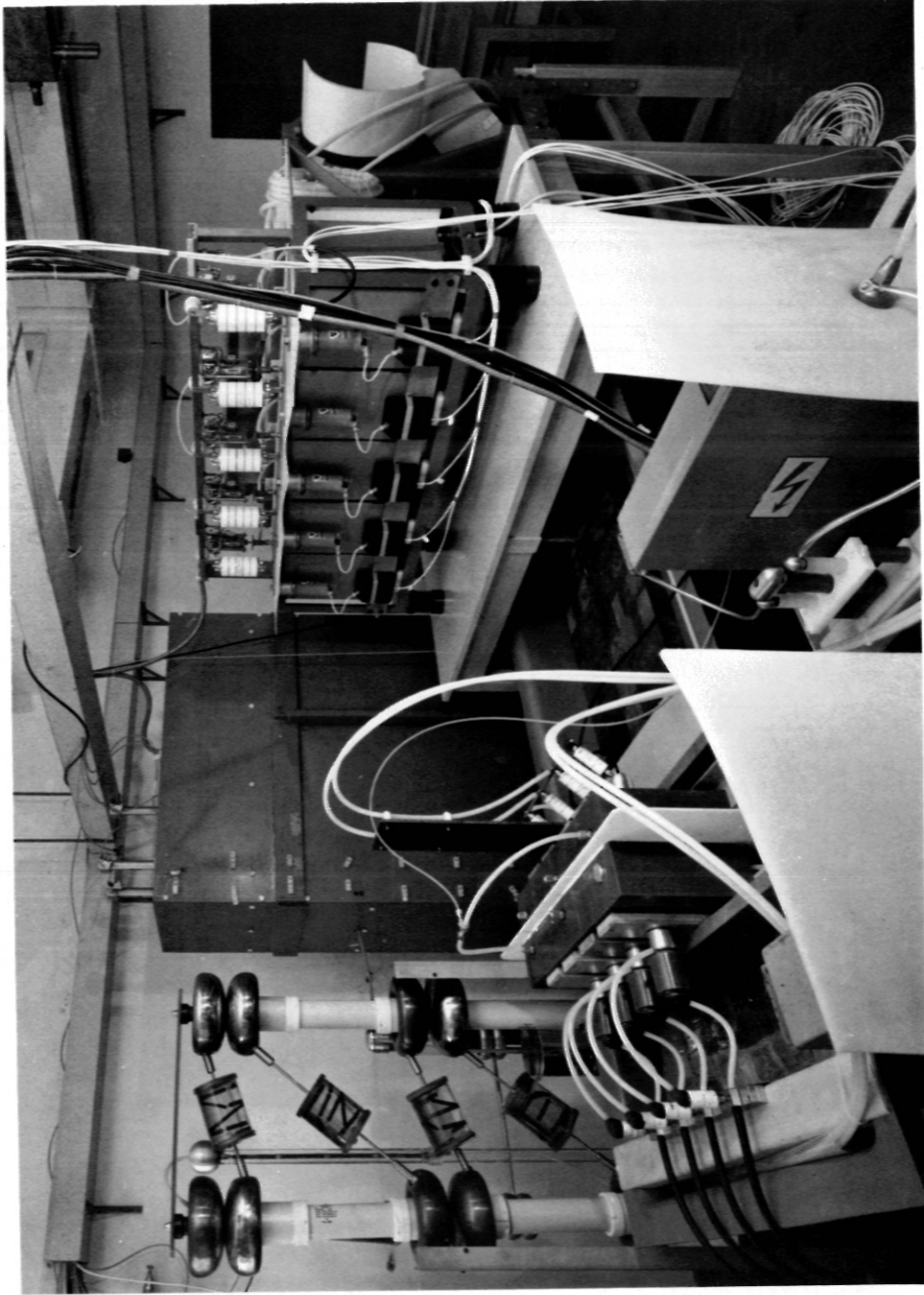


Abb.17 Blumleinleitung mit Vormagnetisierungsbatterie und Stoßladung

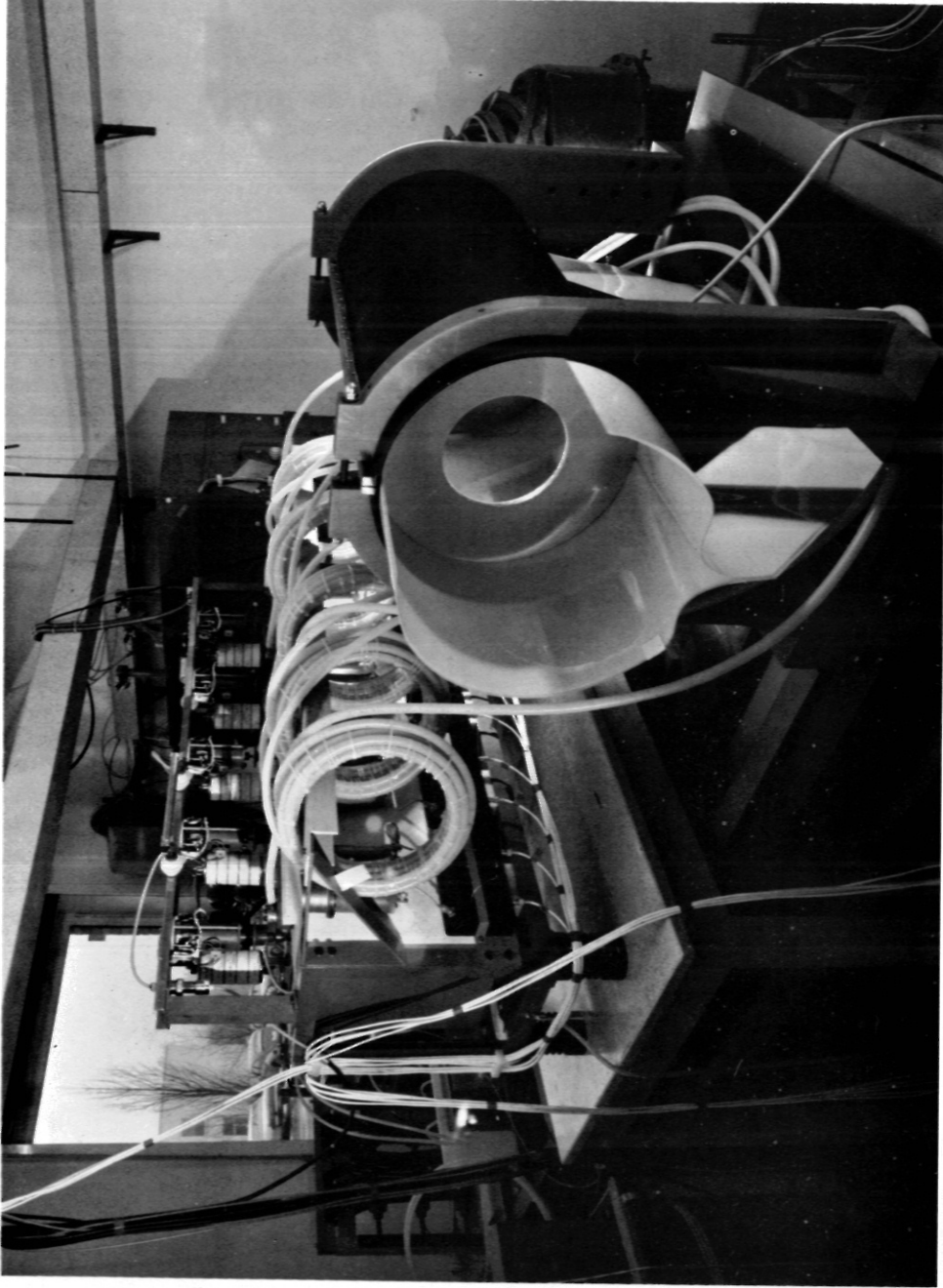


Abb. 18 Blumleinleitung mit Theta-Pinch-Spule (43 cm \varnothing) und Vormagnetisierungsbatterie

| | |
|---|----------------------------|
| max. Strom (nach ECAP) | $J = 122 \text{ kA}$ |
| max. Induktion | $B = 1,53 \text{ kG}$ |
| Stromanstiegszeitkonstante | $T_A = 96 \text{ ns}$ |
| Pulslänge | $T_B = 200 \text{ ns}$ |
| Längswiderstand der gesamten Leitung | $R_L = 44 \text{ m}\Omega$ |
| Querableitwiderstand (Wasser) | $R_q = 398 \Omega$ |
| Entladezeitkonstante | $T_L = 106 \mu\text{s}$ |

Die Disposition der Anlage ist aus Abb.16 ersichtlich. Die Fotos von Abb.17, 18 zeigen die Anlage kurz vor der Inbetriebnahme. Links auf dem Bild Abb.17 sieht man die mehrfachgetriggerte Druckfunkenstrecke in Gießharzausführung. Quer über der Wasserwanne mit der Blumleinleitung steht die Vormagnetisierungsbat-terie. Im Vordergrund des Bildes ist ein Teil der Stoßladebatterie zu erkennen.

Die Abb.18 zeigt das Experiment von der Spulenseite aus. In der Spule befindet sich noch kein Entladungsgefäß.

Zur Ladung der Blumleinleitung sind zwei Marxgeneratoren vom Typ Isar I vorhanden.

Für eine maximale Ladespannung der Leitung auf 125 kV ergibt sich eine Stufenspannung von 39 kV.

$$\text{Energie pro Marxgenerator } E_m = 1,72 \text{ kJ}$$

Bei einer Stoßladefrequenz $f = 100 \text{ kHz}$ ergibt sich für die Induktivität der Ladedrosseln

$$L_{S1} = L_{S2} = 23,4 \text{ nH}$$

4.2 Vormagnetisierung

Für die Vormagnetisierungsbatterie wurden 5 Kondensatoreinheiten der Turbulenzanlage verwendet [14]

| | |
|---------------------------|------------------------|
| Ladespannung | $U_L = 12 \text{ kV}$ |
| Entladefrequenz | $f = 5,15 \text{ kHz}$ |
| max. Induktion | $B = 700 \text{ G}$ |
| Kapazität pro Kondensator | $C_K = 29 \mu\text{F}$ |
| Energie | $E = 10,4 \text{ kJ}$ |
| Schutzinduktivität | $L_K = 33 \mu\text{H}$ |

Das komplette Batteriegestell wurde quer über der Wanne (Blumleinleitung) zwischen Start-Funkenstrecke und Theta-Pinch-Spule montiert. (Abb.17,18)

Die fünf Kondensatoreinheiten à $29 \mu\text{F}/15 \text{ kV}$ speisen über Entkopplungsspulen $L_K = 33 \mu\text{H}$, die die Spannung der Hauptentladung fernhalten, direkt in die Theta-Pinch-Spule. Die fünf Speisekabelanschlüsse sind gleichmässig über die Länge der Spule verteilt und liegen unter Wasser. Jede Kondensatoreinheit (Abb.17) ist mit einem Startignitron ausgerüstet. Zur Erzielung geringerer Crowbarwelligkeit und besserer Reduzierbarkeit besitzt jede Einheit zwei Crowbarignitrons, wobei ein Ignitron den Kondensator direkt kurzschließt und das andere die Last.

Die Batterie wird von einem Zeitverzögerungsgerät aus über ein 20 Kanaltriggergerät ausgelöst.

5. Theoretische Grundlagen für die Dimensionierung

Leitungen zur Erzeugung von Rechteckimpulsen können im allgemeinen aus konzentrierten oder verteilten Bauelementen (Kabel oder plattenförmige Leiter) aufgebaut sein. Für kurze und schnell ansteigende Impulse kommt man zur Leitung mit verteilten Bauelementen.

Eine Leitung wird im strengen Sinn als homogen bezeichnet, wenn der Leitungsquerschnitt und die Dielektrizitätskonstante des Raumes zwischen den Leitern längs der Leitung konstant ist. Homogenität besteht dann, wenn der Wellenwiderstand längs der Leitung konstant ist. Eine homogene Leitung wirkt wie eine Kettenschaltung von Vierpolen mit $L'dx$; $C'dx$; $R'dx$; $G'dx$, wobei dx (Abb.19) die Länge des infinitesimalen Leitungsstückes ist, das einem Kettenglied entspricht.

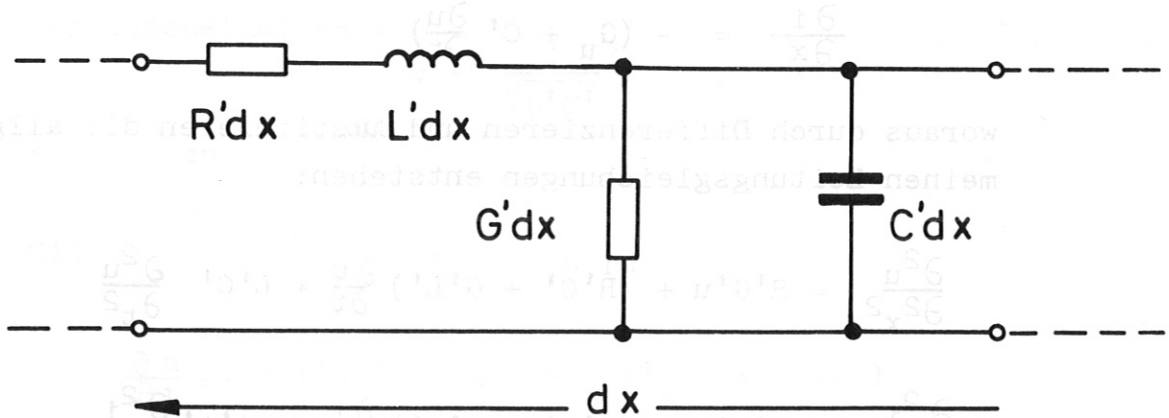


Abb.19

Als Grundlage der Betrachtungen gilt Abb.19 und die schematische Darstellung nach Abb.20

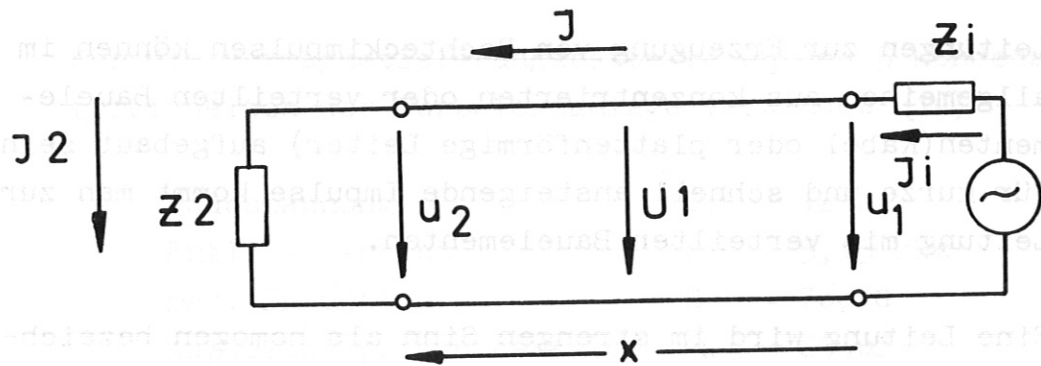


Abb. 20

Für ein Leitungselement nach Abb. 19 und 20 gilt das Gleichungspaar

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - (R' \cdot i + L' \frac{\partial i}{\partial t})$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = - (G' u + C' \frac{\partial u}{\partial t})$$

woraus durch Differenzieren und Substituieren die allgemeinen Leitungsgleichungen entstehen:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R' G' u + (R' C' + G' L') \frac{\partial u}{\partial t} + L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = R' G' i + (R' C' + G' L') \frac{\partial i}{\partial t} + L' C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

Als Sonderfall gilt die verlustlose homogene Leitung, wobei sich die Differentialgleichungen folgendermaßen vereinfachen:

$$R' = 0 \quad , \quad G' = \infty$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

Die allgemeine Lösung dieser Wellengleichung ist von der Form

$$u = f_1 (x - vt) + f_2 (x + vt)$$

Der erste Ausdruck auf der rechten Seite stellt eine von einem Punkt weglauende und der zweite Term eine zu ihm zurücklaufende Welle dar. Die Funktionen f_1 u. f_2 sind aus den Anfangs- und Randbedingungen zu bestimmen.

Die Spannung enthält somit zwei Anteile, die sich mit der Geschwindigkeit

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$$

ausbreiten.

Mit $\frac{\partial f}{\partial x} = f'$ wird

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -v f'_1 (x - vt) + v f'_2 (x + vt)$$

Für den Strom gilt entsprechend

$$i = \frac{1}{Z_0} f_1 (x - vt) - \frac{1}{Z_0} f_2 (x + vt)$$

wobei $Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$ den Wellenwiderstand

bedeutet.

Die Ausbreitung der Welle setzt sich fort, solange die Leitung homogen ist. Jede Ungleichmäßigkeit der Leitung spaltet die Welle auf in eine weitergehende und eine reflektierte Welle.

Die einfachste Form eines Impulsgenerators unter Verwendung einer Leitung ist die nach Abb. 21

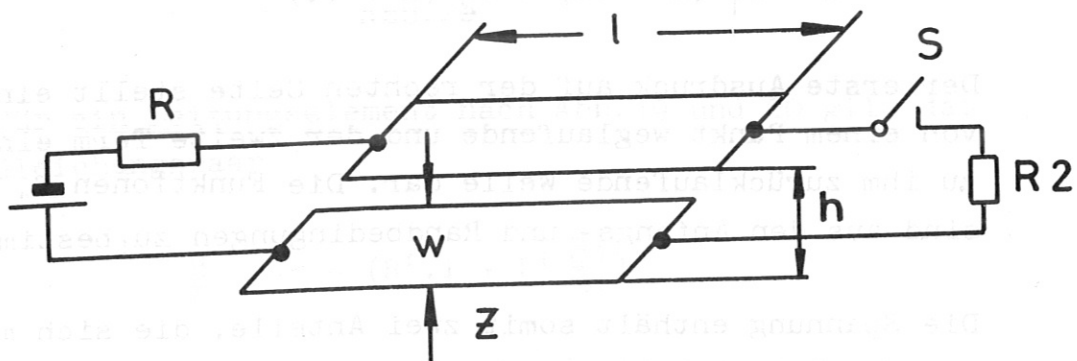


Abb.21

Im Prinzip kann eine solche Anordnung mit Kondensatoren, Kabeln oder plattenförmigen Leitern aufgebaut sein. Im folgenden sollen nur Leitungen mit plattenförmigen Stromleitern betrachtet werden. Der Wellenwiderstand einer solchen Leitung ist bei Vernachlässigung der Kanteneffekte

$$Z = \sqrt{\frac{u_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{h}{w} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Die am Ende offene Leitung wird über den Widerstand R auf das Potential U_0 aufgeladen. Nach Abschluß des Ladevorgangs wird die Leitung über den Schalter S auf den Verbraucher Widerstand R_2 entladen.

Für den Fall, daß Anpassung herrscht, d.h.

$$Z = R_2$$

läuft in Richtung des Widerstands R_2 eine Spannungswelle, die bei idealem Schalter S am Widerstand R_2 einen Rechteckpuls mit der EMK u erzeugt.

Die EMK ist eine Funktion der Zeit in der Form

$$(u) = U_0(1)_0$$

wenn der Schalter zum Zeitpunkt $t = 0$ geschlossen wird.

Die Spannung am Verbraucherwiderstand R_2 ist für eine Rechteckwelle durch die Spannungsteilung gegeben.

$$U_r = - \frac{Z}{R_2 + Z} \cdot U_0 \quad U_r = \text{rücklaufende- Spannungswelle}$$

d.h. für $Z = R_2$

$$U_r = - \frac{U_0}{2}$$

Am Verbraucherwiderstand steht also nur die halbe Ladenspannung an.

Die Pulslänge der Spannung am Widerstand R_2 ist dabei

$$\tau_0 = \frac{4l}{v}$$

wobei v die Feldausbreitungsgeschwindigkeit im Dielektrikum ist.

Die Eigenfrequenz der Leitung errechnet sich dann zu

$$f_e = \frac{v}{4l}$$

$$f_e = \frac{1}{4l \sqrt{L' \cdot C'}}$$

Die gespeicherte Energie in der Leitung erhält man aus

$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

für $Z = \sqrt{\frac{u_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{h}{w \sqrt{\epsilon_r}}$ und $L = \frac{1}{u_0} \cdot h \cdot \frac{1}{w}$ wird

$$E = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l \cdot w}{h} \cdot U_0^2$$

Eine andere Form der Pulserzeugung ermöglicht das geladene Kabel, das an einem Ende kurzgeschlossen wird, während am anderen offenen Ende der Leitung nach der Laufzeit τ mit einer Pulslänge 2τ ein Puls mit dem Pegel

$$U = 2 U_0$$

entsteht.

Diese Art der Impulserzeugung, bei der man Spannungen der doppelten Höhe der Ladespannung erzeugt, ist aber nur für Triggerkreise geeignet, da das eine Ende der Leitung nicht belastet werden kann.

Um die Ladespannung in voller Höhe am Verbraucher ausnützen zu können, wurde eine Anordnung mit 2 Leitungen und nur einem Schalter von A.D.Blumlein [15] 1941 zum Patent angemeldet. (Genauere Beschreibung der sogenannten Blumleinleitung unter 2.2)

Das Ersatzschaltbild nach Abb. 22 zeigt in einpoliger Darstellung eine Blumleinleitung mit der ortsabhängigen Spannungsverteilung zu einem Zeitpunkt nach der ersten Reflexion. Die Spannungsverteilung ist ermittelt aus der Überlagerung der stationären Verteilung im geladenen Zustand und dem Verhalten der Leitung bei einseitigem Einlaufen einer Rechteckwelle.

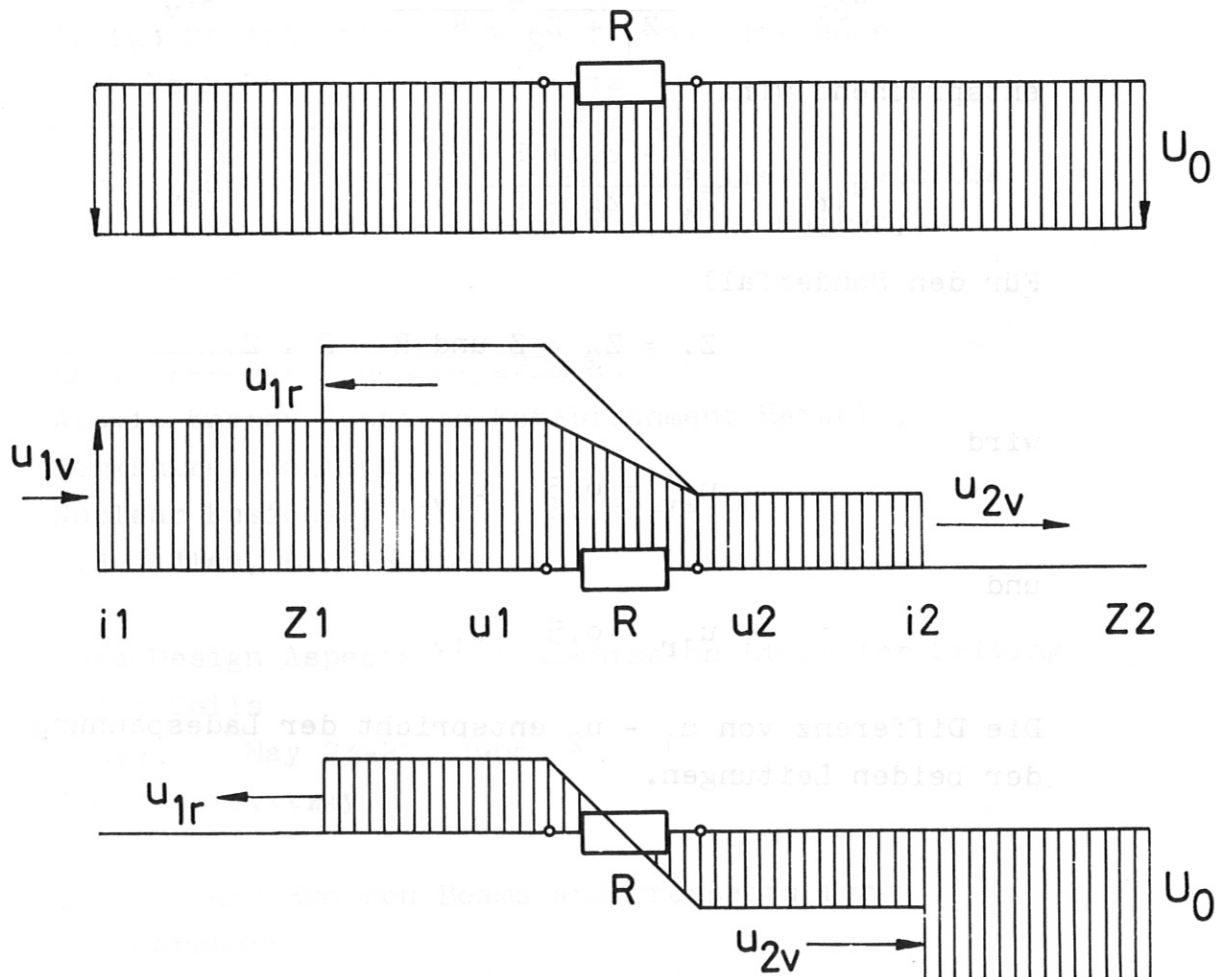


Abb. 22

Die Spannungen vor und hinter dem Widerstand R unterscheiden sich durch den Spannungsabfall im Widerstand. Als Voraussetzung wird Stromgleichheit in beiden Leitungen angenommen.

$$i_1 = i_2$$

$$i_{1v} + i_{1r} = i_{2v}$$

$$u_1 - u_2 = i_2 R$$

u_v = vorlaufende Welle

u_r = rücklaufende Welle

$$u_{1v} + u_{1r} - u_{2v} = R \cdot i_{2v}$$

$$\frac{u_{1v}}{Z_1} - \frac{u_{1r}}{Z_1} = \frac{u_{2v}}{Z_2}$$

$$u_{2v} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} u_{1v}$$

entsprechend wird

$$u_{1r} = \frac{Z_2 - Z_1 + R}{Z_1 + Z_2 + R} u_{1v}$$

Für den Sonderfall

$$Z_1 = Z_2 = Z \text{ und } R = 2 \cdot Z$$

wird

$$u_{2v} = 0,5 \cdot u_{1v}$$

und

$$u_{1r} = 0,5 \cdot u_{1v}$$

Die Differenz von $u_1 - u_2$ entspricht der Ladespannung der beiden Leitungen.

Literatur

- [1] Vorläufige Projektbeschreibung zum 500 kV-Theta-Pinch für Abt. 1 21.3.1969 G.Herppich; A.Knobloch
- [2] Projekt "500 kV-Theta-Pinch zur Erzeugung stationärer stoßfreier Stoßwellen" M. Keilhacker, R.Chodura, M.Kornherr, H.Niedermeyer
- [3] Collisionless Shock Waves and Turbulent Heating in High Voltage Theta Pinches June 68, CN-24/1-8 A.W. De Silva, D.F. Düchs, G.L.Goldenbaum, H.R. Griem, E.A. Hinth, A.C. Kolb, H.J. Kunze, J.M. Vitkovitzky
- [4] Design Studies for Ultra-Fast. Low Impedance High-Peak-Power Pulsed Systems Technical Report No. AFWL-TR-(5-21) Field Emission Corporation McMinnville, Oregon/USA J.L. Brewster, F.M. Charbonnier, L.F. Garret, K.W. Riegelmann
- [5] An Ultra-Fast Pinch Experiment Atomic Energy Research Establishment Harwell, Berkshire, England Nuclear Fusions 3 (1963), S. 62-73 J.H. Adlam, L.S. Holmes
- [6] Some Design Aspects of Transmission Lines for Driving Theta Coils Frascati, May 23-27, 1966 J.M. Vitkovitzky
- [7] Intense MeV Electron Beams and Prospects for Accelerators Physics Today, June 1969, S.59, 60

- [8] A Multiple Arc 100 kV 2,0 MA Solid Dielectric
Switch and Coil Assembly
5th Symposium on Fusion Technology, July 68/Paper 26
P.M. Barnes, K. Harries, T.E. James, J. Phillipott
- [9] Crowbar System at Isar I
E.v.Mark, H. Wedler
Report 4/59 1968 IPP
- [10] 125 kV-niederinduktive Mehrkanal-Druckfunkenstrecke
Labornotiz Nr.4, 5.3.1969
J.E. Gruber
- [11] 5 Nanohenry 60 kV Multiple and single Arc Spark Gaps
5th Symposium on Fusion Technology, July 68/Paper 21
T.E. James, P.M. Barnes, J.L.Browning
- [12] Handbuch zur Benützung des Programmsystems ECAP
G. Nützel, W.Hardt
In Vorbereitung
- [13] Impulsschaltungen
A.P. Speiser, Springer-Verlag
- [14] Capacitor Banks for a Turbulence Heating Experiment
IPP 4/50, June 1968
G. Herppich, A.Knobloch, G. Müller
- [15] Improvements in or relating to Apparatus for Generating
Electrical Impulses
A.D. Blumlein, Patent Specification 589, 127 Oct.10, 1941