

Impulskondensatoren

Energy Storage Capacitors

R.-C. Kunze

IPP 4/35

April 1967

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

IPP 4/35 GARCHING BEI MÜNCHEN

April, 1967 (in German)

Abstract

Impulskondensatoren

Energy Storage Capacitors

In fast current devices (e.g. tokamaks) the capacitive energy storage system is essential. Different test conditions according to the current program.

R.-C. Kunze

This report IPP 4/35 was written for April 1967--capacitors and investigates the possibilities to increase the capacitor-life.

In addition a survey of properties of impulse capacitors recently used in the IPP is given.

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.

April, 1967 (in German)

Abstract

In fast current devices (e.g. Thetapinch) the capacitive energy storage system is subjected different load conditions according to the current program.

This report deals with causes for faults in impuls-capacitors and investigates the possibilities to increase the capacitor-life.

In addition a survey of properties of impuls capacitors recently used in the IPP, is given.

Zusammenfassung

In schnellen Stoßstromanlagen (z.B. Thetapinch) wird der kapazitive Energiespeicher je nach dem Stromprogramm unterschiedlich belastet. Der vorliegende Bericht soll Hinweise auf die Defektursachen in Impulskondensatoren geben und die Möglichkeit einer Lebensdauer-Verlängerung der Kondensatoren untersuchen. Außerdem wird ein Überblick über die Eigenschaften der in der letzten Zeit im IPP verwendeten Impulskondensatoren gegeben.

1. Veranlassung

In der Hochleistungs-Impulstechnik sind Kondensatoren zur Zeit noch immer die am meisten verwendeten Energiespeicher. Sie werden dabei in vielfach-parallelen Zweigen, hochohmig oder induktiv entkoppelt, über relativ lange Zeiten (im Sekunden- bis Minutenbereich) aufgeladen und durch schnelle Schalter auf einen meist vorwiegend induktiven Verbraucher geschaltet.

Abhängig von den Kreisdaten ergeben sich damit für die Kondensatoren schwingende gedämpfte Entladungen hoher Scheitelströme, deren Frequenz bei den meisten Anwendungsfällen zwischen 10 und 500 kHz liegt. Der Dämpfungswiderstand beträgt normalerweise je Kondensator einige $m\Omega$, so daß Durchschwingungen in Strom- und Spannungsamplituden von 80...90 % erreicht werden können.

Durch die Entwicklung geeigneter Schaltelemente wird in letzter Zeit immer mehr eine sogenannte "Crowbar-Schaltung" eingesetzt, bei der im Bereich des Strommaximums die dann vorwiegend induktiv gespeicherte Energie über Funkenstrecken oder Ignitrons parallel zum Kondensator entladen wird. Neben dem Vorteil des exponentiellen Abfalles des Magnetfeldes im Verbraucher wird bei dieser Schaltung auch die Belastung der Kondensatoren kleiner und damit deren Lebensdauer größer. Die Spannung liegt praktisch nur für die erste Viertelwelle am Dielektrikum, im weiteren Verlauf der Entladung schwingt der Kondensator mit der im Moment

des Schließens des Crowbarschalters anliegenden Spannung entsprechend den Kreisdaten aus Kondensator und Crowbarkreis aus. Diese Spannung aber richtet sich nach der Induktivitätsverteilung des Entladekreises und dürfte 20 % der Ladespannung kaum überschreiten. Entsprechend verhält sich der Strom durch den Kondensator, so daß die Kondensatorbelastung weitgehend durch die erste Viertelwelle bestimmt wird.

Die Entladefolge ist bei beiden Schaltungsarten selten größer als 0,5/Min, so daß die Aufheizung der Kondensatoren durch Verlustleistung (dielektrische Verluste + Strom-Wärme-Verluste) vernachlässigt werden kann. (In einzelnen Fällen hoher Folgefrequenz muß dies jedoch berücksichtigt werden)

Im vorliegenden Bericht soll gezeigt werden, von welchen Faktoren die Lebensdauer von Impulskondensatoren bei den verschiedenen Belastungen abhängig ist. Außerdem werden die Kenndaten der im IPP eingesetzten Kondensatoren verschiedener Hersteller angegeben.

2. Beanspruchung des Kondensators

Die Lebensdauer eines Impulskondensators hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab:

Vom Strom und von der Spannung. Beide Parameter haben einen fast unabhängigen Einfluß auf die Lebensdauer des Kondensators und können in ihrer Wirkung daher auch unabhängig betrachtet werden.

a) Spannungsbelastung

Die am Kondensator anliegende Spannung verteilt sich in der langsamen Phase der Aufladung entsprechend der Isolationswiderstände auf die einzelnen in Serie liegenden Teilelemente. Die Beanspruchung des Dielektrikums ist nahezu eine Gleichspannungsbelastung. Glimmentladungen treten nur in sehr begrenztem Maße auf. Lediglich lange Zeiten unter Gleichspannung, d.h. bei langer Zeit zwischen der erreichten Ladespannung und

der Entladung, können zu elektrolytischen Zersetzungen des Tränkmittels führen, wie es von Gleichspannungskondensatoren her bekannt ist. Bei Gleichspannungskondensatoren setzt man dem Tränkmittel Ionenabsorber bei (Stabilisatoren), jedoch ist dies bei Impulskondensatoren nicht ausreichend, da bei jeder Entladung durch Glimmen entstandene Zerfallsprodukte des Dielektrikums neue Ionen bilden.

Bei der Entladung dagegen ist neben der reinen elektrischen Belastung des Isolationsmaterials mit stärkeren Glimmentladungen zu rechnen. Glimmentladungen sind selbständige Entladungen, die vornehmlich am Rande der Belegung in feinen Gaseinschlüssen auftreten. Sie setzen dann ein, wenn die Feldstärke in Gasbläschen ausreicht, um freie Elektronen soweit zu beschleunigen, daß sie genügend Energie zum Ionisieren aufnehmen und beim Zusammenstoß mit neutralen Molekülen nicht nur elastisch stoßen. Die Feldstärke im Gaseinschluß hängt ab von der am Kondensator anliegenden Spannung, dem Verhältnis von Gasschichtdicke zu Restschichtdicke (in Richtung des Feldes) und der Dielektrizitätskonstanten des Gases in Relation zu derjenigen des übrigen Dielektrikums. Die Ionisationseinsatzfeldstärke im Gaseinschluß ihrerseits ist eine Funktion des Gasdruckes, also der mittleren freien Weglänge und der spezifischen Ionisationsspannung des Gases. Wird die zur Ionisierung notwendige Feldstärke erreicht, so bildet sich eine Stoßlawine aus, die bis zum begrenzenden festen oder flüssigen Isolierstoff läuft und auf deren Oberfläche eine Ladung ausbildet, die dem außen am Dielektrikum anliegenden Feld entgegengerichtet ist und den Gaseinschluß feldfrei macht. Erst beim erneuten Erreichen der Ionisationsspannung würden dann weitere Entladungen möglich sein. Dies setzt voraus, daß der das Gasbläschen umschließende Isolierstoff einen unendlich großen Isolationswiderstand hat. Tatsächlich aber ist dies nicht der Fall und die Ladungen am Gaseinschluß gleichen sich langsam wieder aus. Bei einer Änderung des äußeren Feldes ist dieser Ausgleich je nach Änderungsgeschwindigkeit fortgeschritten und die Zahl der Ent-

ladungslawinen wird dadurch abhängig von dieser Feldänderungsgeschwindigkeit und damit von der Frequenz der Kondensatorentladung.

Bei allen Glimmentladungen in Gaseinschlüssen wird auch der angrenzende Isolierstoff durch auftreffende schnelle Elektronen abgebaut, da die Bindungsenergie C - H bei 3...5 eV, die Ionisierungsenergien von N_2 , H_2 und O_2 bei 12,5...15,5 eV liegen.

Kann man Glimmen in Dielektrikum nicht vermeiden, und dies ist bei hoher Energiedichte, die Feldstärken von mehr als 50 kV/mm voraussetzt nicht der Fall, so muß jedoch dafür Sorge getragen werden, daß die Zerfallsprodukte der festen und flüssigen Isolierstoffe möglichst wieder Isolierstoffe, auf keinen Fall jedoch Leiter bilden. So kann z.B. gezeigt werden, daß bei einem Papier-Folien-Kondensator, der mit chloriertem Diphenylen (Clophen, Aerochlor, usw.) getränkt ist, Glimmentladungen das Tränkmittel in HCl-Gas und Kohlenstoff zersetzen. Letzterer bildet dann leitende Brücken, die zu Überschlägen führen können. Aber auch das Papier wird durch die direkte Einwirkung schneller Elektronen oder durch Kondensationsreaktionen der Chlorwasserstoffmoleküle mit der Zellulose zu Kohlenstoff und Wasser abgebaut, wobei Durchschläge und Überschläge eingeleitet werden können. Neben den als Folge der Glimmentladungen vorwiegend am Folienrand möglichen Durchschlägen sind rein elektrische Durchschläge über die ganze Fläche des Isolierstoffes verteilt und nur wegen erhöhter Feldstärke mehr zum Belegungsrand tendierend. Die Ursache solcher Durchschläge ist nicht eindeutig feststellbar, jedoch wird angenommen, daß leitende oder halbleitende Einschlüsse in einzelnen Lagen des festen Isolierstoffes der Ausgangspunkt sind. Diese führen zu starken Feldverzerrungen, besonders da sie meist feine Spitzen haben, an denen die Feldstärke sehr hoch wird und haben Erosionserscheinungen zur Folge. Dabei haben natürlich sauber verarbeitete Kunststofffolien gegenüber Papier den Vorteil, daß

zwar dünnere Stellen oder sogar Löcher vorhanden sein können, kaum jedoch leitende Teilchen wie im inhomogenen Gefüge des Papiers.

Glimmeinsatzfeldstärke und Glimmintensität einerseits, die Sicherheit gegen rein elektrische Durchschläge in einem Dielektrikum andererseits, sind stark von der absoluten Dielektrikumsdicke abhängig, jedoch im gegenläufigen Sinne, wenn man das Gebiet diskutabler Dicke (60 ... 200 μ) betrachtet. So müßte ein Kondensatordielektrikum möglichst dünn sein, um geringe Glimmintensität zu gewährleisten, dagegen sollte es möglichst dick sein, um eine hohe Sicherheit gegen elektrische Durchschläge zu bieten. Siw Auslegung erfolgt daher meist aus Erfahrungswerten der einzelnen Hersteller und richtet sich auch stark nach dem Aufbau des Kondensators.

b) Strombelastung

Neben der Durchführung durch das Gehäuse, die in jedem Fall sicher genug gestaltet werden kann, sind die inneren Verbindungen der einzelnen Kondensatorelemente untereinander und mit der Durchführung bei Impulskondensatoren strommäßig hoch belastet. Ein Aufbau aus dicken Kupferschienen verbietet sich schon wegen der aus Induktivitätsgründen engen Bauweise, bringt aber auch wegen der begrenzten Eindringtiefe nur frequenzabhängige Vorteile. Da die spezifische Stromdichte mit der Frequenz ansteigt - der absolute Strom wird mit der Frequenz höher und die Eindringtiefe kleiner - müssen diese Verbindungen in ihrer Ausdehnung quer zur Stromrichtung möglichst breit sein, wobei gleichzeitig auch minimale Induktivitäten der inneren Verbindungen erreicht werden können. In jedem Falle ist die Anordnung solcher Bandleiter zueinander und zum übrigen Wickelpaket von ausschlaggebender Bedeutung. Dabei muß schon von der Geometrie her darauf geachtet werden, daß keine Konzentrationen der Strombahnen durch Magnetfelder erfolgen können und daß bei der Verarbeitung geringste Kerben am Rande der Bänder verhindert werden. Wird dies nicht beachtet, kann der sogenannte "Sägeeffekt" auftreten, bei dem durch Einschnürungen sehr hohe Stromdichten entstehen, die zum Schmelzen und Verdampfen des Leitermaterials führen können.

Der Übergang von den Verbindungselementen zur eigentlichen Belegung des Kondensators wird bei den einzelnen Herstellungssystemen verschieden gelöst. Zwar sind die Stromdichten hier nicht mehr so groß und können durch das Einlegen vieler paralleler und genügend breiter Ableitungen oder durch eine genügend große Anschlußlinie bei stirnseitiger Kontaktierung ausreichend klein gehalten werden, jedoch liegt hier die Problemstellung in der Vermeidung undefinierter Kontakte. An diesen kommt es zu Schmorstellen, die ein Abtrennen einzelner Ableitungen oder der gesamten Kontaktierung auslösen können.

3. Prinzipielle Bauweisen, die zur Zeit geläufig sind

Man unterscheidet dem Aufbau nach 4 verschiedene Kondensatorarten.

a) Papier-Folien-Kondensatoren mit Rizinus-Öl-Tränkung

Die Kondensatoren sind aus mehreren Wickeln in flacher oder runder Form zusammengesetzt. Jeder einzelne Wickel besteht aus mehreren Lagen Papier und 2 Bahnen meist Alu-Folie (es werden vereinzelt auch Folien aus anderen Metallen eingesetzt), die die Belegungen darstellen. An den Rändern werden je nach Wickelspannung Papierüberstände von 10...20 mm gelassen. Auf der 6...20 μ starken Aluminiumfolie sind Streifen verzinnten Kupfers (50...100 μ stark, 20...80 mm breit) eingelegt und stirnseitig herausgeführt. Diese sogenannten Ableitungen sind meist mit einem weiteren Folienstück abgedeckt, um eine größere Fläche für den Stromübergang zu erhalten. Wesentlich ist hierbei, daß ein genügend großer Kontaktdruck zwischen Folie und Ableitung vorhanden ist, was gleichbedeutend mit einem hohen Preßdruck der Wickel ist. Im anderen Fall gibt es punktförmige Überschläge, die zu Löchern in der Folie und später zu Beschädigung des Dielektrikums und zum Durchschlag führen.

Die Wickel untereinander werden durch Verlöten der Ableitungen verbunden. Dabei werden besondere Maßnahmen getroffen, um Einschnürungen der Strombahnen zu vermeiden und unkontrollierte Stromübergänge an nicht gelöteten Stellen zu verhindern.

Das ganze Wickelpaket ist in einem Gehäuse eingebaut und wird unter Vakuum bei erhöhter Temperatur zunächst getrocknet und dann mit Rizinusöl imprägniert.

b) Papier-Folien-Kondensator mit Clophen-Tränkung

Der Aufbau dieses Kondensatortyps ist wie bei oben genannter Sorte, jedoch erfolgt die Tränkung mit chloriertem Diphenyl. Die Nachteile der Clophen-Tränkung bestehen nach Versuchen verschiedener Hersteller darin, daß beim Glimmen Kohlenstoff und Chlorwasserstoffgas entstehen. Außerdem hat Rizinusöl eine bessere Fähigkeit zur Gasabsorption, wodurch bei der Entladung durch Glimmen entstandene Wasserstoffbläschen bei ausreichend kleiner Entladefolge (ca. 4 je Minute) zum großen Teil wieder durch molekulare Anlagerung verschwinden. Die Homogenität des Schichtdielektrikums scheint bei beiden Tränkmitteln ähnlich zu sein, die Dielektrikumskonstanten zumindest sind in etwa gleich. Dabei ist allerdings bei Rizinusöl eine sehr saubere Verarbeitung vorausgesetzt.

c) Metall-Papier-Kondensatoren mit Vaseline-Tränkung

Dieser Kondensatortyp besteht in seinen Grundelementen aus runden Wickeln. Dabei werden keine Metallfolien als Belegung verwendet, sondern dünne Metallschichten, die auf das Papier aufgedampft sind. Die Schichten sind wechselweise bis an den Papierrand geführt und ermöglichen so eine stirnseitige Kontaktierung. Diese erfolgt durch Druck oder durch Aufbringen einer metallischen Spritzverbindung (Schopen), die dann gelötet werden kann. Die Tränkung der Kondensatoren erfolgt nach Trocknung mit Vaseline.

MP-Kondensatoren haben an sich den Vorteil, daß bei Durchschlägen im aktiven Dielektrikum der sogenannte "Selbsteffekt" auftritt. Dabei wird vom Durchschlag her um das Durchbruchgebiet herum eine genügend weite Zone der Metallschicht verdampft und somit wieder eine Isolationsstrecke geschaffen, die

die volle Spannung hält. Nachteilig wirkt sich jedoch die kleine Dielektrizitätskonstante des Tränkmittels aus, die einmal sehr hohe Feldstärken voraussetzt, um gleiche Energiedichten wie bei Folienkondensatoren zu erhalten, zum anderen ein inhomogenes Dielektrikum schafft. Außerdem muß die aufgedampfte Schicht sehr dünn sein (ca. $0,25 \mu$), um die bei einem Durchschlag mit Selbstheileffekt zur Verdampfung der Leitschicht notwendige Energie ausreichend klein zu halten. Damit aber wird der Dämpfungswiderstand in der Belegung relativ groß, denn die Eindringtiefe bleibt im gesamten angewendeten Frequenzbereich größer als die Dicke der Leitschicht. Ferner macht das Aufbringen einer stirnseitigen Kontaktierung wegen der geringen Angriffsfläche erhebliche Schwierigkeiten. Die meisten Hersteller umgehen letzteres zum Teil, indem sie die Schicht zum Rande verstärkt aufbringen. Trotzdem hat sich gezeigt, daß bei höheren Entladeströmen mit erheblichen Ausfällen gerechnet werden muß, bei denen ganze Wickel durch Abdampfen der Schicht ausfallen. Hierbei entsteht durch Inhomogenitäten in der aufgedampften Metallschicht, die an sich schon ein lockeres Gefüge einzelner Körnchen bildet, zunächst ein Abtrennen einzelner Zonen durch zu hohe Stromdichten, bis nur noch einzelne Gebiete mit der Kontaktfläche in Verbindung stehen. Die Kapazität des Wickels ist dann stark abgesunken, wodurch bei Reihenschaltungen, die im üblichen Spannungsbereich über 5 kV immer notwendig sind, die Serienwickel spannungsmäßig stark überlastet werden und durchschlagen.

d) Kunststoff-Folien-Kondensatoren mit Ölimprägnierung

Hierbei handelt es sich um Kondensatoren in Wickelbauweise oder um solche aus geschichteten Kunststofffolien mit Öl-Tränkung. Der Aufbau ist ähnlich den unter 1) und 2) genannten, jedoch wird die Kontaktierung nicht über Ableitungen vorgenommen, sondern die Belegfolien werden nach jeweils einer Stirnseite herausgeführt. Dadurch ergibt sich eine große "Anschlußlinie", Induktivität und Widerstand des Wickels werden klein, der Stromübergang mit kleinerer spez. Stromdichte günstiger. Die Kurve

Bei diesen Kondensatoren wird bei Verwendung von Rizinusöl erreicht, daß die DK des festen Isolierstoffes (2,4) kleiner wird als die des Tränkmittels. Dadurch liegt dann auch eine geringere Spannung am Tränkmittel, was besonders am Folienrand wegen der erhöhten Feldstärke von Bedeutung ist. Die Energiedichte solcher Kondensatoren ist zwar bei gleicher Feldstärke kleiner als bei Papierkondensatoren, doch können bei Kunststoffolien erheblich höhere mittlere Feldstärken angewendet werden. Bei dem augenblicklichen Stand der Technik lassen Kunststoffolien in der Kondensatorentwicklung erwarten, daß Energiedichten vom vielfachen der bisherigen Werte erreicht werden können.

4. Lebensdauer

Wie aus dem bisherigen hervorgeht, ist die Lebensdauer eines Kondensators von der mittleren Ladefeldstärke und der Dämpfung einerseits, sowie vom Scheitelstrom und dem f idt abhängig.

Stromschäden sind keine stetige Funktion der max. Stromstärke oder Stromdichte, sie treten vielmehr meist erst ab Scheitelströmen von 50 kA auf, nämlich dann, wenn an einzelnen Punkten die Stromdichte zur Materialverdampfung ausreicht. Dann allerdings genügen wenige Entladungen (z.B. etwa 100) zum Trennen innerer Verbindungen, da die Stromüberhöhung mit jeder Entladung durch weiteres Abbrennen schnell ansteigt. Es ist jedoch möglich, Scheitelströme bis 200 kA einwandfrei zu beherrschen, wie die bisherigen Erfahrungen mit Kondensatoren einiger Hersteller eindeutig gezeigt haben.

Bei der Auslegung des Dielektrikums bezüglich der Spannungsfestigkeit sind die Verarbeitungsmethoden und die Materialien aller Hersteller unterschiedlich. Es kann hier jedoch ein Richtwert aus der anliegenden Darstellung entnommen werden, der angibt, wie sich die Lebensdauer eines Kondensators in Abhängigkeit von der Ladespannung und der Dämpfung ändert. Der Wert 100 % wird durch die Nennladespannung bei einer Durchschwingung von 85 % gegeben. Die Kurve gibt dann jeweils die Lebensdauer in % der Nennlebensdauer an, die

sich aus der Ladespannung plus dem prozentualen Durchschwingen in der zeitigen Spannungshalbwelle ergibt.

So kann z.B. die Lebensdauer eines Kondensators durch Absenken der Ladespannung um 25 % bei gleicher Dämpfung um den Faktor 5 verlängert werden. Noch viel mehr geht eine Crowbarschaltung im Strommaximum in die Lebensdauer ein, die bei gleicher Ladespannung eine Verlängerung der Lebensdauer bis zum ca. 18-fachen Wert erwarten läßt, wenn der kondensatorseitige induktive Anteil am Gesamtkreis Null wäre. Aber auch bei normaler Induktivitätsverteilung ist durch Einsatz von Crowbarschaltern im Strommaximum mit einer Lebensdauererweiterung vom 8...12 fachen zu rechnen.

5. Im IPP untersuchte Kondensatoren

Im IPP wurden in den vergangenen Jahren für Impulsanlagen Kondensatoren verschiedener Hersteller eingesetzt. In der nachfolgenden Zusammenstellung sind alle an diesen Kondensatoren durchgeführten Messungen erfaßt. Gleichzeitig wird die Bauart, die Schaltung und die Anschlußausführung genannt:

a) Kondensatoren der BICC

Alle Kondensatoren mit Papier-Folien Rizinusöl

α) Type: 1,33 μ F/40 kV (2,6 MJ-Batterie)

Kapazität C = 1,33 μ F \pm 10 %

Ladespannung U_L = 40 kV

Eigenfrequenz f_E = 320 kHz

Eigeninduktivität L_E = 180 nH

Innenwiderstand R_i = 99 m Ω

zulässige Entladefrequenz = 25 kHz

Lebensdauer = 10^5 Entladungen bei 30 kV + $5 \cdot 10^3$ Ent-
garantiert ladungen bei 40 kV

Lebensdauer

ermittelt an 60 Typenprüflingen = 50 % Ausfall bei 40 kV
Ladespannung und $75 \cdot 10^3$
Entladungen

Klemmen: 2 Porzellanisolatoren, Gehäuse auf Mittelpotential

Energiedichte = $0,079 \text{ J/cm}^3$

β) Type 1,33 $\mu\text{F}/40 \text{ kV}$ (Batterie Dr. Herold)

Für diese Kondensatoren gelten die gleichen Werte wie un-
ter α), jedoch ist die zulässige Entladefrequenz 200 kHz

γ) Type 50 $\mu\text{F}/10 \text{ kV}$ (mehrere Magnetfeldbatterien)

Kapazität = $50 \mu\text{F} \pm 10 \%$

Ladespannung U_L = 10 kV

Eigenfrequenz f_E = 115 kHz

Eigeninduktivität L_E = 39 nH

Innenwiderstand R_i = $8 \text{ m}\Omega$

zulässige Entladefrequenz =

Lebensdauer
garantiert = 10^5 Entladungen

Energiedichte = $0,074 \text{ J/cm}^3$

Klemmen: 1 koaxiale Klemme, Gehäuse auf Erdpotential

Innenwiderstand $R_i = 8 \text{ m}\Omega$ Innenwiderstand = $8 \text{ m}\Omega$

1 Klemme 2 Klemmen parallel

zulässige Entladefrequenz = 115 kHz

c) Type 7,7 μ F/18 kV (100 kJ/100 kHz-Batterie Abtl. 4)

Kapazität C = 7,7 μ F \pm 10 %

Ladespannung U_L = 18 kV

Eigenfrequenz f_{E1} = 280 kHz Eigenfrequenz f_{E2} = 360 kHz
1 Klemme 2 Klemmen

Eigeninduktivität L_{E1} = 43 nH Eigeninduktivität L_{E2} = 25 nH
1 Klemme 2 Klemmen

Innenwiderstand R_i = 12 m Ω

zulässige Entladefrequenz = 150 kHz

Lebensdauer
garantiert = 10^5 Entladungen

Lebensdauer
ermittelt = Entladungen

Energiedichte = 0,061 J/cm³

Klemmen: 2 koaxiale Klemmen parallel, Gehäuse auf Erde

b) Kondensatoren der SSW

Alle Kondensatoren mit Papier-Folien Rizinusöl

a) Type

Kapazität C = 8,9 μ F \pm 10 %

Ladespannung U_L = 18 kV

Eigenfrequenz = 233 kHz Eigenfrequenz = 267 kHz
1 Klemme 2 Klemmen parallel

Eigeninduktivität = 54 nH Eigeninduktivität = 44 nH
1 Klemme 2 Klemmen parallel

Innenwiderstand R_i = 12 m Ω Innenwiderstand = 8 m Ω
1 Klemme 2 Klemmen parallel

zulässige Entladefrequenz = 175 kHz

Lebensdauer
garantiert 10^5 Entladungen

Lebensdauer

1 Muster: 10^5 Entladungen

1 Muster: $2,2 \cdot 10^5$ Entladungen

Energiedichte = $0,064 \text{ J/cm}^3$

Klemmen: 2 koaxiale Klemmen parallel, Gehäuse auf
Erdpotential

β) Type Cip 75/1,1 - 3 (Marx-Generatoren für Crowbar-Triggerung)

Kapazität C = $1,1 \text{ } \mu\text{F} \pm 10 \%$

Ladespannung U_L = 48 kV

Eigenfrequenz f_E = 680 kHz

Eigeninduktivität L_E = 50 nH

Innenwiderstand R_i = $17 \text{ m}\Omega$

zulässige Entladefrequenz = 365 kHz oder = 100 kA

Lebensdauer
garantiert $25 \cdot 10^3$ Entladungen

Energiedichte = $0,061 \text{ J/cm}^3$

1 koaxiale Klemme, Gehäuse auf Erdpotential

γ) Type Cip 58,5/2,6 - 4 (500 kJ-Batterie)

Kapazität C = $2,6 \text{ } \mu\text{F} \pm 10 \%$

Ladespannung U_L = 40 kV

Eigenfrequenz f_E = 500 kHz

Eigeninduktivität L_E = 40 nH

Innenwiderstand R_i = $17 \text{ m}\Omega$

zulässige Entladefrequenz = 240 kHz

Lebensdauer
garantiert = $25 \cdot 10^3$ Entladungen

Energiedichte = $0,063 \text{ J/cm}^3$

1 koaxiale Klemme, 1 Ladeklemme (nicht geeignet für Entladungen, da nur für kleinen Strom), Gehäuse auf Erdpotential

c) Kondensatoren der Hydra (AEG)

Alle Kondensatoren mit Papier-Folien-Clophen

α) Type 98.010 $0,1 \mu\text{F}$ (Turbulenzbatterie)

Kapazität C = $0,1 \mu\text{F} \pm 10 \%$

Ladespannung = 40 kV

Eigenfrequenz = 1,9 MHz (bei Kurzschluß über den Klemmen)

Eigeninduktivität = 70 nH

Innenwiderstand = $155 \text{ m}\Omega$

zul. Entladefrequenz = 500 kHz

Lebensdauer
garantiert $25 \cdot 10^3$ Entladungen

Energiedichte = $0,013 \text{ J/cm}^3$

Klemmen: 3 parallele Rillenporzelane pro Belag, Gehäuse auf Mittelpotential

d) Kondensatoren der Bosch AG

Alle Kondensatoren mit Metall-Papier-Vaseline

α) Type KO/MPS 1/1250 K 18000/2

Kapazität Geh = $7,7 \mu\text{F} \pm 10 \%$

Ladespannung = 18 kV

Eigenfrequenz 282 kHz	Eigenfrequenz 350 kHz
1 Klemme	2 parallele Klemmen
Eigeninduktivität	Eigeninduktivität 27 nH
1 Klemme	2 parallele Klemmen
Innenwiderstand = 15,4 mΩ	Innenwiderstand = 12,3 mΩ
1 Klemme	2 Klemmen parallel
Lebensdauer gemessen an 10 Prüflinge = 10 ⁴ Entladungen	
Energiedichte = 0,058 J/cm ³	
Klemmen: 2 parallele Koaxialklemmen, Gehäuse auf Erdpotential	

β) Type KO 3 GH 399

Kapazität	= 0,5 μF
Ladespannung	= 25 kV
Eigenfrequenz	= 1330 kHz
Eigeninduktivität	= 28 nH
Innenwiderstand	= 40 mΩ
Lebensdauer = 1...2 · 10 ⁴ Entladungen (abhängig von Scheitelstrom)	
Energiedichte = 0,046 J/cm ³	
Klemmen: 1 koaxiale Klemme, 1 Ladeklemme (nicht für Entladungen geeignet, da nur für kleine Ströme)	

Bei diesem Kondensator ist die Energiedichte nicht vergleichbar, denn er ist zylinderförmig ausgeführt, wodurch beim Zusammenbau der Batterien Leerraum entsteht, der bei rechteckigen Gehäusequerschnitten zumindest teilweise im Kondensator in Kauf genommen werden muß.

Allgemein sind die Angaben über die Energiedichte aus dem Volumen des Gehäuses errechnet. Überstehende Klemmen sowie vorstehende Befestigungswinkel wurden nicht mit einbezogen.

Alle Angaben über Lebensdauerwerte beziehen sich auf schwingende Entladungen mit ca. 85 % wiederkehrender Spannung. Die Entladefrequenzen liegen bei der max. zulässigen Höhe oder geringfügig niedriger, wenn durch den Außenkreis dieser Werte nicht erreicht werden konnte. Die "Lebensdauer garantiert" bedeutet, daß der Hersteller bis zu dieser Entladezahl kostenlos Ersatz liefert, wenn der Kondensator innerhalb 18 Monaten nach Versandbereitschaft unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen defekt wird.

Unter dem Begriff "Lebensdauer" soll eine Entladezahl verstanden werden, bis zu der nicht mehr als 10 % der Kondensatoren ausgefallen sind. Dies wird bei größeren Lieferungen durch Typenprüfungen nachgewiesen, wobei eine bestimmte Zahl von Kondensatoren einer Dauerprüfung unterzogen wird.

Neben den bisher genannten Kondensatoren wurden im IPP eigene Beschaltungseinheiten, bestehend aus einer Reihenschaltung von Kapazität und Widerstand, entwickelt und gebaut. Hier wurden als Dielektrikum Kunststoffolien verwendet mit Ölimprägnierung.

100% Scheitelspannung = 1,85 x Ladespannung
(50% reversal)

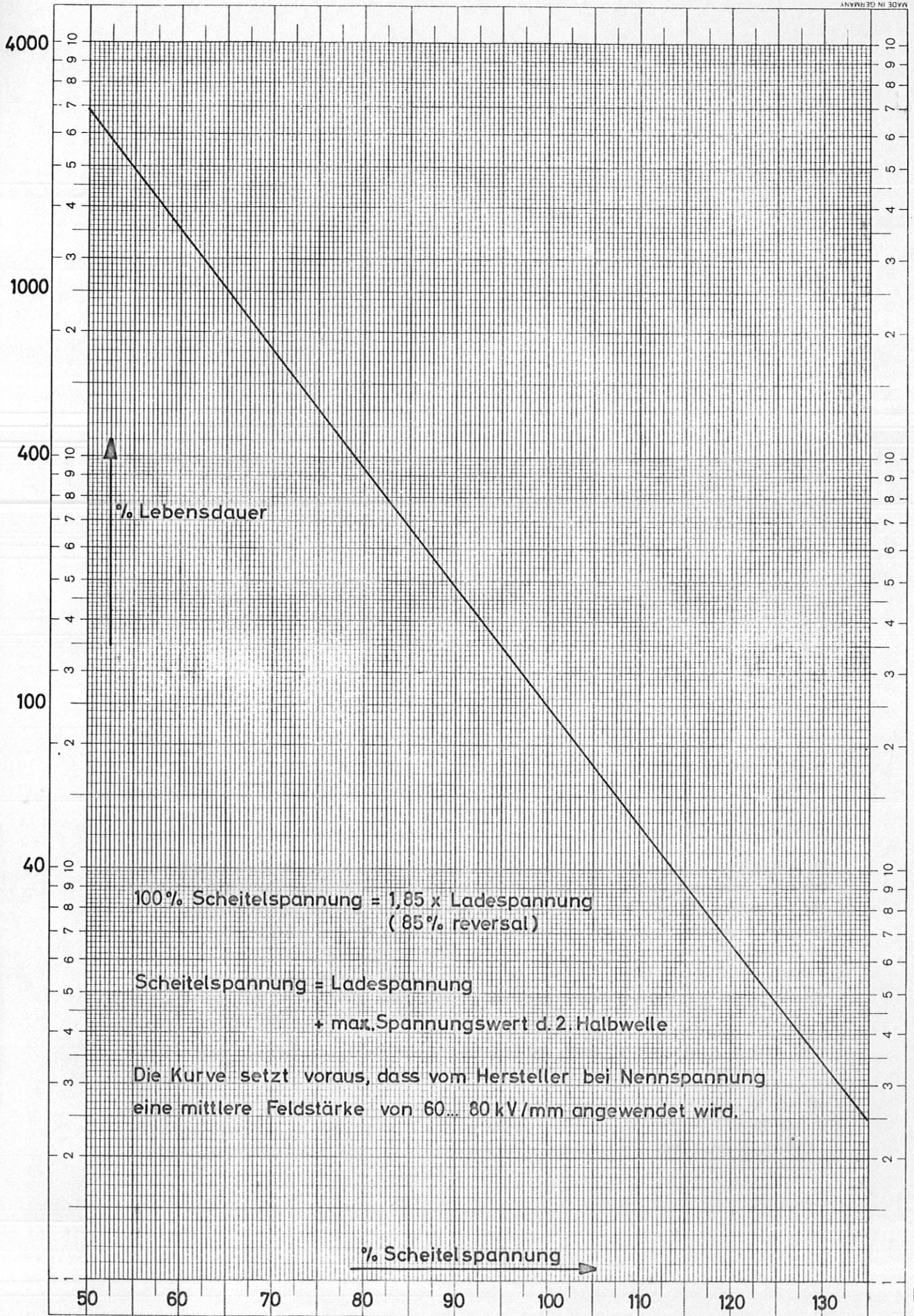
Scheitelspannung = Ladespannung

+ max Spannungswert d. 2. Halbwelle

Die Kurve setzt voraus, dass vom Hersteller bei Nennspannung eine mittlere Feldstärke von 60-80 kV/mm angewendet wird.

% Scheitelspannung

50 60 70 80 90 100 110 120 130



% Lebensdauer

100% Scheitelspannung = 1,85 x Ladespannung
(85% reversal)

Scheitelspannung = Ladespannung
+ max. Spannungswert d. 2. Halbwelle

Die Kurve setzt voraus, dass vom Hersteller bei Nennspannung
eine mittlere Feldstärke von 60... 80 kV/mm angewendet wird.

% Scheitelspannung