

July 1968
R-C Transient Suppression Units
R-C Beschaltungseinheiten

J.G. Bäumlér, R.-C. Kunze

IPP 4/53

July 1968

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

R-C Transient Suppression Units
R-C Beschaltungseinheiten

J.G. Bäumlner, R.-C. Kunze

Airport

IPP 4/53

Julii 1968

Um Überspannungen abzumildern, die in ungeschlossenen evastolen Systemen durch Reflektionen entstehen, wurden R-C Beschaltungseinheiten entwickelt. Sie bestehen aus einer konzentrierten Kapazität mit einem Serienwiderstand, die unabhängig von Spannung und Frequenz sind. Es wurden bisher verschiedene Typen von 10 nF und $2,6 \Omega$ bis 130 nF und $1,05 \Omega$ gebaut, alle für eine Spannung von 55 kV mit einer Induktivität von weniger als 8 nH.

To damp overvoltage caused by reflections in unterminated coaxial systems, R-C-transient suppression units were developed. They consist of a concentrated capacitance with a resistor in series, which are independent of voltage and frequency. We have built several types of these units from 10 nF and $2,6 \Omega$ to 130 nF and $1,05 \Omega$ all for a voltage of 55 kV with an inductance less than 8 nH.

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.

J.G. Bäumler, R.C. Kunze

Juli 1968

Abstract

Um Überspannungen abzdämpfen, die in unabgeschlossenen evasialen Systemen durch Reflektionen entstehen, wurden R-C Beschaltungseinheiten entwickelt. Sie bestehen aus einer konzentrierten Kapazität mit einem Serienwiderstand, die unabhängig von Spannung und Frequenz sind. Es wurden bisher verschiedene Typen von 10 nF und $2,6 \Omega$ bis 130 nF und $1,05 \Omega$ gebaut, alle für eine Spannung von 55 kV mit einer Induktivität von weniger als 8 nH.

To damp overvoltags caused by reflections in unterminated coaxial systems, R-C-transient suppression units were developed. They consist of a concentrated capacitance with a resistor in series, which are independent of voltage and frequency. We have built several types of these units from 10 nF and $2,6 \Omega$ to 130 nF and $1,05 \Omega$, all for a voltage of 55 kV with an inductance less than 8 nH.

1) Einleitung

In Stoßstromanlagen, in denen niederinduktive Leiteranordnungen wie koaxiale Kabel oder Bandleiter zur Energieübertragung eingesetzt werden müssen, lassen sich meistens Sprungstellen im Wellenwiderstand nicht vermeiden. Hier kommt es dann zu erheblichen Spannungsüberhöhungen durch reflektierte Wellen. Dadurch würde es notwendig, die gesamte Isolation, besonders aber diejenige des Verbrauches und des vorgeschalteten Sammelsystems wie Kollektor und Vorkollektor, für unnötig hohe Spannungen auszulegen, wodurch wiederum die Anlageninduktivität ansteigen würde.

Ein Abschluß der Leiter mit rein ohmschen Widerständen ist selten möglich, da die Zeitkonstante aus dem resultierenden Wellenwiderstand bei vielen parallelen niederinduktiven Leiteranordnungen und der relativ kleinen Induktivität des Verbrauchers kleiner ist als die Halbwellenzeit der aufgeprägten gedämpften Schwingung. Damit würde ein sehr großer Teil der eingespeisten Energie in den Abschlußwiderständen in Wärme umgesetzt und vernichtet werden.

Eine andere Möglichkeit besteht in einem Abschluß, der aus einer konzentrierten Kapazität mit einem ohmschen Serienwiderstand besteht. Der Bericht soll einen Überblick über die Entwicklung und den Einsatz solcher kombinierter R-C Einheiten geben.

2) Anforderungen

Die Forderungen an die Eigenschaften der R-C Einheiten leiten sich aus den Daten der Bauelemente der Anlage ab. In allen bisherigen Anwendungsfällen betrug die Ladespannung der Batterien 40 kV (1, 2, 3). Damit ergab sich unter Berücksichtigung der Spannungsverteilung der Grundwelle und der Daten der Anlagenteile in guter Übereinstimmung sowohl rechnerisch wie auch aus Messungen an Analogmodellen (4) und Anschnittmodellen im Maßstab 1 : 1, daß die maximale Scheitelspannung am Beschaltungsglied je nach dessen Anpassung zwischen 50 und 80 kV liegt.

Diese Spannung setzt sich aus der Grundwelle, also der gedämpften Entladung der Kondensatorbatterie (20 ... 500 kHz) und der überlagerten Transienten zusammen, die einer Frequenz von 2 bis 20 MHz entspricht (1, 2, 3). Damit die Beschaltungseinheit nicht wie eine Induktivität wirkt, muß ihre Eigenfrequenz möglichst groß sein. Dies entspricht etwa folgender Bedingung:

$$\frac{1}{f_e} < 4 l \cdot \frac{1}{v} \quad \text{mit}$$

f_e : Eigenfrequenz der Beschaltungseinheit (Hz)

l : Länge der Lastkabel (cm)

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Lastkabeln (cm/sek).

Außerdem muß die Kapazität der Beschaltungsglieder bis zu ihrer Eigenfrequenz und bis zur Nennspannung unabhängig von Frequenz und Spannung sein, da im anderen Fall die Anpassung sich zeitlich ändern würde, je nach dem Verlauf der auftretenden Spannungswelle. Von der Geometrie her ergeben sich durch die konstruktiven Merkmale der im IPP verwendeten Kollektorsysteme und den niederinduktiven Anschluß an diese für die Beschaltungseinheiten Abmessungen, bei denen Länge und Höhe sehr groß gegen die Dicke wird.

3) Konstruktiver Aufbau

Bisher wurden, durch Abmessungen und Kapazitätswert bestimmt, zwei unterschiedliche Arten von Einheiten gebaut. In der Anlage Isar I stand genügend Platz in der Dickenrichtung der Einheiten zur Verfügung, sodaß in konventioneller Weise eine Schaltung aus einzelnen Wickeln als Grundelement gewählt werden konnte. Es sind jeweils 7 Wickel in Reihe geschaltet, 6 solcher Wickelpakete liegen parallel. Die Kontaktierung der Wickel erfolgt stirnseitig in der Art, daß die Belege (8 μ Al) jeweils an der gegenüberliegenden Seite über das Dielektrikum herausgeführt und mit Kupferblechen geklammert und verschraubt sind. Der einzelne Parallelzweig entspricht daher einem mäanderförmigen Leiter mit dem Abstand der mittleren Wickeldicke. Die Pakete sind zusammengepreßt und werden mit zwei verschweißten Halbschalen aus Polyäthylen auf das Dickenmaß gehalten, womit eine vom Gehäuse unabhängige Montage ermöglicht wird. Die Wickelpakete werden an einem Ende mit der Gehäuse-

durchführung verschraubt, das andere Ende wird mit dem Serienwiderstand verbunden, der unterhalb des Wickelpaketes am Boden der Beschaltungseinheit angeordnet ist.

Das Gehäuse besteht aus Plexiglas und ist allseitig öldicht verklebt. Die Durchführung befindet sich im Deckel und besteht jeweils aus zwei Schienen, die mit Stehbolzen durch Bohrungen im Deckel verbunden sind. Die Bolzen werden durch Dichtungsringe gegen den Deckel abgedichtet. Die beiden außerhalb des Gehäuses liegenden Schienen sind durch einen Plexiglassteg gegeneinander isoliert und bilden einen Anschluß für Bandleiter. Gehäuse und Deckel sind miteinander verklebt.

Der Serienwiderstand besteht aus einem Manganinband ($\rho = 0.42 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$), das mäanderförmig zusammengelegt ist und mit einer Lagenisolation aus Mylar-Folie versehen wird. Die ganze Anordnung ist mit Epoxyharz zu einem Block vergossen, aus dem zwei Kupferbleche als Bandleiteranschluß herausragen.

Für die Anlagen Isar II und Turbulenzheizung, mußte wegen der Dickenabmessungen der Beschaltungseinheiten, bedingt durch die Abmessungen der Vorkollektoren, ein völlig anderer Aufbau der Einheiten gewählt werden.

Es werden Isolierfolien aus Hostaphan plan aufeinandergeschichtet. Die Belegungen bestehen aus Aluminium-Folien (10μ), die jeweils an der gegenüberliegenden Stirnseite herausgeführt sind und nach doppelter Dielektrikumsdicke erneut in das Paket eingreifen. Damit bilden die Al-Folien einzelne U-förmige Anordnungen, die aneinandergereiht kammartige Gebilde darstellen, die von beiden Stirnseiten in das Isolierfolienpaket hereinragen. Die Endkontakte werden von Cu-Platten dargestellt, die mit einer Plexiglasplatte gegeneinander verspannt sind.

Wegen der mit steigender Dielektrikumsdicke abnehmenden Glimmeinsatzfeldstärke (7) wurde die wirksame Dielektrikumsdicke durch Aufteilung in 5 in Serie geschalteter Gruppen herabgesetzt. Jedes Einzeldielektrikum besteht aus 3 Lagen Hostaphan von je 50μ Dicke. Die Parallelschaltung wird

je nach geforderter Kapazität vorgenommen und ist z.B. bei der Beschaltungseinheit für Isar II 41-fach.

Das Schichten der Folien erfolgt in einem staubarmen Raum, wobei jede einzelne Folie vorher mit einem Antistatic-Tuch abgewischt wird, um Fremdkörper, die beim späteren Pressen des Paketes zu Beschädigungen führen, zu entfernen. Außerdem wird jede Folie einzeln elektrisch geprüft mit einer Feldstärke von 120 kV/mm Gleichsp. Der Prüfausfall beträgt ca. 3 %. Aus Vorversuchen, die den Einfluß des Abwischens auf das elektrische Verhalten der Folien ermitteln sollten, ging hervor, daß dadurch die mittlere Durchschlagspannung um 10 % steigt, während die mittlere Abweichung vom Mittelwert gleichzeitig kleiner wird. Allerdings traten einige Tiefdurchschläge auf, die jedoch bei der elektrischen Prüfung der Folien erkannt werden können, sodaß für die Beschaltungseinheit das Folienverhalten verbessert wird.

Bei diesen Beschaltungseinheiten ist der Widerstand aus Megapyrband ($\rho = 1,4 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$) wie schon oben beschrieben aufgebaut, jedoch bildet hier der Widerstand mit dem Gehäusedeckel eine Einheit aus Epoxyharz, die gleichzeitig als Träger des Folienpaketes dient. Der Deckel ist durch eine zweistufige Klebung mit dem Gehäuse aus Plexiglas verbunden. Die Bandleiterdurchführungen werden durch in den Deckel eingegossene Schienen gebildet.

5) Elektrische Eigenschaften

Die elektrische Belastung der Beschaltungseinheiten ist vorwiegend eine pulsformige Spannungsbelastung. Durch den in Serie liegenden Dämpfungswiderstand wird der Strom auf einen relativ niedrigen Wert begrenzt, sodaß die Auslegung des Dielektrikums hauptsächlich von der Durchschlagspannung und der Glimmeinsatzspannung bestimmt wird (5). Berücksichtigt man ferner, daß bei dem Einsatz von Kunststoff wie Polytherephlensäureester oder Polystyrol als Dielektrikum der Abstand zwischen Glimmeinsatzspannung und Durchschlagspannung, bezogen auf das quasihomogene Dielektrikum, sehr groß ist, so ist daraus ersichtlich, daß in ganz besonderem Maße die Lebensdauer von der Glimmeinsatzspannung und, bei deren Überschreitung, vom

Ionisationsgrad abhängig ist (6, 7).

Dies wird noch dadurch verstärkt, daß in einem derartigen Schichtdielektrikum aus Kunststoff-Folien im Wechsel mit einem flüssigen Tränkmittel einmal entstandene Gasblasen lediglich durch inekulare Absorbtion im Tränkmittel aufgenommen werden können. Eine Anlagerung am Kunststoff scheidet aus, ein Auswandern der Gasbläschen aus dem aktiven Dielektrikum in den umgebenden Raum ebenfalls, da die Flüssigkeitsspalte äußerst gering sind, wenn der zur Kapazitätskonstanz nötige Preßdruck angewendet wird.

Daraus geht hervor, daß das wesentliche Merkmal der zu erwartenden Lebensdauer der Beschaltungseinheiten die Glimmeinsatzspannung ist. Wir haben daher alle bisherigen Kondensatoren so ausgelegt, daß die maximale Betriebsspannung unter der Glimmeinsatzspannung liegt. Ausschlaggebend für den Einsatz von Kunststoff als Dielektrikum war die Forderung nach konstanter Kapazität im Frequenzbereich von 20 kHz bis zu einigen MHz und im Spannungsbereich bis 60 kV. Papier schied damit als Dielektrikum aus, da dessen Dielektrizitätskonstante oberhalb 1,5 - 2 MHz (bei Raumtemperatur) stark absinkt. Keramik auf der anderen Seite hat eine starke Abhängigkeit der DK- von der Feldstärke und ist auch bei hohen Spannungen mit Reihenschaltungen umständlich zu verarbeiten.

6) Imprägnierung

Wie aus dem vorigen Absatz hervorgeht, ist die Höhe der Glimmeinsatzspannung im Dielektrikum von großer Bedeutung für die Lebensdauer der Beschaltungseinheiten. Neben der Geometrie der Elektroden, die nicht verändert werden kann, ist daher die Relation der Dielektrizitätskonstanten der einzelnen Schichten und eine gute Durchtränkung besonders wichtig (5). Gas-einschlüsse müssen unter allen Umständen vermieden werden, was bei den von uns eingesetzten Isolierfolien im Gegensatz zu Papier dadurch erschwert wird, daß die Folien undurchlässig für Gase und Flüssigkeiten sind. Dadurch muß beim Tränken jeder einzelne Spalt zwischen den Schichten mit Tränkmittel gefüllt werden, während bei Papier das Gesamtdielektrikum als

Spalt wirksam ist. Es muß also ein möglichst niederviskoses Imprägniermittel angewendet werden. Wir haben ein sehr dünnflüssiges Öl gewählt ($\epsilon = 2,5$) und zu Lasten der höheren Feldstärke im Tränkmittel auf eine hohe DK verzichtet. Die Tränkung erfolgte sehr langsam (Steiggeschwindigkeit in der Beschaltungseinheit ca. 10 cm/Std) in Spaltrichtung von unten bei einem Vakuum von ca. $5 \cdot 10^{-3}$ Torr, also knapp oberhalb des partiellen Dampfdruckes des auf ca. 50° C vorgewärmten Mineralöles. Das Öl wurde bei gleichem Druck und etwa gleicher Temperatur im Vorratsgefäß 48 Std. entgast und entfeuchtet. Nach der Tränkung wurden die Kondensatoren sofort verschlossen, sodaß eine erneute Gas- und Wasseraufnahme im Öl nicht möglich war. Untersuchungen an Versuchsmustern zeigten, daß eine einwandfreie Tränkung erfolgt war, was auch aus der später genannten hohen Glimmeinsatzspannung hervorgeht.

7) Meßwerte:

a) Beschaltungseinheit für Isar I

Kapazität: 120 nF \pm 2 %

Induktivität ¹⁾ < 8 nH

Reihenwiderstand 1,5 Ω

Lebensdauer ²⁾ bei 55 kV $\hat{>}$ $250 \cdot 10^3$ Pulse

b) Beschaltungseinheit für Isar II

Kapazität: 96 nF \pm 1 %

Induktivität ¹⁾ < 3 nH

Reihenwiderstand 0,888 Ω

Lebensdauer ²⁾ bei 55 kV $\hat{>}$ $250 \cdot 10^3$ Pulse

c) Beschaltungseinheit für Turbulenzbatterie

Kapazität: 10 nF \pm 1 %

Induktivität ¹⁾ < 3 nH

Reihenwiderstand 2,6 Ω

Lebensdauer ²⁾ bei 55 kV $\hat{>}$ $250 \cdot 10^3$ Pulse

1) Die Induktivität wurde bei kurzgeschlossenem Anschluß an einem Kondensator bestimmt, dessen Serienwiderstand durch

Kupferband gleicher Anordnung ersetzt war. Dadurch wurde das System schwingfähig und es konnte sowohl durch Resonanzmessungen als auch durch induktive Ankopplung von sehr steilen Spannungspulsen die Eigenfrequenz abgemessen werden.

- 2) Die Lebensdauer wurde an je 2 Einheiten ermittelt. Dabei wurde die Prüfung jedoch in allen Fällen zwischen $3 \cdot 10^5$ und $5,5 \cdot 10^5$ Pulsen abgebrochen, ohne daß ein Defekt aufgetreten war.

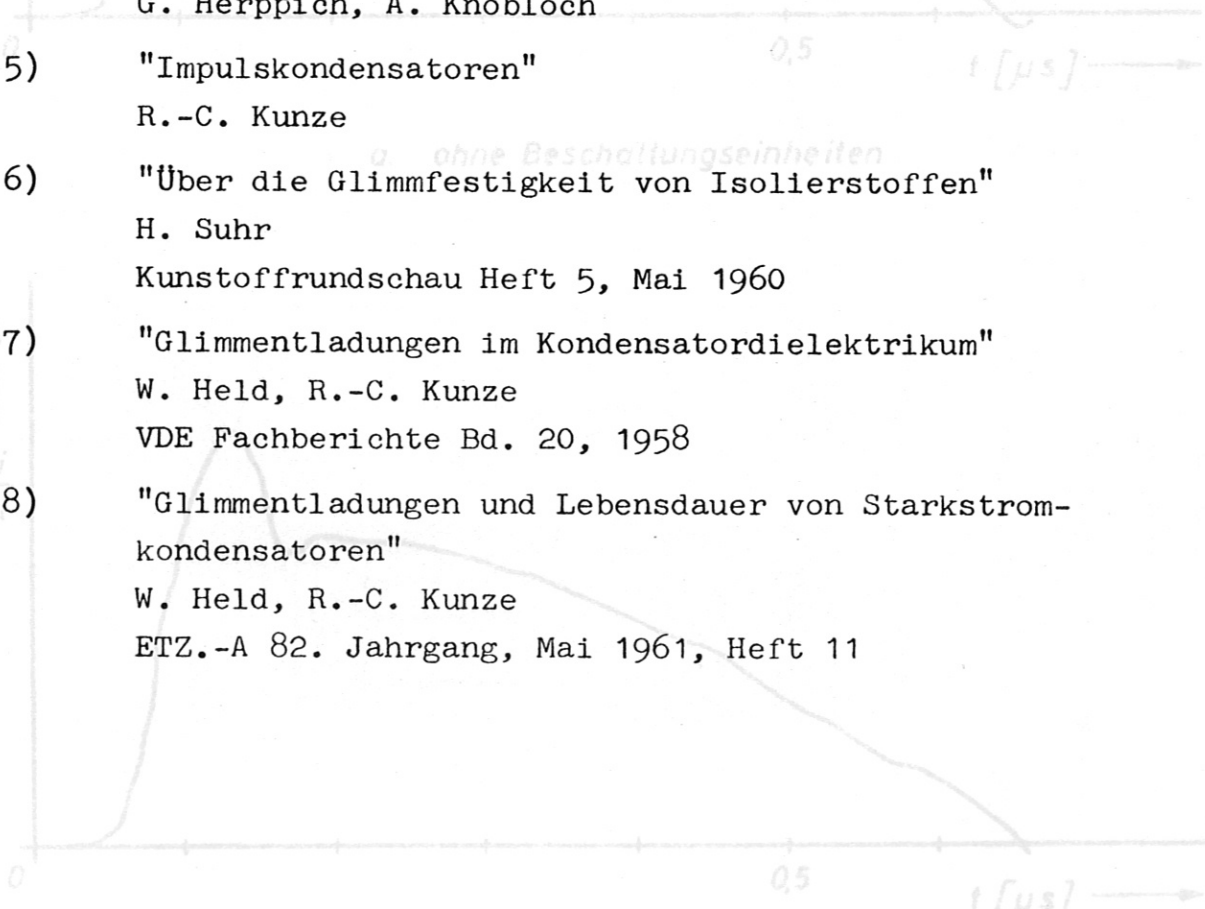
Die Glimmeinsatzspannung aller bisher gebauten Beschaltungseinheiten liegt zwischen 57 59 kV. Dies geht aus Dauerversuchen hervor, die an Teilkondensatoren mit verschiedenen hohen Spannungen durchgeführt wurden. Dabei sank die Lebensdauer bei Überschreiten des obigen Wertes auf $28 \dots 30 \cdot 10^3$ Pulse ab. Außerdem trat sichtbare Blasenbildung an den Beleggrändern auf. Nach der Demontage solcher Teilkondensatoren konnten auf den Folien eindeutig Glimmspuren (Ölzerstörung) erkannt werden (8), während bei 55KV auch nach $5,5 \cdot 10^5$ Pulsen keinerlei Veränderung am Dielektrikum festgestellt werden konnte.

Bilder im Anhang

- 1) Spannung am Kollektor Turbulenz-Batterie mit und ohne Beschaltung
- 2) Beschaltungseinheit Isar I (Schnittbild)
- 3) Beschaltungseinheit Isar I (Foto)
- 4) Beschaltungseinheit Isar II (Schnittbild)
- 5) Beschaltungseinheit Isar II (Foto)
- 6) Beschaltungseinheit Isar II (Schaltbild)

Literaturverzeichnis

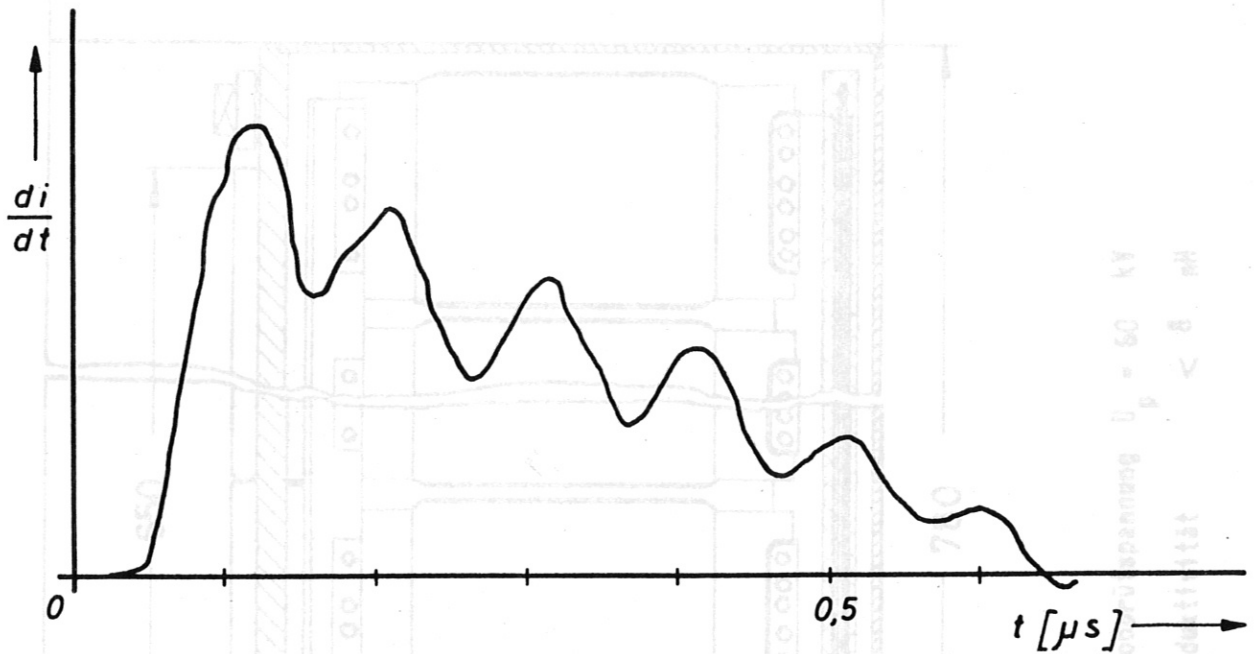
- 1) "Isar II, a 500 kJ double-fed Theta-Pinch"
G. Klement, A. Knobloch, R.-C. Kunze, G. Nützel,
H. Schlageter,
IPP 4/58, Juni 1968
- 2) "Combined Start and Crowbar Spark Gap with Wide
Operating Range"
H. Häglsperger, G. Klement, R.-C. Kunze, C. Müller,
IPP 4/28, April 1966
- 3) "Capacitor Banks for a Turbulence Heating Experiment"
G. Herppich, A. Knobloch, G. Müller
IPP 4/50, 1968
- 4) "An Analog System for the Design of Switched Discharge
Circuits in Plasma Physics"
G. Herppich, A. Knobloch
- 5) "Impulskondensatoren"
R.-C. Kunze
- 6) "Über die Glimmfestigkeit von Isolierstoffen"
H. Suhr
Kunststoffrundschau Heft 5, Mai 1960
- 7) "Glimmentladungen im Kondensatordielektrikum"
W. Held, R.-C. Kunze
VDE Fachberichte Bd. 20, 1958
- 8) "Glimmentladungen und Lebensdauer von Starkstrom-
kondensatoren"
W. Held, R.-C. Kunze
ETZ.-A 82. Jahrgang, Mai 1961, Heft 11



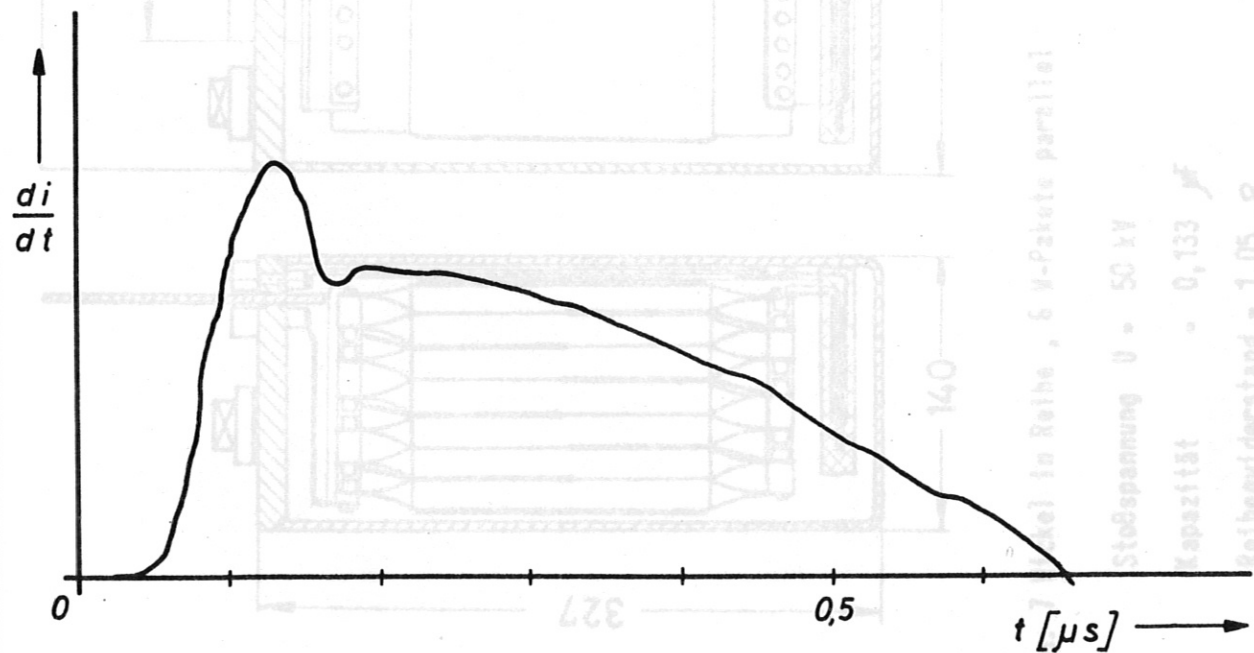
b. mit Beschaltungseinheiten

**Bild 1 Turbulenz - Batterie
Spannung am Verbraucher**

Bild 2

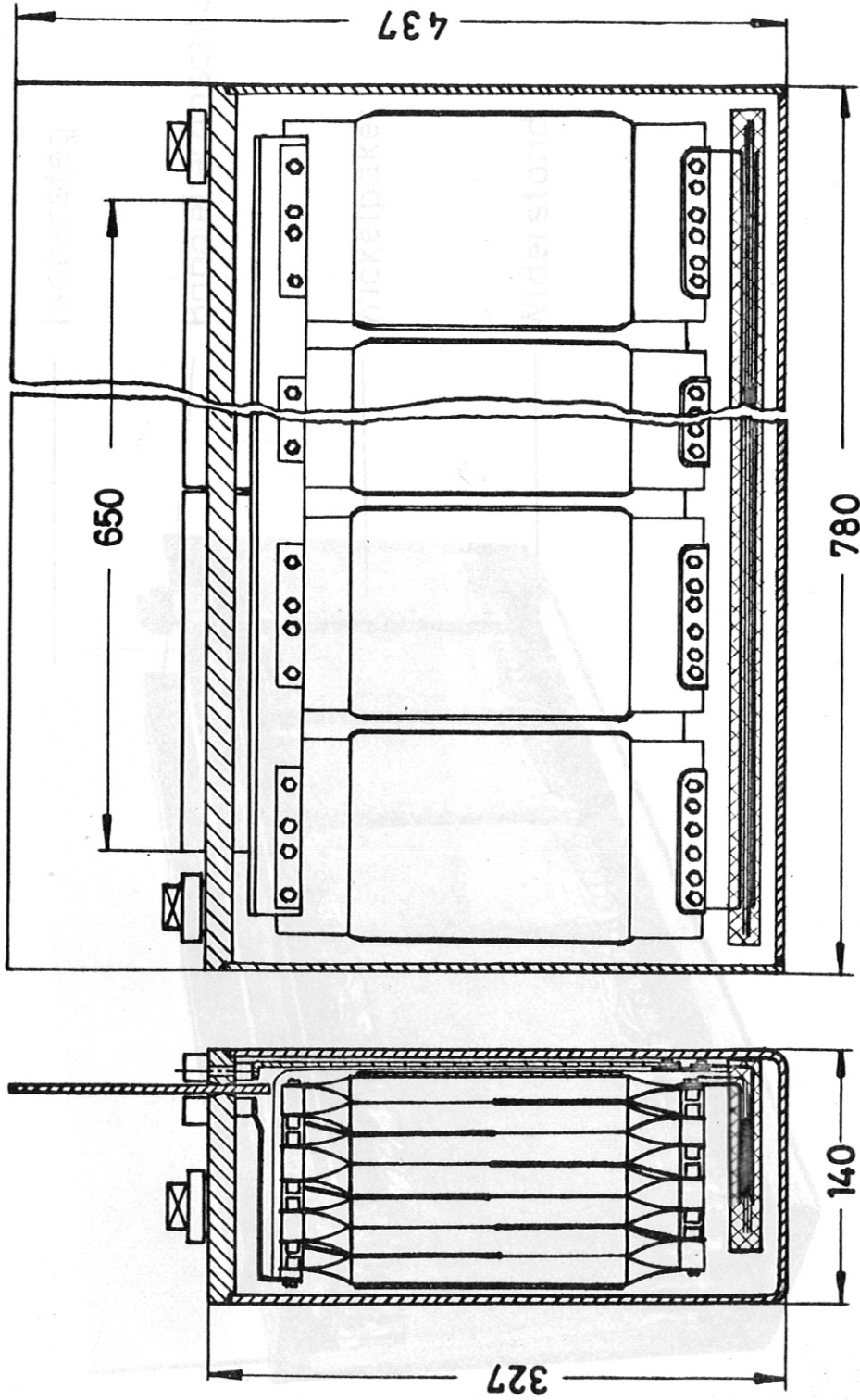


a. ohne Beschaltungseinheiten



b. mit Beschaltungseinheiten

Schalter
 Schalter in Reihe, 6 V-Pole parallel
 Stoßspannung $U = 50 \text{ kV}$
 Kapazität $= 0,133 \mu\text{F}$
 Reihenwiderstand $= 1,05 \Omega$
 140
 327
 687
 70
 Stoßspannung $U = 80 \text{ kV}$
 Induktivität $< 8 \text{ nH}$



Schaltung: 7 Wickel in Reihe, 6 W-Pakete parallel

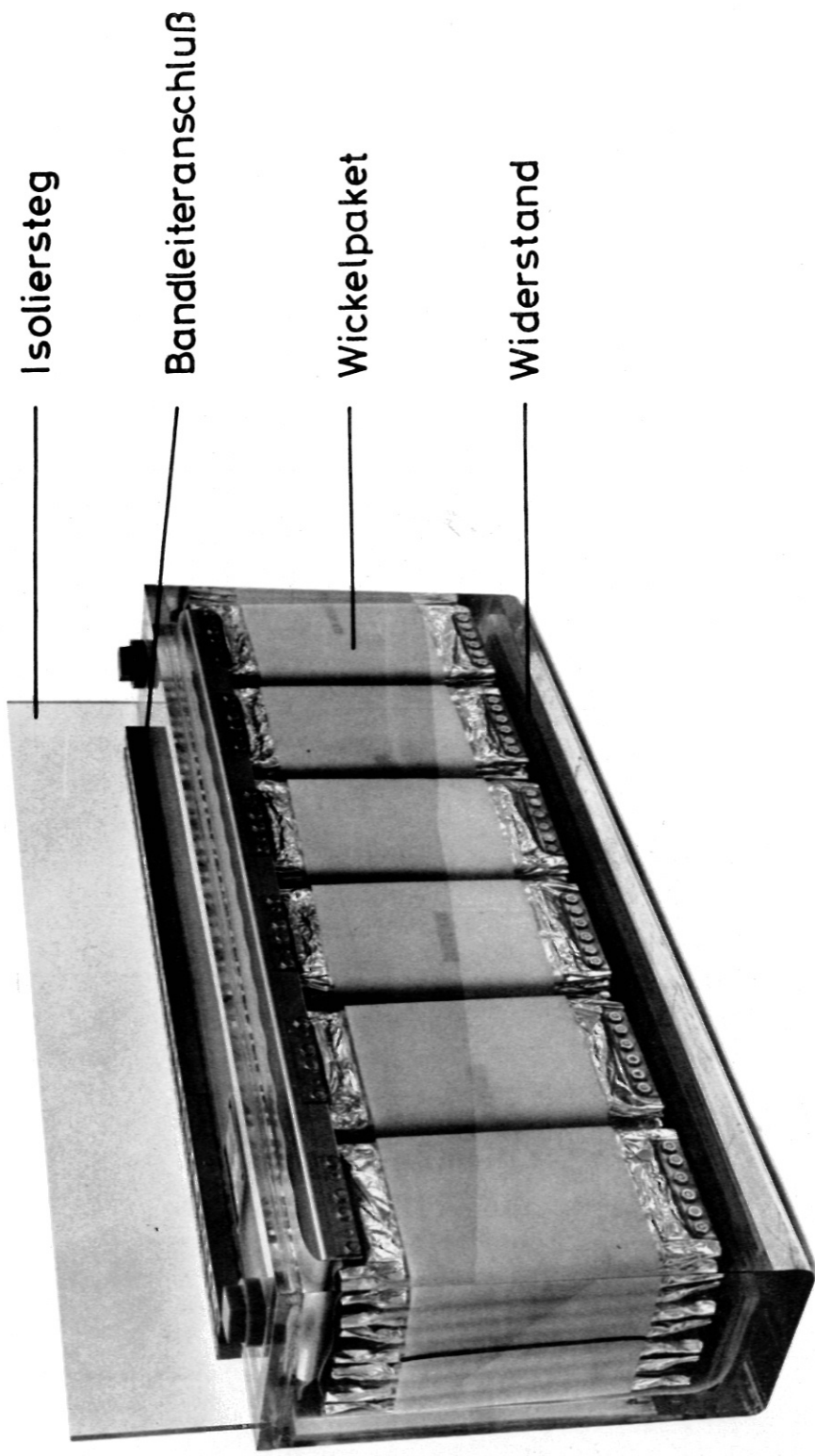
Stoßspannung $U = 50 \text{ kV}$

Kapazität = $0,133 \mu\text{F}$

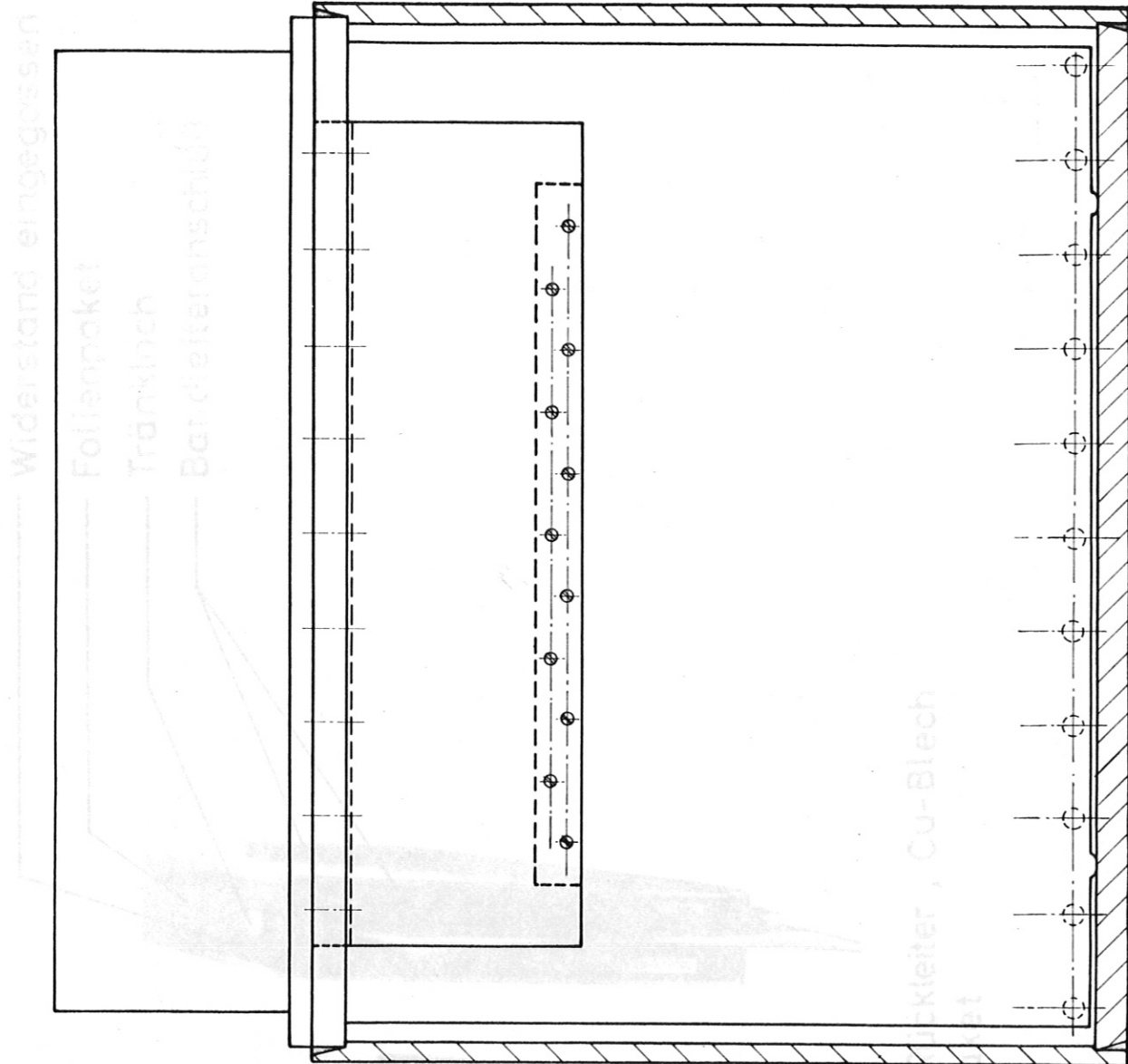
Reihenwiderstand = $1,05 \Omega$

Stoßprüfspannung $U_p = 60 \text{ kV}$

Induktivität $< 8 \text{ mH}$



Beschaltungseinheit Isar I



Widerstand eingegossen

Folienpaket

Tränkhoch

Barleiteranschluß

Bandleiter-Anschluß

Dämpfungs-
Widerstand

Kapazität

Beschaltungseinheit Isar II

Beschaltungskondensator für 500 kJ Batterie

Abb. 4

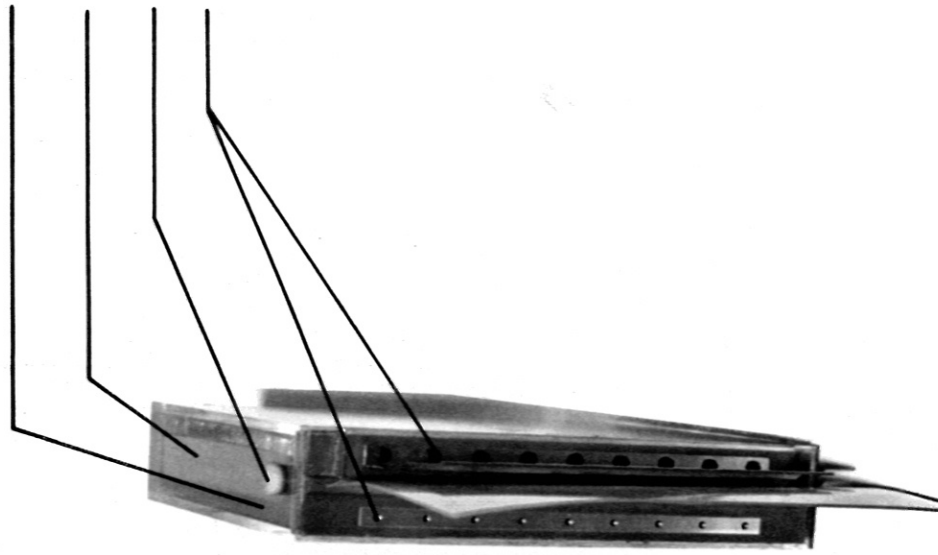
Bild 5

Widerstand eingegossen

Folienpaket

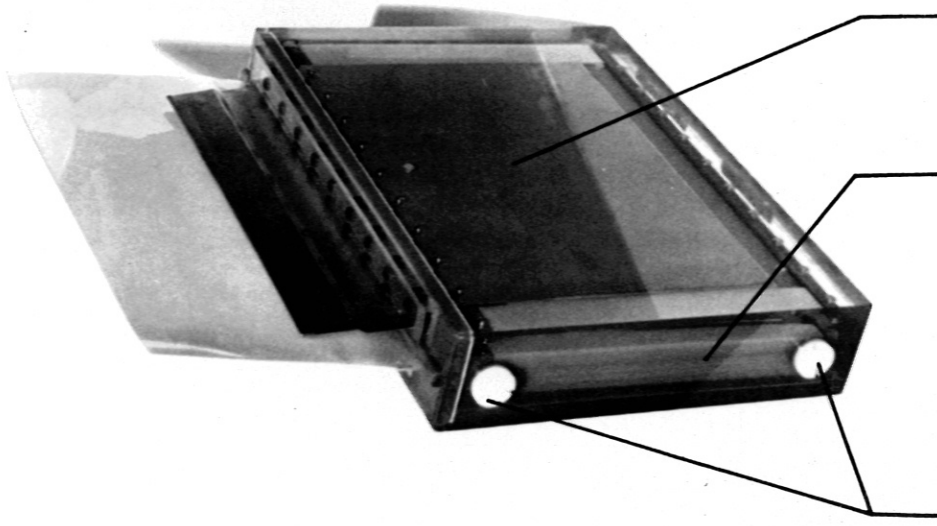
Tränkloch

Bandleiteranschluß



Rückleiter , Cu-Blech

Folienpaket

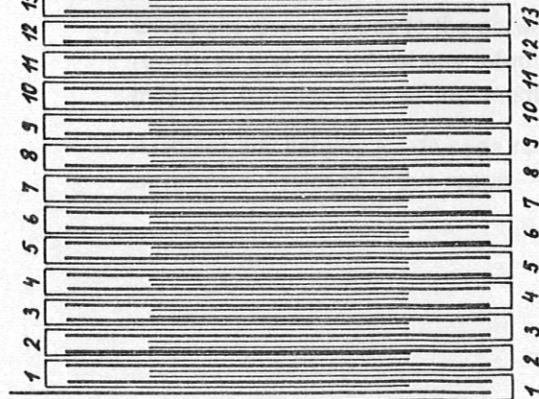
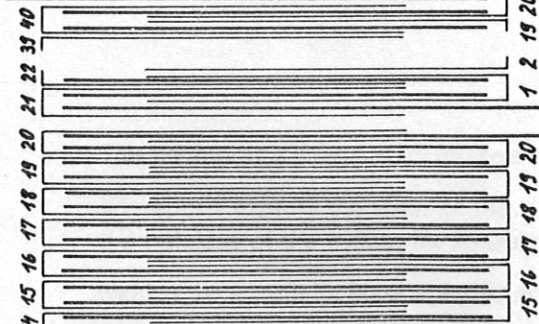
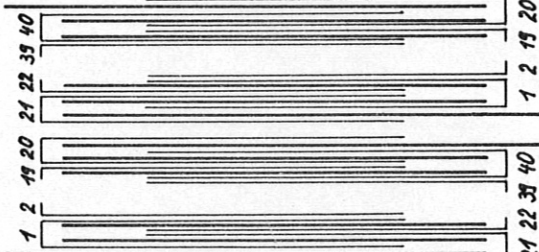
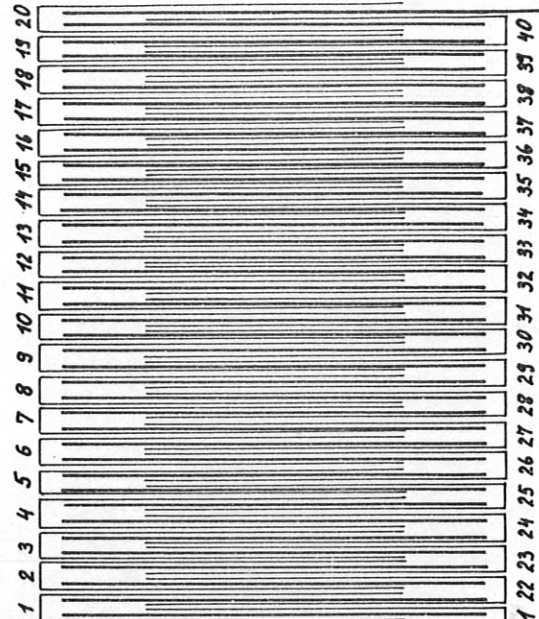


Evakuierlöcher

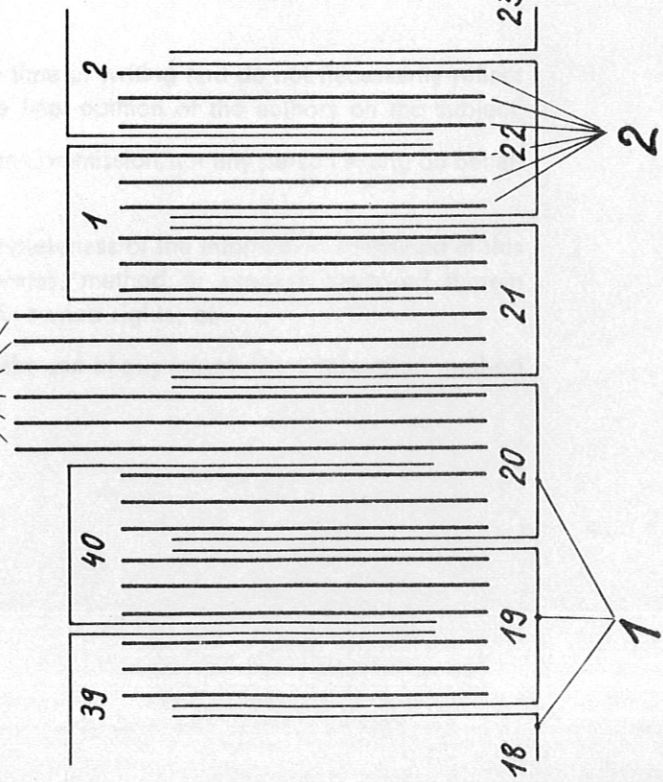
Beschaltungseinheit Isar II

1 Strich \approx 3 Folien

Bandleiter 3D146-6
(bereits in 18146-1 aufgeführt)



Bandleiter 3D146-5
(in 18146-1 aufgeführt)



Aktive Fläche: 647 cm²
Kapazität einer Folie: 35 nF
Schaltung: 15--41 II
R: 888 m Ω
C_g: 96 nF
Dicke des Folienpaketes: 35 mm

Abb.6

30	Isolierfolie	2D146-12					
585	Isolierfolie	2D146-11		2			
200	Leitbelag	Al-Folie WETEK	1	350 x 420, dick 8-10 μ			Einzel gemitt.
Stück.	Benennung	Zeichnung Nr.	U _L -Nr.	Werkstoff	Halbzeug Abmessungen		
<i>Andere...</i>							

Passung	Abmaß	6,7	Tag	Norm			
	Gez.	23,4	Gr.				
	Norm.						
	Maßstab						

Institut für Plasmaphysik G. m. b. H.		0701
Gerätebau bei München		

Verarbeitung dieser Unterlagen ohne
Vermerkung der Mitteilung ihres Inhaltes
ist unzulässig. Soweit nicht ausdrücklich
sonstiges angegeben, sind sämtliche
Angaben in Schrägschrift (LITHO
UNG BGR).
Alle Rechte sind dem Institut für Plasmaphysik
G. m. b. H., München, vorbehalten.
Institut für Plasmaphysik G. m. b. H.
Gerätebau bei München

Beschaltungskondensator 3C 146-14

Schalt-schema

Stückl. best. aus Blatt

Ersetzt durch