

**Demontierbare, gasdurchlässige Hochspannungsisolation für die
W7-X - Supraleiterverbindungen**

F. Schauer

IPP 2/ 332

März 1996



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

85748 GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

**Demontierbare, gasdurchlässige Hochspannungsisolation für die
W7-X - Supraleiterverbindungen**

F. Schauer

IPP 2/ 332

März 1996

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über
die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt*

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Zusammenfassung..... | 3 |
| 2 Abstract..... | 4 |
| 3 Einleitung..... | 5 |
| 4 Hochspannungsversuche..... | 8 |
| 4.1 Versuchsanordnung..... | 8 |
| 4.1.1 Rezipient für Versuche bei Raumtemperatur..... | 8 |
| 4.1.2 Versuchseinrichtung für LN ₂ -Temperatur..... | 9 |
| 4.1.3 Prüfling..... | 10 |
| 4.1.3.1 Dichtung..... | 11 |
| 4.1.3.2 Filterkombination..... | 11 |
| 4.1.4 Elektrische Schaltung..... | 12 |
| 4.2 Versuchsdurchführung..... | 15 |
| 4.2.1 Versuche bei Raumtemperatur..... | 15 |
| 4.2.1.1 Filtertest..... | 15 |
| 4.2.1.2 Test des Filters und der Dichtung..... | 18 |
| 4.2.2 Versuche bei LN ₂ -Temperatur..... | 19 |
| 4.3 Diskussion..... | 20 |
| 5 Vakuumtechnische Untersuchungen..... | 21 |
| 5.1 He-Haltevermögen der Filteranordnung..... | 21 |
| 5.2 He-Strömung durch die Filterkombination..... | 22 |
| 5.2.1 Simulation einer Lecksuche unter Zwischenschaltung der Filterkombination..... | 23 |
| 5.2.2 Druckausgleich über den Filter..... | 24 |
| 6 Danksagung..... | 26 |
| 7 Anhang..... | 27 |

1 Zusammenfassung

Es wurde eine zerstörungsfrei demontierbare, gasdurchlässige Hochspannungsisolation für die Leiterverbindungen der supraleitenden Magnetspulen des Stellarators Wendelstein 7-X (W7-X) entwickelt. In dieser Maschine sind die Verbindungen der innengekühlten Leiter im Kryovakuumraum angeordnet. Sowohl die niedrigen normalen Betriebsspannungen als auch die im Falle einer Schnellabschaltung zwischen zwei Leitern maximal auftretende Hochspannung von etwa 3 kV stellen für die elektrische Isolation im Betriebs-Hochvakuum kein Problem dar. Bei einer Störung kann jedoch ein Vakuumzusammenbruch mit einer Notabschaltung zusammentreffen, wobei ein schneller Druckanstieg den Schaltvorgang auch ausgelöst haben könnte. Im ungünstigsten Fall stellen sich dann die Gasdruckbedingungen des sog. "Paschen-Minimums" ein, das durch niedrige Spannungsfestigkeit auch bei großen Elektrodenabständen gekennzeichnet ist. Die niedrigste Durchschlagsspannung von etwa 160 V würde sich mit He-Gas ergeben, das beispielsweise aus einem Leck in einer Heliumleitung in den Kryovakuumraum strömen könnte.

Die gasdurchlässige Hochspannungsisolation wurde in Hinblick auf Gleichspannungsfestigkeit und Strömungsmechanik in He-Atmosphäre von < 1 bar untersucht. Die Spannungsuntersuchungen wurden bei Drücken im Bereich des Paschen-Minimums sowohl bei Raum- als auch LN_2 -Temperatur durchgeführt und ergaben ausreichende Festigkeit für die spezifizierte Prüfspannung von 12 kV. Die strömungsmechanischen bzw. vakuumtechnischen Untersuchungen zeigten, daß das He-Rückhaltevermögen und der Strömungswiderstand der Anordnung weder das Abpumpen des W7-X - Kryostaten noch die Lecksuche behindern werden.

Die hier beschriebenen Versuche weisen die grundsätzliche Eignung der vorgeschlagenen Isoliermethode nach. Zum genaueren Verständnis der physikalischen Vorgänge sowie zur Optimierung der Isolation wären weitere Untersuchungen nötig. Die Entwicklung ist jedoch so weit gediehen, daß mit dem Bau eines Prototypen für einen eventuellen Einsatz dieser Isolation im W7-X begonnen werden könnte.

Diese Hochspannungsisolation ist auch für andere Magnete mit intern gekühlten Supraleiterkabeln geeignet und wurde zum Patent angemeldet.

2 Abstract

A new type of a demountable and gas-permeable high voltage insulation was developed for the cable-in-conduit conductor connections of the superconducting Wendelstein 7-X (W7-X) magnet system. These connections are situated within the cryovacuum space of the machine. Normal operation voltages are very low so that they do not need to be considered separately with respect to electrical insulation. On the other hand, in case of an emergency switch off the maximal voltage between two conductor joints might reach around 3 kV. Again, the normal operation cryovacuum is by far sufficient as an electrical insulator for this voltage too. However, in case of a vacuum failure which might occur simultaneously with or might even trigger a fast coil discharge, the gas pressure could reach the conditions of the "Paschen minimum" which is characterized by a low breakdown voltage. In the worst case the leak would occur for instance between the cryovacuum space and the helium system leading to the minimal helium breakdown voltage of ≈ 160 V even for large electrode distances.

The gas-permeable high voltage insulation was tested with regard to dc voltage strength and to gas flow for He below atmospheric pressure. Experiments were performed around the Paschen minimum region at ambient as well as LN₂ temperatures. The results show that this type of insulation has sufficient strength for the specified test voltage of 12 kV under all vacuum conditions. The gas flow investigations proved that the flow resistance and the ability to hold helium will hinder neither the pumping of the W7-X cryostat nor the leak tests.

This work shows the principal applicability of the proposed insulation system. Further investigations would be needed for better physical understanding and for optimization. However, the development is so far advanced that one could start to build an insulation prototype for W7-X.

A patent application was filed for this gas-permeable and dismountable high voltage insulation which is suitable also for other large superconducting magnets with cable-in-conduit conductors.

3 Einleitung

Große supraleitende Magnetspulen werden meist aus Supraleiterkabeln gewickelt, die von einer dichten, rohrförmigen Stahl- oder Aluminiumhülle umgeben sind. Das Kühlmittel Helium hält das Kabel auf Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes; es strömt im Inneren der Hülle zwischen den Kabellitzen ("intern gekühltes Supraleiterkabel"). Vor dem Wickeln einer Spule wird der Leiter normalerweise mit Kunststoff-, Glasfaser- oder einem anderen geeigneten Gewebe umgeben und nach dem Wickeln mit Epoxidharz vergossen. Dadurch ergibt sich eine hochspannungsfeste Spule, die je nach Bauweise Spannungen bis zu mehreren zehn kV standhalten kann. Die Leiterenden werden entweder gleichzeitig mit dem gesamten Spulenleiter isoliert und mit dem Wickelkörper vergossen oder nachträglich beispielsweise durch "Naßwickeln" mit einem epoxidharzgetränkten Isolatorgewebe isoliert.

Im Betrieb sind sowohl die beschriebenen Spulen incl. eventueller Stahlgehäuse als auch die aus den Wickelkörpern und Gehäusen herausragenden Spulenanschlüsse zwecks thermischer Isolation von Hochvakuum umgeben. Hochvakuum ist bekanntlich auch ein hervorragender elektrischer Isolator, so daß die Hochspannungsfestigkeit sowohl der Spulen als auch der Anschlüsse im Normalbetrieb kein Problem darstellt. Sollte jedoch in einem Störfall Gas, beispielsweise Helium, durch ein Leck in den Hochspannungsraum eintreten, könnte sich bei Erreichen eines entsprechenden Druckes das Paschen-Minimum zwischen einem spannungsführenden Spulen- oder Anschlußteil und einer geerdeten Elektrode (Rohrleitung, Strukturteil etc.) einstellen. Die Durchschlagsspannung von Helium im Paschen-Minimum liegt bei nur ca. 160 V. Die Isolation des gesamten Spulensystems incl. aller Anschlüsse und Zuleitungen ist daher für das Paschen-Minimum auszulegen, d. h. die Isolation muß "Paschen-dicht" sein. Das bedeutet, daß im ungünstigsten Fall alle Isolatorüberzüge der Kabelenden und Anschlüsse der vollen - wegen der Gasionisation direkt anliegenden - Spannung standhalten müssen.

Die Kabelverbindungen zwischen zwei Spulen oder Spulenteilen sind meist Lötstellen, die sich im Inneren eines metallischen "Verbindungstopfes" -1- befinden (s. Abb.1). Die beiden Enden der zu verbindenden Wicklungen, d. h. die Kabelhüllen -2-, die die eigentlichen Supraleiterkabel -3- enthalten, sind mit dem Verbindungstopf dicht verschweißt. Meist wird über die Verbindungstöpfe auch das Kühllhelium den Kabeln zu- bzw. abgeführt. Beispielsweise strömt in Abb. 1 Helium durch das ebenfalls dicht mit dem Verbindungstopf verschweißte Rohr -4- in den Topf und von dort je zur Hälfte in das Innere der beiden Supraleiterkabel -3-.

Sowohl die Leiterenden als auch das He-Rohr sind von der elektrischen Isolation -5- überzogen. Falls noch irgendwelche Instrumentierungen wie beispielsweise Druckfühler oder Spannungsabgriffe vorgesehen sind, müssen die entsprechenden Zuleitungen im Inneren der Heliumzuführung oder durch eigene, dem He-Rohr entsprechende Rohre geführt werden.

In einem Magnetsystem, das aus mehreren Spulen besteht, können die Spulenanschlüsse erst nach der Installation der Spulen hergestellt werden. Die Montageschweißnähte der entsprechenden Verbindungstöpfe können somit erst nach dem Abkühlen des gesamten Systems kalt, d. h. endgültig, leckgetestet werden. Die Isolation dieser Verbindungstöpfe und der unmittelbar anschließenden blanken Leiter- und Rohrenden kann naturgemäß erst nach der Fertigstellung der Verbindungen und Anschlüsse erfolgen. Erschwerend kommt hinzu, daß im Spulen-Anschlußbereich oft mehrere Leiterverbindungen von Spulenteilen nebeneinander angeordnet sind, so daß sehr beengte Raumverhältnisse vorliegen.

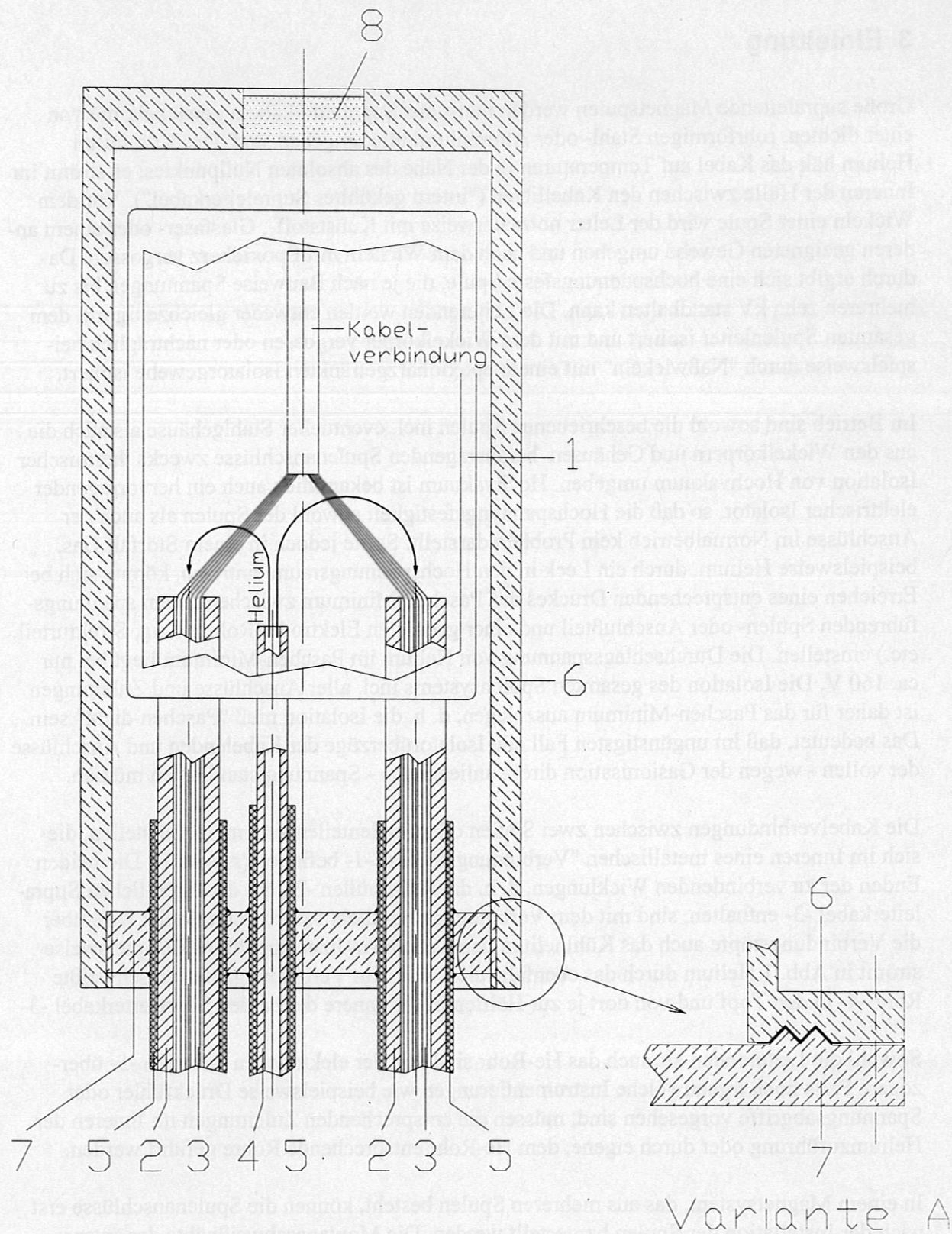


Abb. 1: Verbindung von zwei intern gekühlten Supraleiterkabeln. 1 - Verbindungstopf, 2 - Kabelhülle, 3 - Supraleiterkabel, 4 - Heliumrohr, 5 - Kabel- und Rohrisolation, 6&7 - Isolatorhülle, 8 - Filter

Ob die Spulenanschluß-Isolation nun vor oder nach dem ersten Abkühlen bzw. endgültigen Lecktest aufgebracht wird, hängt davon ab, welche Isolation man verwendet und welches Risiko man einzugehen bereit ist. Beispielsweise könnte man die Isolation erst nach dem ersten Abkühlzyklus und den kalten Lecktests montieren. Das wäre aber aufwendig, da dazu der Kryostat wieder geöffnet und ausreichend Zugang zu den Spulen-Anschlußstellen hergestellt (u. a. auch die thermische Isolation entfernt) werden müßte. Wenn die Isolation vor dem ersten Kaltfahren aufgebracht wird, sollte sie für den Fall eines auftretenden Kaltlecks des Verbindungstopfes entweder selbst heliumdicht sein oder, wenn die Isolation gasdurchlässig ist, für eine eventuelle Reparatur des Topfes einfach abnehmbar sein. Eine ausreichende Heliumdichtheit, die über viele Temperaturzyklen zu gewährleisten ist, ist schwierig zu erreichen. Außerdem muß die Isolation im Falle eines Lecks dem vollen He-Druck standhalten. Andererseits wäre eine einfache Demontierbarkeit auf jeden Fall wünschenswert, weil dann eventuell später auftretende Lecks oder Schäden im Inneren des Verbindungstopfes (z. B. bei der Kabelverbindung oder der Instrumentierung) einfacher repariert werden könnten.

Es ergeben sich somit drei Forderungen an die Isolation:

1. Sie soll unter beengten Raumverhältnissen einfach montierbar sein.
2. Sie soll wenig Platz beanspruchen.
3. Sie soll einfach abnehmbar sein.

Normalerweise werden "Paschen-dichte" Isolationen meist durch Naßwickeln mit Epoxidharz-getränktem Gewebe hergestellt. Dabei können auch feste, vorgeformte Isolatorsteile (beispielsweise aus GFK) mitverwendet werden. Nachteile dieser Methode sind einerseits der hohe Arbeitsaufwand sowie die Schwierigkeit der Herstellung bei beengten Raumverhältnissen und andererseits die Tatsache, daß diese Isolation nicht einfach abnehmbar ist.

Ein andere Möglichkeit der "Paschen-dichten" Isolation eines Verbindungstopfes wäre, letzteren lose mit einer Isolatorhülle zu umgeben und den Zwischenraum zwischen Hülle und Topf bzw. den Leiter- und Rohrenden auszuschaümen oder mit Isolierpulver oder Glasperlen auszufüllen. Eine solche Isolation wäre zwar relativ einfach und platzsparend herzustellen, eine eventuelle Demontage wäre aber immer noch aufwendig.

Außer den erwähnten existieren noch zahlreiche weitere Vorschläge für die Isolation von Spulenanschlüssen. Sie sind aber sehr aufwendig und/oder benötigen viel Platz, oder sie sind nur für niedrige Spannungen weit unter 10 kV geeignet.

Abb. 1 zeigt das Prinzip der vorgeschlagenen gasdurchlässigen Hochspannungsisolation, bei der die Isolierhülle verschraubbar ausgeführt ist: Der metallische Verbindungstopf -1- sowie die blanken Enden der Leiterhüllen -2- und des He-Rohres -4- sind von einer Isolatorhülle, bestehend aus den Teilen -6- und -7-, umgeben. In den Teil -6- der Hülle ist der Filter -8- eingesetzt (vorteilhafterweise eingeklebt). Letzterer könnte sich an einer beliebigen Stelle der Hülle sowohl im Teil -6- als auch im Teil -7- befinden. Der Filter könnte auch in einiger Entfernung angebracht sein und über ein Isolatorrohr mit der Isolatorhülle verbunden sein.

In Abb. 1 sind die Teile -6- und -7- so miteinander verschraubt, so daß der Teil -6- einfach montiert bzw. abgenommen werden kann. Das Gewinde zwischen den beiden Hüllenteilen ist ausreichend abgedichtet, so daß an dieser Stelle auch bei der höchstmöglichen Spannung im Paschen-Minimum kein Durchschlag erfolgen kann.

Die Montage der Isolation nach Abb. 1 könnte beispielsweise so erfolgen, daß schon vor der Montage des Verbindungstopfes -1- der Teil -7- über die Leiter- und Rohrenden aufgeschoben wird. Nach der Montage der Leiterverbindung, des He-Anschlusses, einer eventuellen Instrumentierung sowie des Verbindungstopfes würden dann die Teile -6- und -7- vorläufig verschraubt, in die richtige Lage gebracht, und der Teil -7- mit den Isolationen -5- der Leiter- bzw. Rohrenden verklebt. Der Teil -6- mit dem Filter -8- würde nach dem Aushärten der Klebestellen endgültig mit dem Teil -7- verschraubt werden.

Der Zwischenraum zwischen dem Verbindungstopf und der Hülle wird über den Filter -8- ausreichend gut evakuiert. Eine solche Filteröffnung hat den zusätzlichen Vorteil, daß daran ein Leckdetektor für einen integralen (warmen) Lecktest des Verbindungstopfes angeschlossen werden kann.

Ein einfacher Filter wie in Abb. 1 ist nur für relativ niedrige Spannungen von etwa 1 - 2 kV geeignet. Für höhere Spannungen muß eine etwas komplexere Filteranordnung mit Umlenkung des Entladeweges eingesetzt werden, wie er beispielsweise bei den unten beschriebenen Experimenten verwendet wurde (s. Abb. 5).

Anstatt die Teile -6- und -7- einfach über ein Gewinde zu verschrauben, können sie auch, wie im Detail "Variante -A-" der Abb. 1 dargestellt, über eine Flanschverbindung miteinander lösbar verbunden werden. Die Dichtung zwischen den Flanschen kann geometrisch verschiedenartig geformt, muß aber wiederum "Paschen-dicht" sein. In den unten beschriebenen Experimenten wurde eine flache Teflondichtung verwendet, die für die verwendeten Spannungen ausreichte (Abb. 4).

Die hier präsentierten Versuche sind als eher vorläufig zu betrachten; die Isolation wurde nur bis zum Erreichen der Spezifikation weiterentwickelt. Auf grundlegende Überlegungen zu den Durchschlagsmechanismen und statistische Analysen wurde verzichtet. Zum genaueren Verständnis der physikalischen Vorgänge sowie zum Ausloten dieses Isolationsprinzips für noch höhere Spannungen wären auf jeden Fall weitere systematische experimentelle und theoretische Untersuchungen nötig. Die Ergebnisse reichen jedoch aus, um mit dem Bau eines Prototypen der W7-X - Leiterverbindungsisolation zu beginnen, an dem dann weitere Tests durchgeführt werden können.

4 Hochspannungsversuche

4.1 Versuchsanordnung

4.1.1 Rezipient für Versuche bei Raumtemperatur

Der Prüfling (Abb. 2, 4 und 5) hing an einer Hochspannungsdurchführung (positive Spannung), die am Deckelflansch eines Edelstahl-Rezipienten ($\Phi_i = 315$ mm, Höhe = 1800 mm) montiert war. Der Abstand der Erdelektrode von der Unterseite des Prüflings war nicht genau definiert, er betrug zwischen null (Berührung) und einigen Zentimetern. (Diese Unsicherheit ist wegen der Abhängigkeit der Durchschlagsspannung vom Produkt aus Druck bzw. Dichte mal Abstand bedeutungslos. Der Druck wurde im interessierenden Bereich variiert.)

4.1.2 Versuchseinrichtung für LN₂-Temperatur

Für die Tieftemperaturversuche wurde die Hochspannungsdurchführung mit dem Prüfling in einem Kryostaten (Innendurchmesser 186 mm, Höhe des Innenraumes 1070 mm) montiert (s. Abb. 3). Als Erdelektrode diente die innere Kryostatenwand.

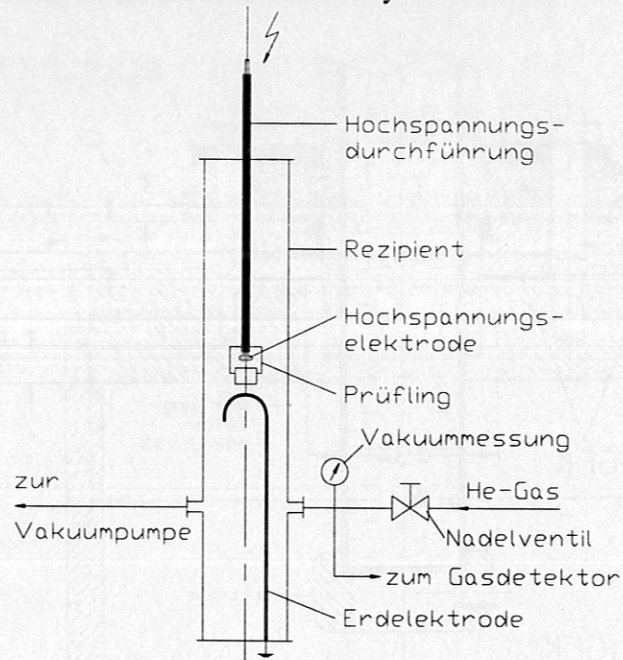


Abb. 2: Hochspannungstesteinrichtung für Untersuchungen bei Raumtemperatur

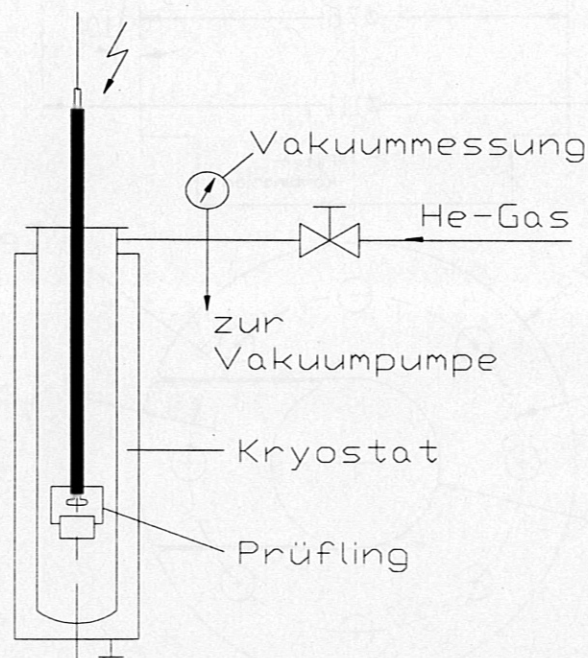
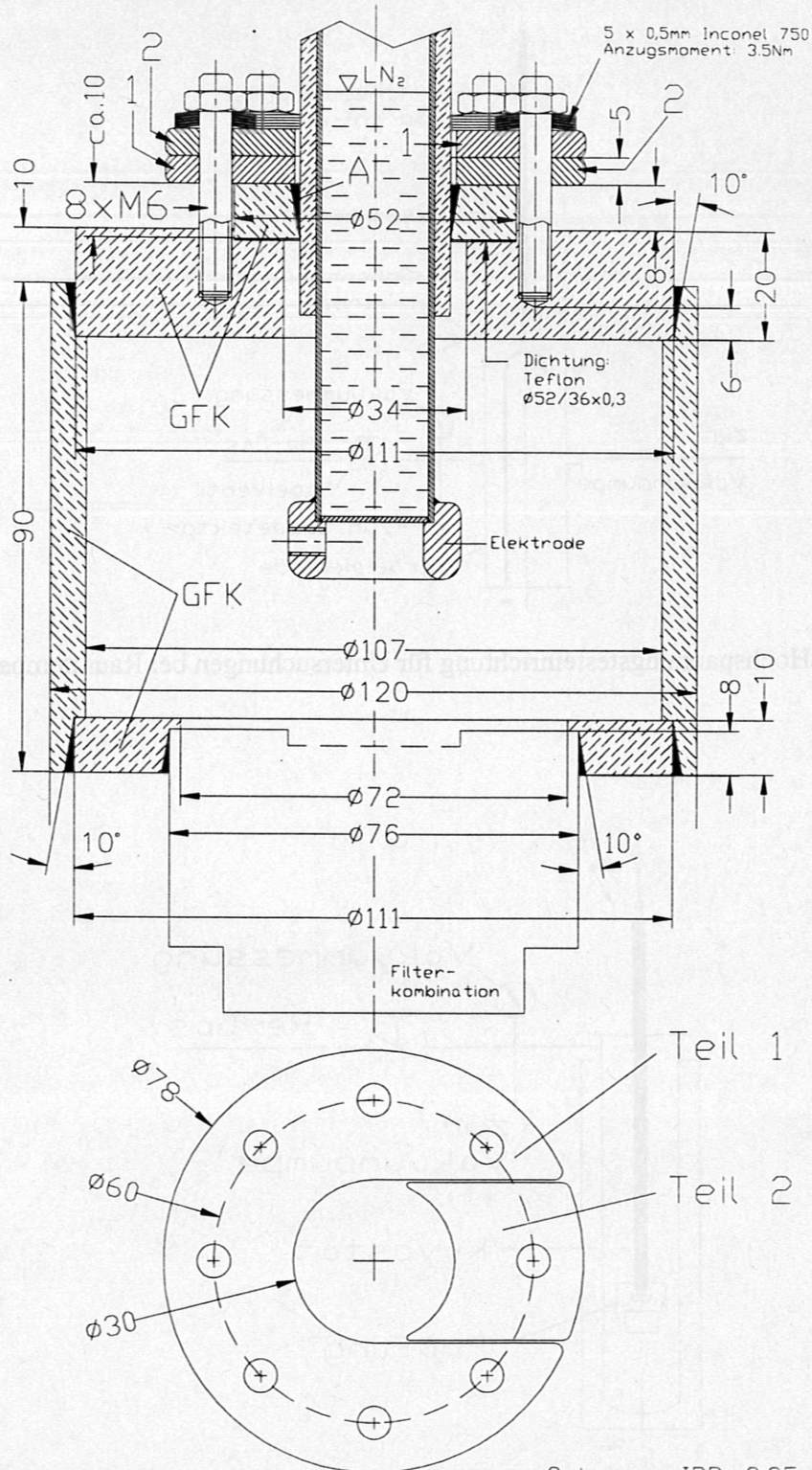


Abb. 3: Einrichtung für Tieftemperaturversuche

4.1.3 Prüfling

Es wurde die Durchschlagsspannung zwischen einer Hochspannungselektrode, die sich in einem mit GFK-Flanschen abgeschlossenen GFK-Hohlzylinder (Rotafil 50111, $\Phi 120/107$; Abb. 4) befand, und der Erdelektrode bei verschiedenen Gasdrücken gemessen. In der letzten,



Schauer, IPP, 8.95

Abb. 4: Prüfling

hier abgebildeten Version der Prüfanordnung war der GFK-Hohlzylinder oben über eine Dichtung mit der Hochspannungsdurchführung verbunden. (Der obere Dichtflansch war mit der Durchführung an der Stelle A verklebt.) In den unteren Deckelflansch des GFK-Rohres war eine Filterkombination (Abb. 5; Dichtung und Filter sind die eigentlichen Prüflinge) eingesetzt. Bei Versuchen bei Tieftemperatur war das untere Ende der Hochspannungsdurchführung mit Flüssigstickstoff gefüllt. Bei den drei ersten unten beschriebenen Versuchsreihen wurde eine ähnliche, hier nicht gezeichnete Anordnung verwendet, bei der der obere Deckelflansch des Rotafil-Rohres ohne demontierbare Dichtung mit der Durchführung verklebt war.

4.1.3.1 Dichtung

Die Dichtung bestand aus einem Teflonring zwischen plangedrehten GFK-Flächen mit den in Abb. 4 angegebenen Maßen. Die Flansche waren mit acht M6-Schrauben aus einer Alu-Legierung über je fünf übereinanderliegende, 0,5 mm starke Tellerfedern aus Inconel 750 mit einem Drehmoment von 3,5 Nm pro Schraube verschraubt.

4.1.3.2 Filterkombination

Der Aufbau der geprüften Filtervariante geht aus Abb. 5 hervor: Der Zwischenraum zweier ineinandergesteckter, rotationssymmetrischer GFK-Teile ist durch einen Ring und eine Scheibe aus jeweils offenporigem HDPE (Porengröße 250 μm , Ring- bzw. Scheibendicke 6,35 mm) abgeschlossen. Sowohl der HDPE-Ring als auch die -Scheibe sind mit den GFK-Teilen verklebt. Die beiden letzteren werden einerseits durch drei stiftförmige GFK-Abstandshalter und andererseits durch den HDPE-Ring in der richtigen Position zueinander gehalten. Der aus zwei Ringspalten und einem zylindrischen Hohlraum bestehende Innenraum dieser Anordnung ist mit Glasperlen mit Durchmessern von 200 μm bis 300 μm gefüllt.

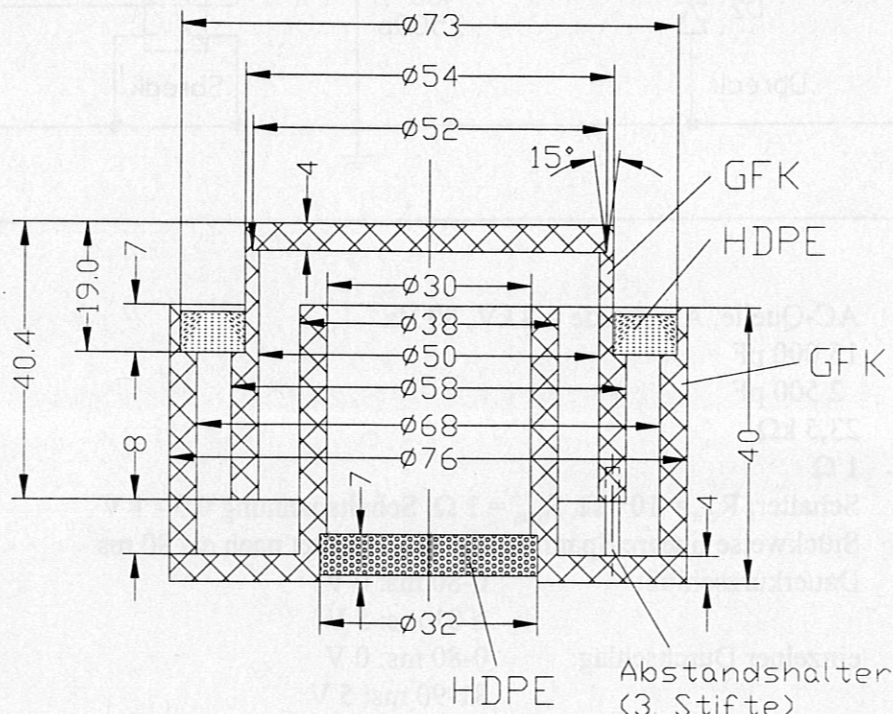
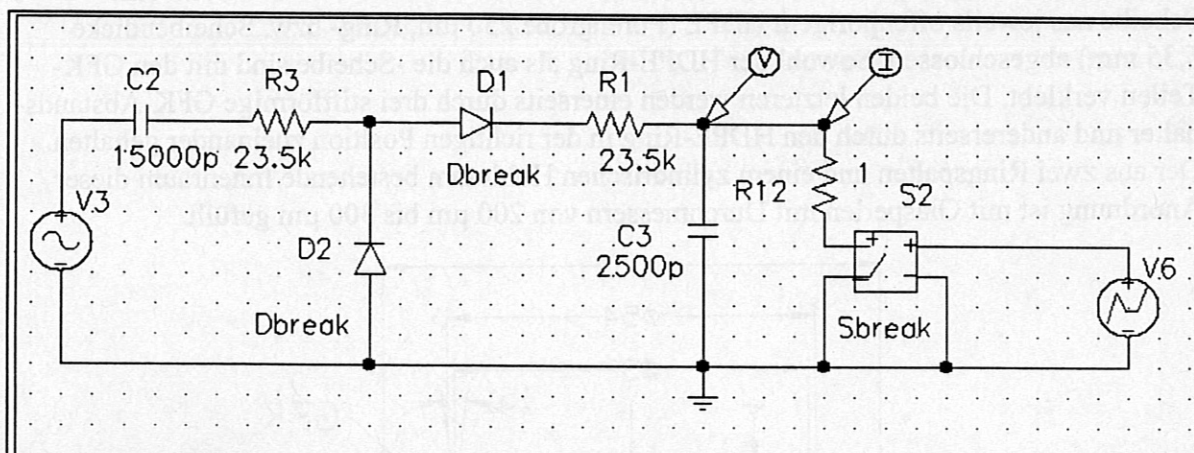


Abb. 5: Filteranordnung

4.1.4 Elektrische Schaltung

Zur Spannungsversorgung wurde das IPP-Ladegerät für 60 kV Gleichspannung (max. Kurzschlußstrom 42 mA) verwendet. Das Schaltbild und die wichtigsten Daten sind aus dem Anhang ersichtlich. Die dort angegebene U-I-Kennlinie bezieht sich auf die Maximalstellung des Regeltrafos bei veränderlichem Lastwiderstand. Die Welligkeit nimmt mit Abnahme des Widerstandes bzw. der Spannung zu.

Die Gesamtanordnung wurde mit PSpice für eine Prüfspannung von 16 kV_{rms} simuliert, s. Abb. 6. Der stationäre Spannungswert wird nach ca. 70 ms erreicht. Bei einem Spannungsdurchbruch (hier nach 80 ms; simulierter Kurzschlußwiderstand 2 Ω) entladen sich die Kondensatoren mit einer relativ starken Stromamplitude über den Prüfling. Nach einigen ms verschwindet der Strom dann wieder. In Abb. 7 ist der Fall dargestellt, daß die Spannungsfestigkeit des Prüflings nach dem Abklingen des Stromes wieder erreicht wird. Ein Durchschlag erscheint bei dieser Schaltung als eine einzelne kurzdauernde Entladung. Abb. 8 zeigt den Fall, daß nach dem Durchbruch ein dauerhafter Kurzschluß bestehen bleibt.



| | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V3 | AC-Quelle, Amplitude = 8 kV, 50 Hz |
| C2 | 15 000 pF |
| C3 | 2 500 pF |
| R1, R3 | 23,5 kΩ |
| R12 | 1 Ω |
| S2 | Schalter; $R_{\text{ein}} = 10^{12} \Omega$, $R_{\text{aus}} = 1 \Omega$, Schaltspannung 0,5 - 1 V |
| V6 | Stückweise lineare Spannungsquelle, schaltet nach ca. 80 ms |
| | Dauerkurzschluß: |
| | 0-80 ms: 0 V |
| | ≥ 81 ms: 5 V |
| | einzelner Durchschlag: |
| | 0-80 ms: 0 V |
| | 81-90 ms: 5 V |
| | ≥91 ms: 0 V |

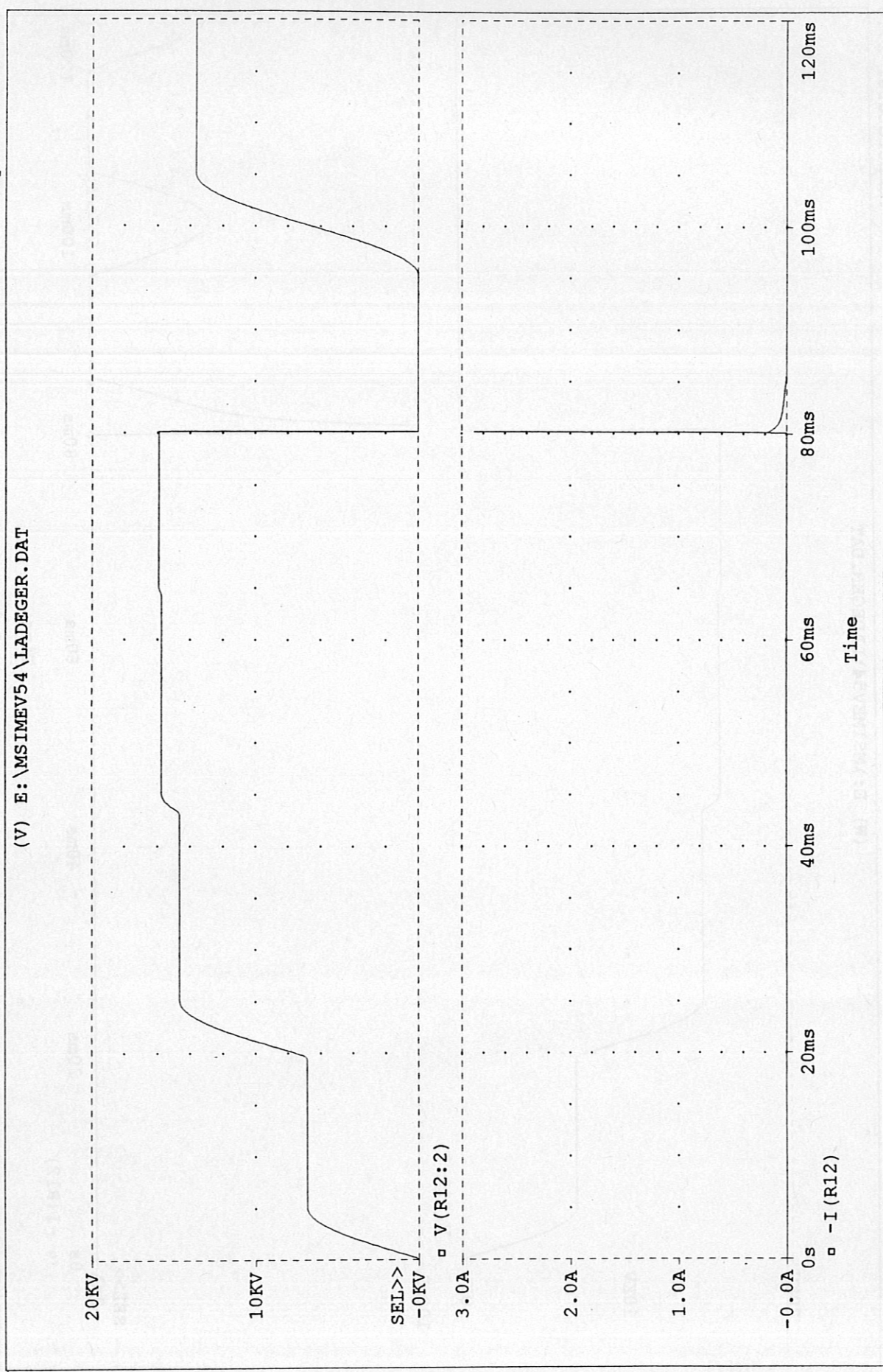
Abb. 6: Simulation des Ladegerätes mit angeschlossenem Prüfling

* E:\MSIMEV54\ladeger.sch

Temperature: 27.0

Date/Time run: 09/21/95 11:05:26

(V) E:\MSIMEV54\LADEGER.DAT



Time: 11:09:23

Page 1

Date: September 21, 1995

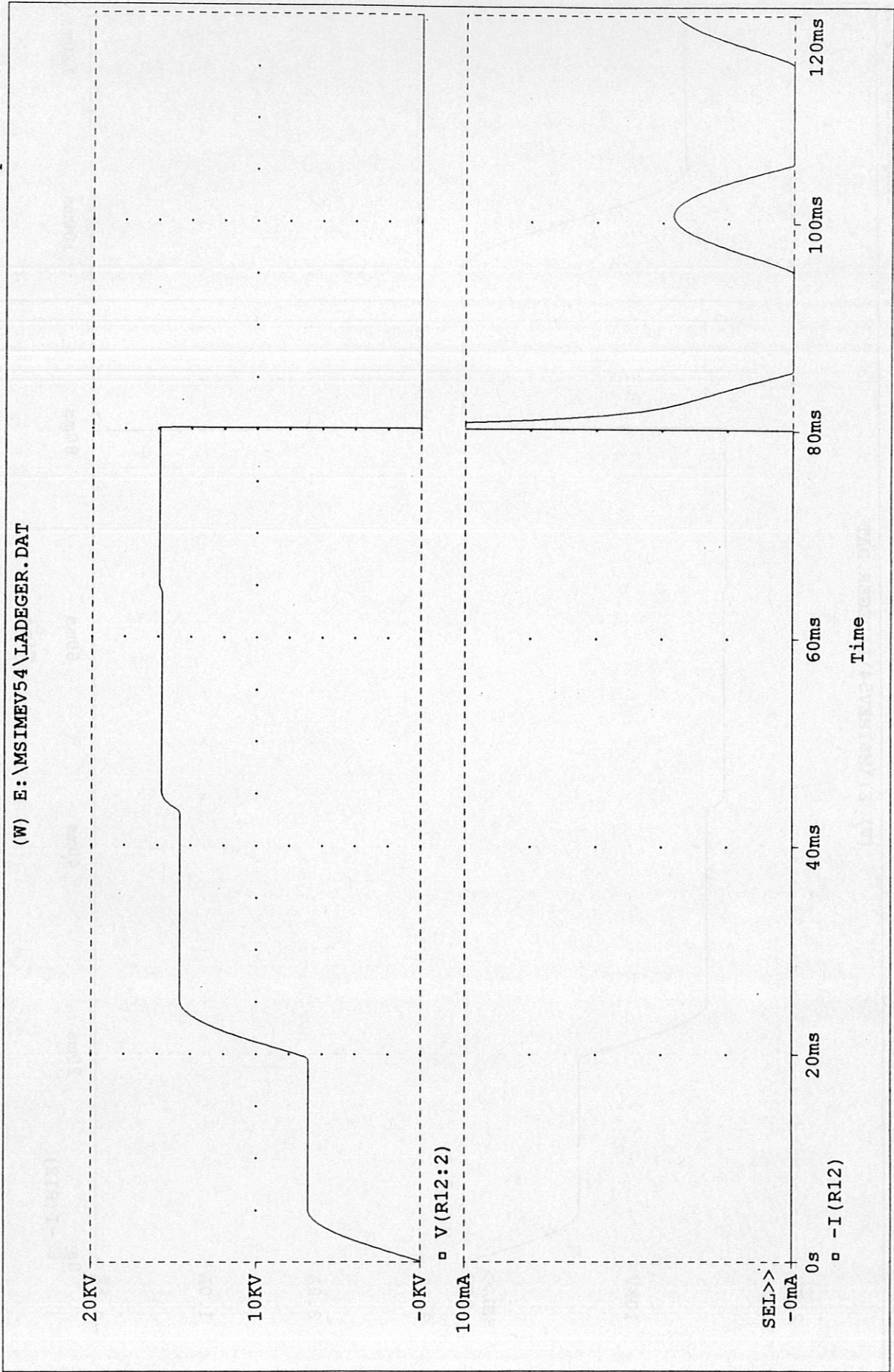
Abb. 7

* E:\MSIMEV54\ladeger.sch

Date/Time run: 09/21/95 11:10:51

Temperature: 27.0

(W) E:\MSIMEV54\LADEGER.DAT



Date: September 21, 1995

Page 1

Time: 11:12:31

Abb.8

4.2 Versuchsdurchführung

Alle Versuche wurden mit Heliumgas bei Drücken < 1 bar durchgeführt.
Das Vakuum wurde mit folgenden Geräten gemessen:

"Ionivac": im HV - Bereich
 "Thermovac": im Bereich $\approx 10^{-3} - 10^{-1}$ mbar
 mech. Manometer: im Bereich > 10 Torr

(Es werden hier die vom jeweiligen Gerät angezeigten Einheiten angegeben, obwohl sie teilweise nicht mehr gebräuchlich sind.)

4.2.1 Versuche bei Raumtemperatur

4.2.1.1 Filtertest

Test am 1. 2. 1995

Die Filteranordnung wurde in einer ähnlichen Prüfanordnung wie in Abb. 4 getestet, es war jedoch keine demontierbare Dichtung vorhanden. Der Hohlzylinder (GFK-Rohr) war mit beiden Deckelflanschen verklebt.

Der Rezipient wurde evakuiert, ca. 10^{-4} mbar wurden an der dem Saugstutzen gegenüberliegenden Meßstelle (Abb. 2) erreicht. Bei diesem Hochvakuum betrug die Spannungsfestigkeit > 16 kV.

Dann wurde der Rezipient langsam mit Helium geflutet und die Prüfspannungen bei den angegebenen Drücken angelegt:

| | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 mbar | Spannung auf 16 kV gestellt, 1 Minute, o.k. |
| 30 Torr | Spannung wird hochgefahren, ab ca. 14 kV kurze Spannungseinbrüche (Entladungen); die Spannungsanzeige fällt dabei bis auf ca. 10 kV hinunter (Trägheit des Gerätes!). Die Spannung ließ sich weiter auf 16 kV erhöhen, es traten im Abstand von einer bis einigen Sekunden kurze Einbrüche auf 15 kV auf. Die 16 kV wurden 1 min stengelassen. |
| 100 Torr | 12 kV wurden ohne Spannungseinbruch erreicht; beim Höherdrehen traten vermehrt Entladungen auf, bei ca. 13 kV kam es zum Dauerdurchschlag; die Spannung fiel dabei auf 1-2 kV. (Der Filter war vom vorigen Versuch möglicherweise schon beschädigt.) |

Aus dieser Meßreihe folgt, daß der ungünstigste Gasdruck (Paschen-Minimum) für diese Anordnung vermutlich im Bereich 100 Torr und darüber liegt.

Test am 14. 3. 1995

Neuer Filter

Die Anordnung war wie oben verklebt, d. h. ohne demontierbare Dichtung.

Nadelventil geschlossen, Hochvakuum im Rezipienten:

10^{-4} mbar 16 kV, 1 min; o.k.

He-Einlaß:

100 Torr Beim Hochfahren traten ab ca. 14 kV leichte Spannungseinbrüche auf.
 Auf 16 kV gestellt, mehrere Minuten: Spannungseinbrüche alle 1 - 2 sec, dann auf
 15 kV erniedrigt: kleine Entladungen alle 5 - 10 sec.
 Weiter heruntergefahren auf
 14 kV, 1 min: möglicherweise ein kleiner Spannungseinbruch, kaum sichtbar.
 13 kV, 1 min: o. k.
 wieder erhöht auf 16 kV: Wie vorher, etwa im 1s - Abstand kleine Entladungen; der Zustand blieb stationär.

Danach wurde das He-Ventil geschlossen, das Vakuum verbesserte sich, die Spannung wurde auf 16 kV stehengelassen. Die folgenden Zeitangaben beziehen sich auf die Zeit nach dem Schließen des Ventils; die Spannung blieb auf 16 kV:

| | | |
|-------|---------|---------------------------------------------------------------|
| 2 min | 65 Torr | Entladungen traten weniger häufig auf, nur mehr etwa alle 2 s |
| 3 min | 50 Torr | Entladungen etwa alle 5 s |
| 4 min | 35 Torr | Entladungen etwa alle 10 s |
| 5 min | 30 Torr | keine Entladungen mehr |

Das He-Ventil wurde wieder geöffnet, der Gasdruck stieg, die Spannung blieb auf 16 kV stehen (Versuchsdauer mehrere Minuten):

Kleine Entladungen begannen wieder bei ca. 120 Torr und traten in Zeitabständen von ca. 2 - 5 s auf.

Bei Erreichen von ca. 300 Torr hörten die Entladungen wieder auf, die Spannung blieb ohne weitere Einbrüche stehen.

Das Paschen-Minimum liegt nach diesen Versuchen im Bereich 100 - 300 Torr.

Test am 28. 3. 95:

Wiederholung des vorigen Versuches ohne Glasperlenfüllung

10^{-4} mbar: 16 kV, 1 min, o. k.

Die Spannung wurde abgeschaltet und das Nadelventil geöffnet:

100 Torr: Beim Hochfahren der Spannung erste Entladungen zwischen 6 und 7 kV.
Zurückstellen der Spannung auf 6 kV, 1 min.: o. k.
Beim Hochfahren wieder Spannungseinbruch wie vorher, dann Spannungszusammenbruch bei ca. 7 kV.
Zurück auf 6 kV, 1 min.: o. k.

Die Spannung blieb auf 6 kV, der Gasdruck wurde langsam bis auf 300 Torr erhöht:
keine Spannungseinbrüche

300 Torr 10 kV, 1 min, o. k.

Das Ventil wurde geschlossen, der Druck sank, die Spannung blieb auf 10 kV stehen:

Ab ca. 270 Torr begannen wieder Entladungen, die Spannung wurde auf 6 kV erniedrigt und der Druck weiter verringert; nach ca. 2 min waren 100 Torr erreicht - keine Spannungseinbrüche.

Nach etwa einer weiteren Minute, ab ca. 80 Torr, begannen Entladungen;
die Spannung wurde auf 5 kV gestellt: o.k.

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 60 Torr | Entladungen begannen; Spannung zurück auf 4 kV: o.k. |
| 20 Torr | 4 kV o.k., Spannung ließ sich nicht höher stellen -> sofortiger Zusammenbruch |
| 18 Torr | 4 kV, leichte Entladungen |
| 15 Torr | Spannung konnte nur mehr auf 3 kV gehalten werden |
| 10 Torr | Spannung konnte wieder auf 4 kV erhöht werden |
| 1 mbar | Spannung konnte wieder auf 5 kV erhöht werden |

Die Spannung wurde auf 5 kV stengelassen, der Druck wieder erhöht (Ventil geöffnet).

| | |
|----------|--------------------------------------------|
| 10 Torr | 4 kV, o.k. |
| 30 Torr | 4 kV, o.k. |
| 50 Torr | 4.5 kV, o.k. |
| 60 Torr | 5 kV, o.k. |
| 100 Torr | 6 kV, zuerst kleine Entladungen, dann o.k. |

4.2.1.2 Test des Filters und der Dichtung

Test am 8.5.1995:

Die endgültige Einrichtung nach Abb. 4 wurde bei Raumtemperatur getestet.

2×10^{-4} mbar 16 kV, 1 min, o.k.

100 Torr 12 kV, 1 min, o.k., dann auf
15 kV erhöht: bei stehender Spannung alle paar Sekunden kleine Entladungen,
dann auf
12 kV zurück: 1 min, o.k., dann langsam hochgefahren:
13 kV eine sehr kleine Entladung, dann Ruhe
14 kV: alle 5 - 10 s sehr kleine Entladungen
15 kV: wie vorher, alle paar Sekunden etwas stärkere Entladungen; dann
zurück auf
12 kV: 1 min, o.k.

12 kV blieben stehen, Ventil wurde langsam geöffnet, -> Druckanstieg mit einer Geschwindigkeit von ca. 70 Torr/min bis auf 500 Torr: keine Entladung.

Das Ventil wurde wieder geschlossen, der Druck sank innerhalb von ca. 10 min auf 1 mbar - die Spannung blieb ohne Entladung auf 12 kV stehen. Dann wurde die Spannung erhöht auf 13 kV und wieder He-Gas eingelassen:

| Zeit | Druck |
|-------------|---------|
| 0 s | 1 mbar |
| 20 | 50 Torr |
| 40 | 100 |
| 1 min | 150 |
| 1,5 min | 200 |
| 1 min, 50 s | 250 |
| 2 min, 10 s | 300 |
| 2 min, 35 s | 350 |
| 3 min | 400 |
| 3,5 min | 450 |
| 4 min | 500 |

Es traten keine Entladungen auf.

4.2.2 Versuche bei LN₂-Temperatur

Test am 22.5.1995

Zur Abkühlung der Versuchseinrichtung wurde LN₂ einerseits bis oberhalb des Prüflings in den Kryostaten und andererseits auch in das Innere der Hochspannungsdurchführung gefüllt (vgl. Abbn. 3 u. 4). Dabei drang vermutlich auch ein Teil des Stickstoffs durch die Filterkombination in das innere des GFK-Hohlzylinders.

Nachdem sowohl der Prüfling als auch der untere Teil der Kryostaten-Innenwand sicher kalt waren, wurde der Flüssigstickstoff im Kryostaten bis auf einen kleinen Rest ausgeheizt. Der Stickstoffdampf kühlte dabei weiterhin sowohl den Prüfling als auch das Gefäß. Während der gesamten Versuchsreihe wurde der LN₂ - Spiegel im Inneren der Hochspannungsdurchführung konstant gehalten (Überprüfung durch ein Ni-CrNi - Thermoelement).

Der Kryostat wurde auf 60 mbar evakuiert (gemessen am Pumpstutzen, der Druck innen war höher). Dabei blieb am Kryostatenboden möglicherweise noch ein Rest von festem oder flüssigem Stickstoff mit ≥ 60 K (Tripelpunkt: $T_t=63,2$ K, $p_t=129$ mbar). Eventuell in den Prüfling eingedrungener LN₂ wurde durch den untenliegenden Filter herausgesaugt.

[Bei diesem Test befand sich noch etwas N₂ - Dampf im Kryostaten. Das Paschen-Minimum für Stickstoff beträgt ca. 250 V und ist damit höher als für He (ca. 160 V). Die Minima für Raumtemperatur liegen bei ca. 10 mbar·mm (N₂) bzw. im Bereich 30 - 150 mbar·mm (He). Im Temperaturbereich um 70 K ist die Gasdichte um den Faktor 4 - 5 höher als bei Raumtemperatur, d. h. das Paschen-Minimum wird bei entsprechend niedrigeren Drücken erreicht. Für die vorliegende Versuchseinrichtung müßte nach den obigen Ergebnissen das Minimum für He im Bereich von 50 Torr liegen, das für Stickstoff um den Faktor 10 entsprechend niedriger. Allerdings sind diese Überlegungen spekulativ, der Zusammenhang zwischen der Paschenkurve und dem Gasgemisch in der konkreten Anordnung sind nicht bekannt.]

Bei den folgenden Versuchen wurde nicht gewartet, bis der Stickstoff vollständig verdampft war. Das bedeutet, daß möglicherweise mit Drücken über dem wahrscheinlichen Minimum der Spannungsfestigkeit begonnen wurde. Es war beabsichtigt, die Versuche nach dem Verdampfen des LN₂ bei besseren Vakua fortzuführen.

Die Spannung wurde auf 16 kV gestellt und während der gesamten Versuchsreihe konstant auf diesem Wert belassen.

60 mbar \approx 45 Torr: 1 Minute, keine Entladungen.

Sodann wurde He-Gas eingelassen (ein N₂ - Dampfanteil war vermutlich noch vorhanden;
 $N_{He}/N_{N_2} = [p_{ges} - p_{N_2}]/p_{N_2}$; $p_{N_2}=45$ Torr)

| | | |
|----------|------------|------|
| 100 Torr | 1 Minute | o.k. |
| 200 Torr | 1½ Minuten | o.k. |
| 300 Torr | 1 Minute | o.k. |

Der He-Druck wurde innerhalb einiger Minuten bei angelegter Spannung (16 kV) bis auf 520 Torr erhöht und das Gas dann wieder abgepumpt:

| Zeit [min:s] | Druck [Torr] | Bemerkungen |
|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 0:0 | 520 | 16 kV, keine Entladungen |
| 0:17 | 400 | - " - |
| 0:40 | 300 | - " - |
| 1:13 | 200 | - " - |
| 1:40 | 150 | - " - |
| 2:26 | 100 | - " - |
| 3:30 | 70 | - " - |
| 5:40 | 50 | - " - |
| 7:30 | 40 | - " - |
| 15:0 | 40 | Spannungseinbruch |

Die Spannung wurde abgeschaltet und wieder hochgeregelt: Es konnten nur mehr 14 kV gehalten werden; das bedeutet, daß ein dauerhafter Schaden an der Isolation entstanden war.

Die Spannungsversuche wurde wegen des Isolationsschadens beendet. Wie sich nach der Demontage des Prüflings herausstellte, war ein Durchschlag an einer schlechten Klebestelle zwischen dem oberen Dichtflansch und der Hochspannungsdurchführung (Stelle A in Abb. 4) erfolgt.

4.3 Diskussion

Obwohl nicht sicher ist, ob die Tieftemperaturversuche bei den ungünstigsten Druckverhältnissen durchgeführt wurden, wurde auf eine Wiederaufnahme der Tests nach der Reparatur der Klebestelle verzichtet. Wegen des sehr breiten Paschen-Minimums für He ist anzunehmen, daß der Unterschied zum ungünstigsten Fall - wenn überhaupt - nicht sehr groß gewesen wäre. Jedenfalls kann man davon ausgehen, daß die Isolierfähigkeit der Filteranordnung bei tiefen Temperaturen in keinem Falle schlechter wird als bei Raumtemperatur.

Außerdem konnte gezeigt werden, daß die Dichtung auch in kaltem Zustand spannungsfest ist.

Die Spannungsfestigkeit sowohl der Filteranordnung als auch der Dichtung reicht nach den Ergebnissen dieser noch vorläufigen Untersuchungen für die W7-X - Anforderungen (Prüfspannung 12 kV) aus.

5 Vakuumtechnische Untersuchungen

5.1 He-Haltevermögen der Filteranordnung

Die folgenden Versuche wurden mit der Anordnung nach Abb. 2 durchgeführt. Nach Abschluß der Versuche am 8.5.95 (s. Pkt. 4.2.1.2) wurde der Rezipient mit He geflutet und dann mit der Turbomolekularpumpe evakuiert. An den folgenden Tagen wurde die He-Abgabe vom Prüfling mit dem Leckdetektor gemessen. Das gemessene Vakuum wurde nicht aufgezeichnet, es lag wie bei den Spannungsversuchen konstant bei etwa $(1-2) \cdot 10^{-4}$ mbar.

| Tag | Uhrzeit | He-Rate (mbar·l/s) | Bemerkungen |
|-------|---------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 8.5. | 16.00 | | He-Atmosphärendruck, Beginn der Evakuierung |
| 10.5. | 10.45 | $6 \cdot 10^{-9}$ | Vakuum |
| 11.5. | 10.36 | $3 \cdot 10^{-9}$ | |
| 12.5. | 11.13 | $2 \cdot 10^{-9}$ | |

Damit war die Empfindlichkeitsgrenze des Gasetektors erreicht.

Der Prüfling wurde von der Hochspannungsdurchführung abgeschraubt (die Dichtungsverschraubung wurde geöffnet) und der Versuch wiederholt:

| Tag | Uhrzeit | He-Rate (mbar·l/s) | Bemerkungen |
|-------|---------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| 15.5. | | | Rezipient mit He geflutet, Beginn der Evakuierung |
| 16.5. | 13.40 | $7 \cdot 10^{-9}$ | Vakuum |
| 17.5. | 11.10 | $2 \cdot 10^{-9}$ | |
| 18.5. | 11.10 | $1 \cdot 10^{-9}$ | |

Aus Abb. 9 ist ersichtlich, daß das Abpumpen von He mit eingebautem Filter um ca. 1 Tag länger dauert. Beim W7-X wird diese etwas langsamere Ausgasrate die Lecksuche kaum behindern. Die Abpumpzeit wird dort im wesentlichen durch die Abgasraten der Superisolation und der übrigen großen Oberflächen bestimmt sein.

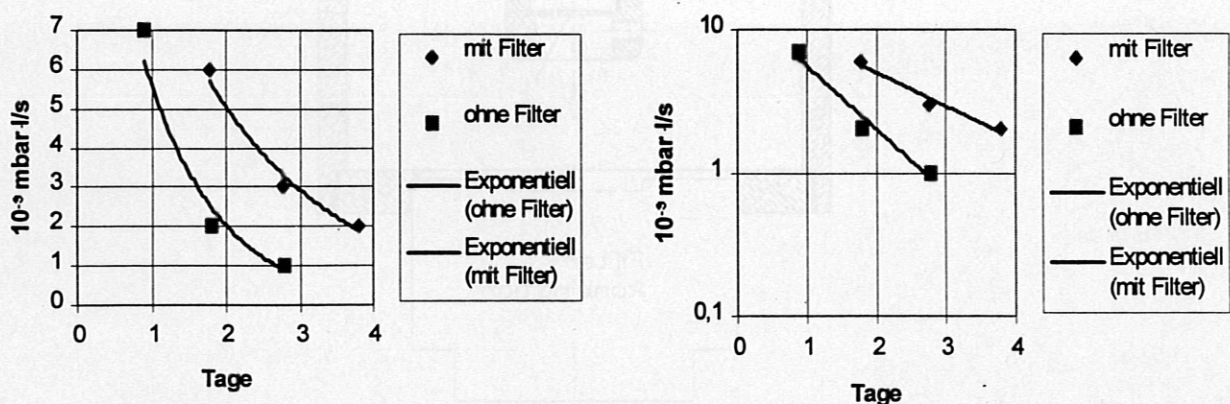


Abb. 9: He-Abgabe mit und ohne Filter

5.2 He-Strömung durch die Filterkombination

Nach den Tieftemperatur-Hochspannungsversuchen (Pkt. 4.2.2) war die durchschlagene Klebestelle (A in Abb. 4) repariert worden.

Die Anordnung für die Strömungsversuche ist in den Abbn. 10 u. 11 dargestellt.

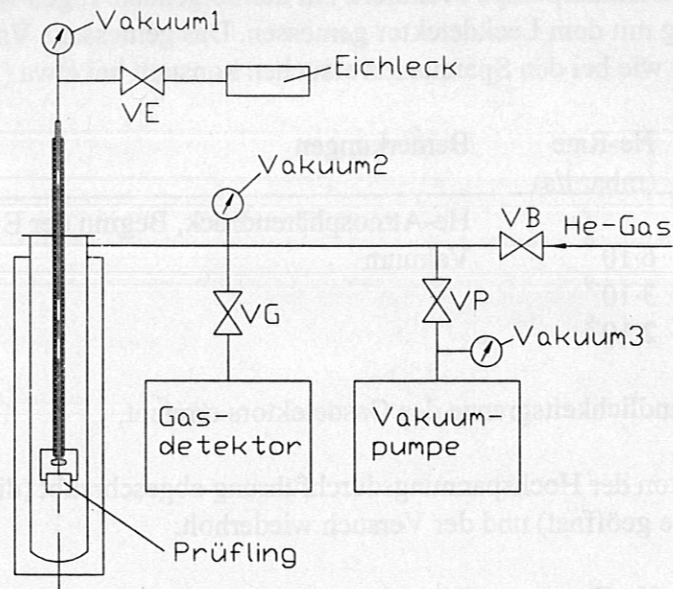


Abb. 10: Versuchsaufbau für die Strömungsversuche

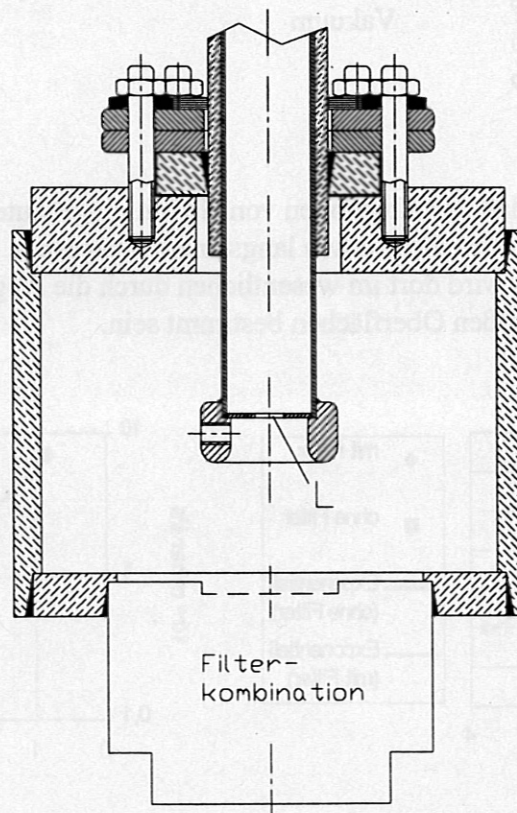


Abb. 11: Modifizierter Prüfling: Unteres Durchführungsende ist durchbohrt

5.2.1 Simulation einer Lecksuche unter Zwischenschaltung der Filterkombination

Am oberen Ende der Hochspannungsdurchführung wurden ein Eichleck sowie eine Vakuummeßzelle (Vakuum1 ; s. Abb. 10) angeschlossen, das untere Durchführungsende wurde durchbohrt (Loch L in Abb. 11). Dadurch konnte ein vom Eichleck ausgehender, definierter He-Strom mit dem Gasdetektor gemessen werden.

| Dat | Zeit | Vak1 | Vak2 | Vak3 | VE | V G | VP | Gasdet. | Bemerkungen |
|-------|------------|--------|------|--------|----|--------|----|----------|--------------------------------------------------|
| | | Torr | mbar | mbar | | | | mbar-l/s | |
| 31.5. | 8:30 | | | | z | z | a | | Abpumpen beginnt |
| | 15:30 | 2e-2 | <e-3 | 2e-5 | | | z | | Vakuumpumpe wird abgeschaltet |
| 1.6. | 8:30 | | | | | | a | | Wiederbeginn des Abpumpens |
| | 13:30 | 1,2e-2 | <e-3 | 1,2e-5 | | a | | 4,5e-10 | Gasdetektor-Nullpunkt: 3,5e-10 mbar-l/s |
| | 13:40 | 1,2e-2 | <e-3 | | | | z | 2e-9 | Gasdetektor saugt allein |
| | min: 0+ | | | | a | | | >e-6 | Eichleck auf, Gasdet. reagiert sofort |
| | 2,5 | | | | | | | e-5 | Gasdetektor-Meßbereich: Grobtaste (=Bypass) |
| | 3 | | | | | | | 7e-6 | |
| | 4 | | | | | | | 4,5e-6 | |
| | 5 | | | | | | | 3e-6 | |
| | 6 | | | | | | | 2,4e-6 | |
| | 7 | | | | | | | 1,9e-6 | |
| | 8 | | | | | | | 1,7e-6 | |
| | 9 | | | | | | | 1,4e-6 | |
| | 10 | | | | | | | 1,3e-6 | |
| | 12 | | | | | | | e-6 | |
| | 13 | | | | | | | 2,2e-8 | Grobtaste aus; Meßbereiche stimmen nicht überein |
| | 14 | | | | | | | 2e-8 | |
| | 16 | | | | | | | 1,8e-8 | Wert des Eichlecks |
| | 20 | | | | | | | 1,8e-8 | |
| | 21 | | | | z | | | 1,8e-8 | Eichleck zu |
| | 22 | | | | | | | 4e-9 | |
| | 23 | | | | | | | 2,5e-9 | |
| | 24 | | | | | | | 2e-9 | Ausgangswert wie bei 0 min |
| | 25 | | | | | | | 1,8e-9 | Nullpegel sinkt (Vakuum is besser) |
| | 26 | | | | | | | 1,7e-9 | |
| | 27 | | | | | | | 1,7e-9 | |
| | 28 | | | | | | | 1,6e-9 | |
| | 30 | | | | | | | 1,6e-9 | Endwert; Eichleck wird geöffnet |
| | 30,5 | 1,5e-2 | 5e-3 | | a | | | 1,2e-7 | |
| | 31 | | | | | | | e-7 | |
| | 31,75 | | | | | | | 6e-8 | |
| | 32 | | | | | | | 4,6e-8 | |
| | 33 | | | | | | | 2,6e-8 | |
| | 34 | | | | | | | 2e-8 | |
| | 35 | | | | | | | 1,7e-8 | |
| | 36 | | | | | | | 1,6e-8 | |
| | 37 | | | | | | | 1,5e-8 | |
| | 40 | | | | | | | 1,5e-8 | Eichleck wird geschlossen |
| | 40,75 | | | | z | | | e-8 | |
| | 41 | | | | | | | 8e-9 | |
| | 42 | | | | | | | 3,6e-9 | |
| | 43 | | | | | | | 2e-9 | |
| | 44 | | | | | | | 1,5e-9 | |
| | 45 | | | | | | | 1,35e-9 | |
| | 46 | | | | | | | 1,3e-9 | |
| | 47 | | | | | | | 1,3e-9 | Endwert ist wieder besser |

Wie aus der obigen Tabelle und Abb. 12 ersichtlich ist, reagiert der Gasdetektor sofort auf das Öffnen und Schließen des Eichlecks (bei ca. 20, 30 und 40 Minuten; bei 12-13 min erfolgte die Meßbereichsumschaltung!)

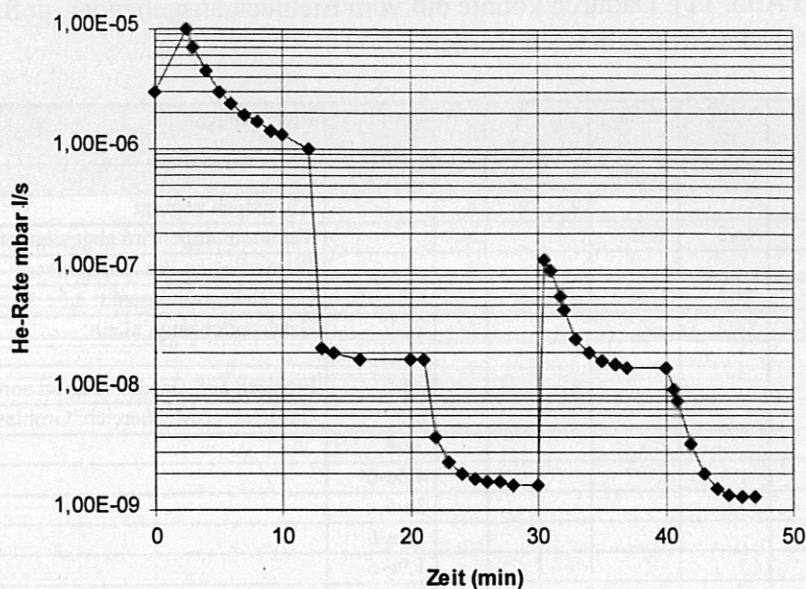


Abb. 12: Anzeige des Gasdetektors in Abhängigkeit von der Ventilstellung des Eichlecks

5.2.2 Druckausgleich über den Filter

Beim Fluten des Kryostaten über das Nadelventil VB wurden die Vakua vor und hinter dem Filter verglichen. Die Ventile VE, VG und VP waren geschlossen.

| Zeit min | Vak1 Torr | Vak2 mbar | VB | Bemerkungen |
|-------------|--------------|--------------|----|---------------------------------|
| 0+ | 1,4e-2 | 5e-3 | z | alle Ventile werden geschlossen |
| 1 | 1,4e-2 | 7e-3 | | |
| 2 | 1,4e-2 | 9e-3 | | |
| 3 | 1,4e-2 | e-2 | | |
| 4 | 1,5e-2 | 1,3e-2 | | |
| 5 | 1,5e-2 | 1,3e-2 | | |
| 6 | 1,6e-2 | 1,4e-2 | | |
| 7 | 1,6e-2 | 1,5e-2 | | |
| 8 | 1,7e-2 | 1,7e-2 | | |
| 9 | 1,7e-2 | 2e-2 | | |
| 10 | 1,8e-2 | 2e-2 | | |
| 11 | 1,9e-2 | 2,2e-2 | | |
| 12 | 1,7e-2 | 2,3e-2 | | unruhige Anzeige bei Vakuum I |
| 13 | 1,7e-2 | 2,5e-2 | | - - - |
| 14 | 2e-2 | 2,7e-2 | | Anzeige ist wieder ruhig |
| 15 | 2e-2 | 2,7e-2 | | |
| 16 | 2,2e-2 | 2,8e-2 | | |
| 17 | 2,3e-2 | 2,8e-2 | | |

| Zeit | Vak1 | Vak2 | VB | Bemerkungen |
|------|--------|--------|----|-------------------------------|
| min | Torr | mbar | | |
| 18 | 2,4e-2 | 3e-2 | | |
| 19 | 2,6e-2 | 3,3e-2 | | |
| 20 | 3,2e-2 | 4,2e-2 | a | VB wird ganz langsam geöffnet |
| 20,5 | 3,7e-2 | 5,8e-2 | | |
| 21 | 4,2e-2 | 6e-2 | | |
| 21,5 | 5e-2 | 7e-2 | | |
| 22 | 6e-2 | 9e-2 | | VB weiter geöffnet |
| 22,5 | 7e-2 | e-1 | | |
| 23 | 8e-2 | 1,2e-1 | | |
| 24 | 0,14 | 0,14 | | Meßbereich Vak1 umgeschaltet |
| 25 | 0,2 | 0,2 | | VB weiter geöffnet |
| 26 | 0,45 | 0,6 | | --- |
| 27 | 1,3 | 1,5 | | |
| 28 | 4,3 | 5 | | VB noch weiter geöffnet |
| 28,5 | 10 | 10 | | |
| 29 | 100 ? | 40 | | |

Aus diesen Daten und Abb. 13 ist ersichtlich, daß der Druckausgleich über den Filter praktisch ohne Zeitverzögerung erfolgt.

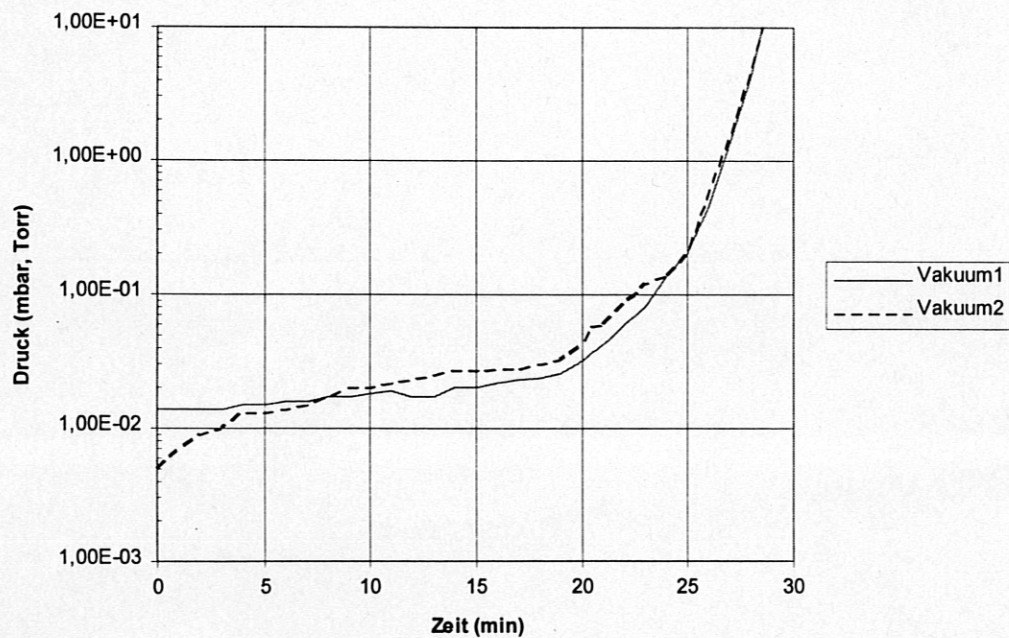


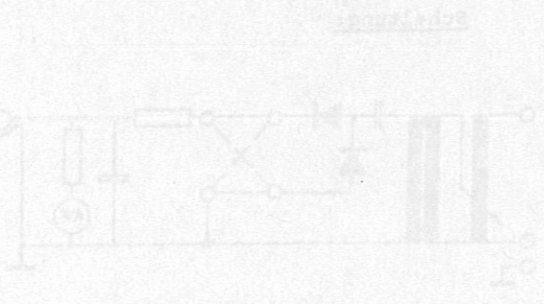
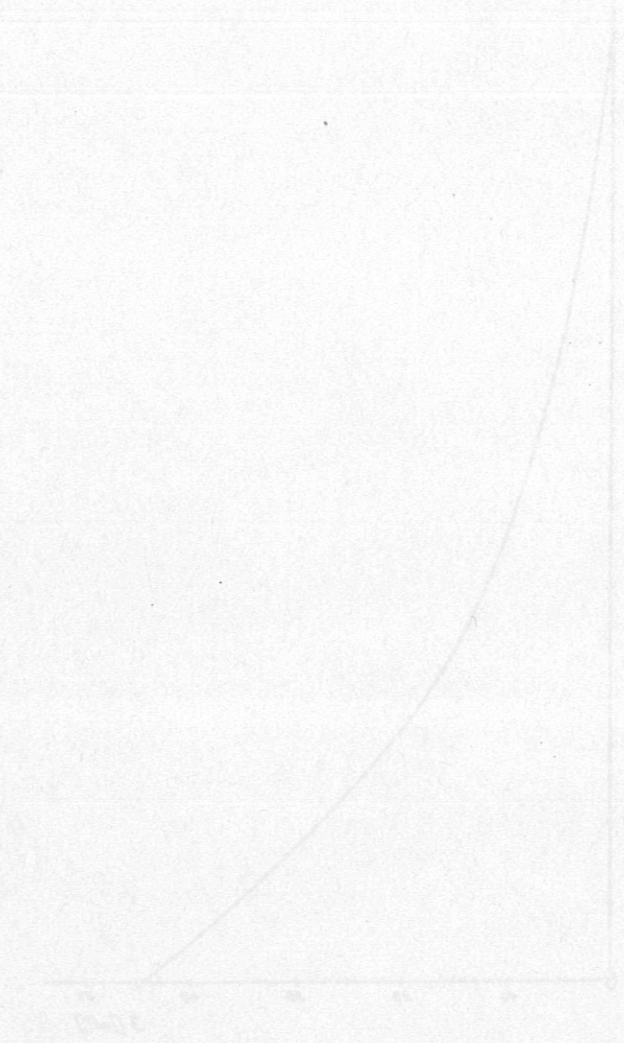
Abb. 13: Vakua vor (Vakuum2) und hinter (Vakuum1) dem Filter beim Fluten

6 Danksagung

Der Autor fühlt sich Herrn R. Scherzer von den ZTE für seine engagierte Mithilfe bei der Vorbereitung und Durchführung aller - auch der hier nicht beschriebenen - Experimente zu großem Dank verpflichtet. Danken möchte er auch Herrn R. Singer und seinen Mitarbeitern von der E2 - Werkstätte, insbesondere Herrn N. Dekorsy, für die umsichtige Herstellung der Prüflinge sowie die Vorbereitung der Versuche. Dank gebührt weiters auch den Herren J. Ogasa und D. Eichner (beide ZTE) für ihre Unterstützung bei den Hochspannungsexperimenten sowie Herrn E. A. Maier (ZTE) sowohl für wertvolle Diskussionen als auch für die praktische Hilfe v. a. bei der Herstellung der Prüflinge.

7 Anhang

Daten des Hochspannungs-Ladegerätes



Hochspannungs-Ladegerät 60 kV

Beschreibung:

Das Gerät ist in einem 19"-Einschub, Höhe 266 mm, geschirmt und berührungssicher, eingebaut. Es eignet sich zum Aufladen von Kondensatoren.

Gerätedaten:

Anschlußspannung 220 V 50 Hz.

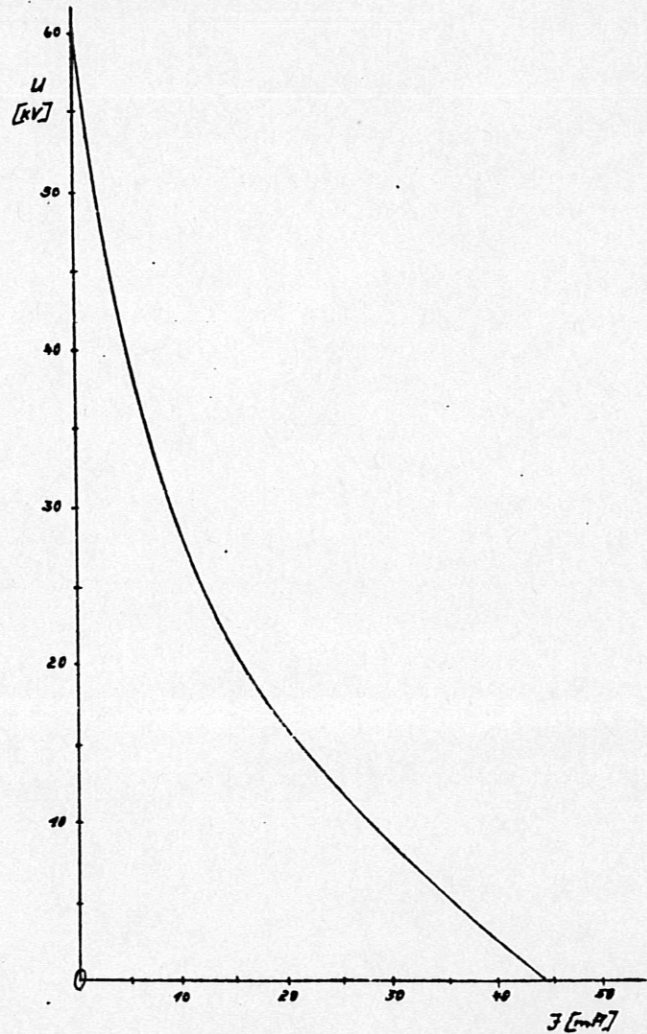
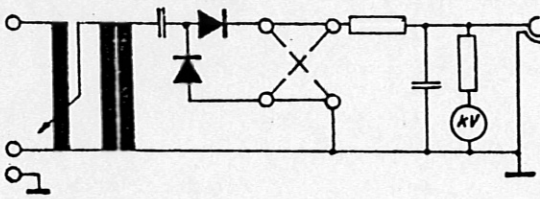
Unsymmetrische Schaltung des Hochspannungsteiles mit Polaritätsumschalter.

Plus- bzw. Minuspol des Hochspannungsausganges ist über Schutzleiter geerdet.

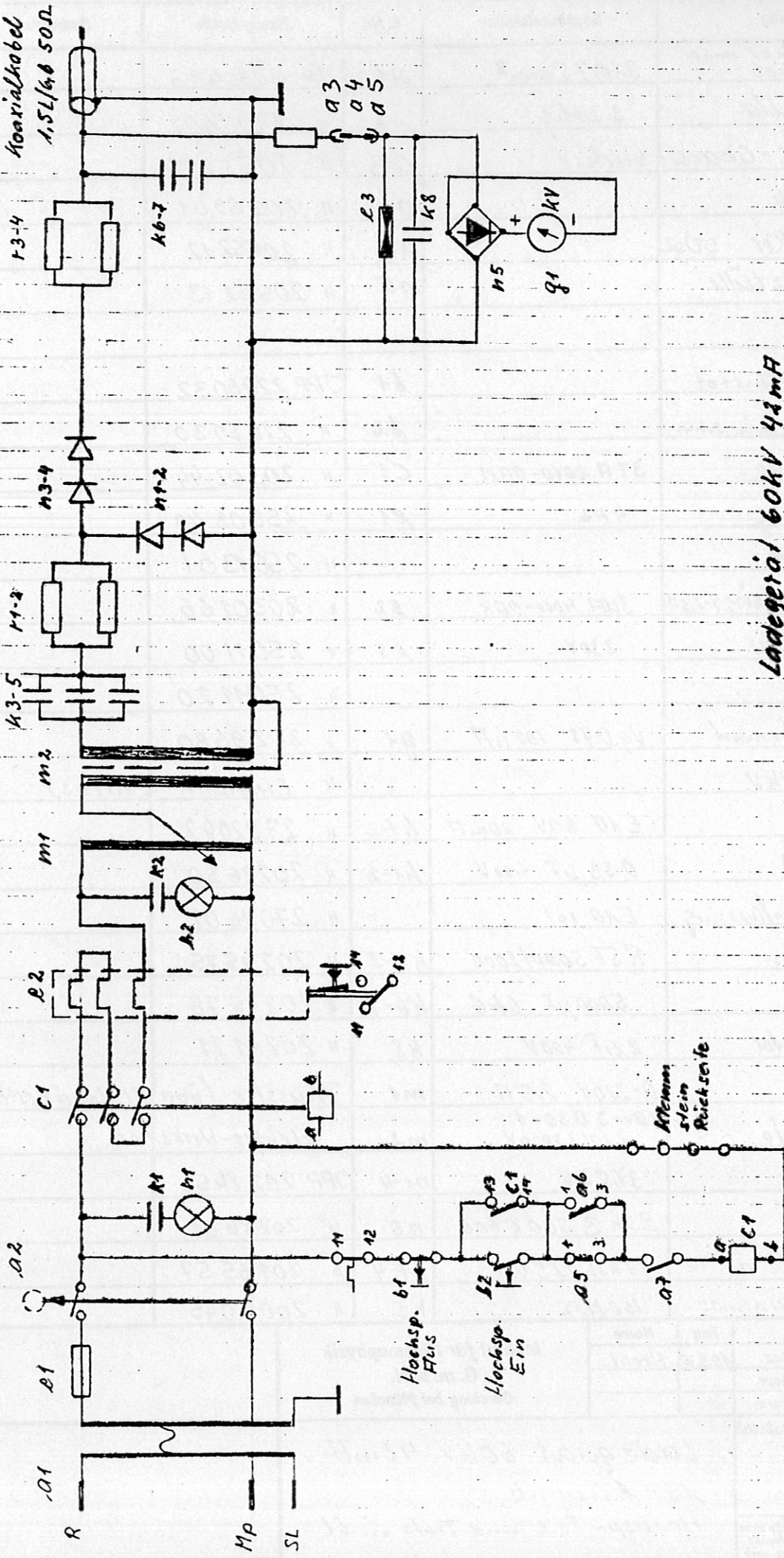
Hochspannung von 0 ÷ 60 kV mit eingebautem Regeltransformator einstellbar ($U_0 = 62 \text{ kV}$; $\bar{\alpha}_k = 45 \text{ mA}$)

Überlastschutz durch Bimetall (Einstellwert 2 A, ohne Selbstsperrung).

Schaltung:



Konaxialkabel
ASL/40 50Ω



Ladegerät 60kV 42mA

19" Einrohr Hochsp.-Teil und Tiefo in Öl

Änderungen 10.5.78 Hald

Typ B

| Stck: | Benennung | Sachbezeichnung | L. Nr. | Bezugsquelle | Bemerkung |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | Schnkosstecker mit 2m Kabel | 320,75mm ² | a1 | JPP 2030493 | |
| 1 | Schließerschalter | 2. polig | a2 | " 220 5404 | |
| 1 | Isolierte BNC-Chassisbuchse | | a3 | " 2055917 | |
| 1 | Winkelstück | | a4 | " 2055901 | |
| 1 | Kabelstecker 50Ω | | a5 | " 2055212 | |
| 1 | Knickschutztülle | | a5 | " 2055213 | |
| 1 | Drucktaster Hustot | | b1 | JPP 2206032 | |
| 1 | " Ein schw. | | b2 | " 2206030 | |
| 1 | Luftschütz HS | 3TH 2010-0AM | c1 | " 2030244 | |
| 1 | Fernsicherung | 4A4. | e1 | " 2500849 | |
| 1 | Sich. Element | | | " 2501301 | |
| 1 | Bimetall-Relais 1,7-2,5A | 3UM 4000-0AK | e2 | " 2030166 | |
| 1 | Übersp.-Ableiter | 230V | e3 | " 2501100 | |
| 1 | Fassung | | | " 2501120 | |
| 1 | Drehpotentiometer | VqD72 100 uF | g1 | " 2029680 | |
| 1 | Skala 0-60kV | | | " Elektronik (Krebs) | |
| 2 | Glimmlampen | E10 60V 20mA | h1-2 | " 2702042 | |
| 2 | Kond. MKH. | 0,33 uF 400V | k1-2 | " 2022630 | |
| 2 | Signallampenfassung | E10 10t | | " 2702401 | |
| 3 | Kondensatoren | R5F 5000/2000 | k3-5 | " 2024575 | |
| 2 | " | 5000pF 66E | k6-7 | " 2024578 | |
| 1 | MP Kondensator | 2 uF 400V | k8 | " 2024121 | |
| 1 | Regeltrafo | 0-220V 2,5A | m1 | Preussler (über El-Lagerbestell.) | |
| 1 | Hochsp.-Trafo | 48V-3030-1 220/23000V | m2 | Elektro-Werkstatt | |
| 4 | Sil.-Dioden | 37,5kV | n1-4 | JPP 2028456 | |
| 1 | Sil.-Brücke | BSK 3 500 C600 | n5 | " 2028601 | |
| 11 | Glin. Widerstände | 47kΩ 125W | 1-4 | " 2016557 | |
| 6 | Hochspann.-Widerstände | 100MΩ | 1-5 | " 2009045 | |

| Passung | Abmaß | Tag | Name | Institut für Plasmaphysik G. m. b. H. Garching bei München |
|-------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|
| | | Gez. 10.5.78 | Hecht | |
| | | Gepr. | | |
| | | Norm. | | |
| | | Maßstab | | |
| Stückl. Nr. | | Maße ohne Toleranzang. nach | | |
| Stückl. best. aus | Blatt | Ladegerät 60kV 42mA 19" Einsteckb Hochsp.-Teil und Trafo in Öl Typ B | | Ersatz für Frontbl. durch |