

**P. Wiesendanger  
und  
W. Zaengl**

**DAS NEUE  
HOCHSPANNUNGLABORATORIUM  
DER ETH ZÜRICH**

**Zürich  
1975**

## VORWORT

Es sind nun zwei Jahre vergangen, seitdem das "Laboratorium für Hochspannungstechnik" die neuen Büro- und Laborräume im "Laborgebäude Elektrotechnik" der ETH Zürich beziehen konnte. Dieses neue Laborgebäude beherbergt auch ein mittelgrosses Hochspannungslaboratorium, das mit dieser kleinen Broschüre etwas ausführlicher beschrieben werden soll.

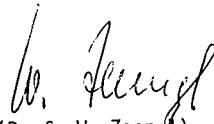
Diese Ausarbeitung verfolgt den Zweck, die für die Dimensionierung und technische Ausrüstung erarbeiteten Grundgedanken darzulegen, die vorhandenen technischen Möglichkeiten aufzuzeigen, und über die ersten mit dem Neubau gewonnenen Erfahrungen zu berichten.

Die Broschüre wird somit für all jene willkommen sein, die sich mit der Planung und Erstellung neuer Laboratorien zu befassen haben.

Eine Kurzfassung dieses Berichtes erschien kürzlich im Bulletin SEV/VSE (Bd.16, 1975, Nr.14, S. 737-745). Die vorliegende erweiterte Fassung konnte in Zusammenarbeit mit dem technischen Dienst der ETHZ und der EDMZ herausgegeben werden.

Mein herzlicher Dank gilt Hrn. P. Wiesendanger, der während des gesamten Neubaus den Grossteil der Arbeiten im Zusammenhang mit der Planung, der Ausrüstung, den technischen Details und den Bestellungen der Einrichtungen erledigte.

Zürich, im Oktober 1975

  
(Prof. W. Zaengl)

## Inhalt

1. Das neue Laborgebäude der Abteilung Elektrotechnik	2
2. Das Hochspannungslaboratorium	2
2.1 Isolationsbemessung und Spannungsausnützung	4
2.2 Das Prinzip der Flexibilität	4
2.3 Abschirmung und Erdung	8
2.4 Zuschauergalerie, Akustik	10
2.5 Beleuchtung, Lüftung, Transport	11
3. Energieversorgung	12
3.1 Uebersicht	12
3.2 Die Stelltransformatoren	12
3.3 Die Umformergruppe	16
3.4 Allgemeine Versorgung	19
4. Wechselspannungs-Erzeugung und -Messung	19
5. Stossspannungs-Erzeugung und -Messung	21
6. Gleichspannungs-Erzeugung und -Messung	22
6.1 Möglichkeiten der Gleichspannungs-Erzeugung	22
6.2 Ausrüstung des Labors	23
7. Sicherheitssystem	25
8. Büroräume und Kleinlabors	25
9. Schlussbemerkungen	25
Literatur	26

## 1. DAS NEUE LABORGEBAUDE DER ABTEILUNG ELEKTROTECHNIK

Die stürmische Entwicklung der elektrotechnischen Disziplinen, die vor allem nach dem zweiten Weltkrieg einsetzte, erforderte von allen Technischen Hochschulen einen Ausbau der Lehr- und Forschungseinrichtungen. An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich - ETHZ - wurde diesen Anforderungen zunächst durch die Errichtung eines Gebäudes für die "Fernmelde- und Hochfrequenztechnik" im Jahre 1950 Rechnung getragen, welches sich als mehrgeschossiger U-Trakt an das kurz vor der Jahrhundertwende errichtete Physikgebäude anschliesst. Nachdem Ende der fünfziger Jahre der Schweizerische Schulrat den Beschluss gefasst hatte, alle physikalischen Forschungsstätten auf den Hönggerberg zu verlegen, war die Möglichkeit gegeben, die ganze Abteilung für Elektrotechnik innerhalb eines in sich geschlossenen Areals nord-östlich der Sternwartstrasse unterzubringen. (Fig.1).

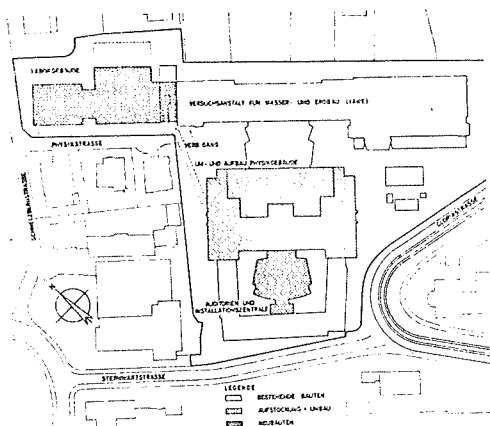


Fig.1: Situationsplan der Ausbauplanung der Abt. für Elektrotechnik: Neues Laborgebäude, Neubau Physikgebäude, Auditorien und Installationszentrale.

Dass das Physikgebäude auf lange Sicht nicht mehr den Anforderungen effizienter Arbeitsstätten genügen kann, wurde ebenfalls frühzeitig erkannt. So wurde beschlossen, das Physikgebäude im Rahmen des Gesamtausbaues der ETHZ /1/1) zu gegebener Zeit durch einen auf die Bedürfnisse der Abteilung für Elektrotechnik zugeschnittenen Neubau zu ersetzen. Diesem beabsichtigten Neubau musste die Errichtung

1) siehe Literatur am Schluss des Berichtes

eines Laborgebäudes vorausgehen, in dem vor allem Institute mit grösseren Laboreinrichtungen untergebracht werden konnten. Dieses "Laborgebäude Elektrotechnik", welches an der Physikstrasse liegt, wurde in einer nur etwa dreijährigen Bauzeit fertiggestellt und zu Beginn des Sommersemesters 1973 den Benützern überlassen. (Fig.2). Der neugeschossige Bau, über dessen architektonische Gesichtspunkte an anderer Stelle berichtet wurde /2/, beherbergt das "Institut für Automatik und industrielle Elektronik", das "Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft", das "Institut für elektrische Maschinen" und einen Teil des "Laboratoriums für Hochspannungstechnik". Dieser Teil stellt also zur Zeit eine Erweiterung der Einrichtungen im Physikgebäude - darunter das im Jahre 1932 gebaute Hochspannungslabor mit ca. 2300 m<sup>3</sup> Volumen - dar. Ein neues Hochspannungslaboratorium bildet den Kern dieser Erweiterung. Seine Inbetriebnahme konnte ab September 1973 erfolgen. Schon im Wintersemester 1973/74 gelangten die ersten Studien- und Diplomarbeiten in diesem Neubau zur Ausführung. Da in der Zwischenzeit alle Inbetriebsetzungsarbeiten abgeschlossen sind, ist es angebracht, über die Leit-Ideen, die den technischen Einrichtungen zugrunde lagen, über die Einrichtungen des neuen Labors und über die ersten Betriebserfahrungen zu berichten.

## 2. DAS HOCHSPANNUNGLABORATORIUM

Industrielle Hochspannungslaboratorien werden in der Regel so dimensioniert, dass die durch internationale Normen festgelegten Spannungsprüfungen von Geräten, die in den elektrischen Energieübertragungssystemen Verwendung finden, ausgeführt werden können. Die entsprechenden Anforderungen an die technischen Einrichtungen des Labors, an die Grösse und Leistungsfähigkeit der Spannungsquellen, an die Abmessungen und Gestaltung des Raumes, an die Transportmöglichkeiten usf. bestimmen die Planung (siehe z.B. /3/).

Zweifellos kann sich heute eine Technische Hochschule an jenen Forschungsaufgaben nicht mehr unmittelbar beteiligen, die auf dem Gebiet der höchsten und ultrahohen Spannungen liegen, wie diese mit der Einführung von 750-kV - und der Projektierung von 1200-kV-Uebertragungssystemen aktuell wurden. Der dazu erforderliche enorme technische, finanzielle und personelle Aufwand ist bekannt und kann heute nur mehr von wenigen



Fig.2: Frontansicht des neuen Laborgebäudes Elektrotechnik der ETHZ

Ländern aufgebracht werden /4 bis 6/. Höchstspannungslaboratorien dieser Art liessen innerhalb kurzer Zeit sehr grosse Laboratorien an Universitäten /7 bis 10/ recht klein erscheinen. Da ohnehin die Forschungsaufgaben begrenzt werden müssen, besteht die Notwendigkeit, mit relativ bescheidenen Mitteln Hochschullaboratorien einzurichten, welche sowohl für die Lehre als auch für ein breites Forschungsgebiet ihre Aufgaben erfüllen können. Dafür sind aber auch mittelgrosse Laboratorien geeignet.

Im vorliegenden Fall war die Laborgrösse von Anfang an durch die Hanglage des Geländes, die beschränkte Grundfläche für das Gesamtgebäude und die bestehenden baurechtlichen Vorschriften stark eingeengt. Einen Eindruck davon erhält man bei

der Betrachtung der Fig. 3, welche eine Uebersicht gibt über die Betonierarbeiten am Hochspannungslaboratorium während der Bauphase. Aus Fig. 4 kann die Eingliederung des Hochspannungslaboratoriums in das Laborgebäude Elektrotechnik entnommen werden. Die volle Höhe von 9,3 m ist auf einer Grundfläche von 21 x 22 m ausnützlichbar, eine restliche Fläche von 21 x 9 m bleibt im wesentlichen einer Zuschauergalerie, welche kleinere Arbeitsplätze und die Energieverteilung überdacht, vorbehalten. Um bei der vorgegebenen bescheidenen Raumgrösse optimale Anwendungsmöglichkeiten zu gewährleisten, wurden folgende Leitideen entwickelt:

- a) Eine optimale Isolationsbemessung soll eine spannungsmässig gute Ausnützung des Raumes gewährleisten.
- b) Eine grösstmögliche Flexibilität der Einrichtung soll trotz der beschränkten Grundfläche

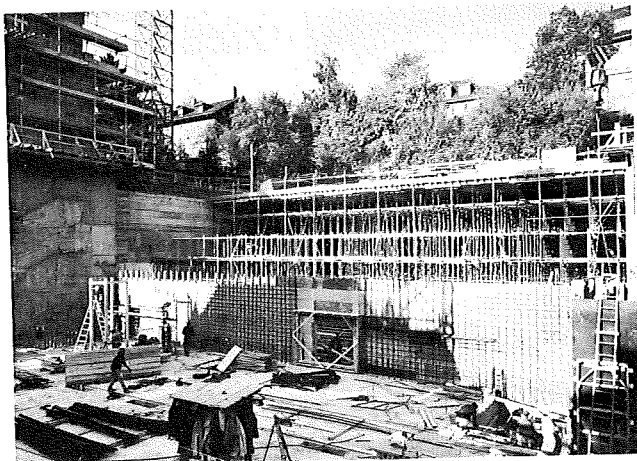


Fig.3: Betonierarbeiten am Hochspannungslabor

- die verschiedenartigsten Versuchsaufbauten gestatten und auch in fernerer Zukunft eine einfache Anpassung an neue Bedürfnisse ermöglichen. Insbesondere müssen Anzahl und Fläche der Arbeitsplätze leicht verändert werden können.
- c) Eine elektromagnetische Abschirmung soll nicht nur einen störungsfreien Betrieb elektronischer Geräte im restlichen Laborgebäude ermöglichen, sondern auch allen Erfordernissen von hochempfindlichen Teilentladungsmessungen im Hochspannungslabor selbst gerecht werden.
  - d) Die Transportmöglichkeiten zu dem unter Strassen-niveau liegenden Labor müssen allen zu erwartenden Anforderungen genügen.
  - e) Um alle Studenten der Elektrotechnik mit fundamentalen hochspannungstechnischen Phänomenen vertraut machen zu können, soll eine ausreichend bemessene Zuschauergalerie die Durchführung von Experimentalvorlesungen ermöglichen.

Fig.5 vermittelt einen Eindruck von der Grösse und von einigen technischen Ausrüstungen des Laboratoriums. Zur Erläuterung sind in den folgenden Abschnitten einige Punkte etwas ausführlicher behandelt.

### 2.1. Isolationsbemessung und Spannungsausnützung

Eine gute Spannungsausnützung wird in einem Innenraumlabor dann erzielt, wenn die maximalen elektrischen Feldstärken sowohl an den hochspannungsführenden als auch an den geerdeten Teilen genügend klein gehalten werden. Man erreicht dies vorwiegend durch eine richtige Dimensionierung aller Elektroden an den Spannungserzeugern /11/ und eine zweckmässige

Gestaltung der Laborwände. Es wäre freilich falsch, dabei Extremwerte anzustreben, da die Forderung nach geringen Maximalfeldstärken auch für den gesamten Versuchsaufbau gilt, der dann aber nur mit grossem Aufwand herstellbar wäre. Bei einer Kaskadenschaltung der vorhandenen Prüftransformatoren kann eine effektive Wechselspannung von 800 kV erzeugt werden, was bei einem Deckenabstand von 3,5 m einer spezifischen Isolierdistanz von 4,4 m/MV<sub>eff</sub> entspricht. Beim 5,3 m hohen Stossgenerator, der eine maximale Blitzstossspannung von 1,45 MV abgibt und mit einer Schaltstossspannung bis zu 1,2 MV betrieben werden kann, betragen die entsprechenden spezifischen Isolierabstände 2,76 m/MV, bzw. 3,33 m/MV. Hier wurde auf eine grossflächige Elektrode verzichtet und vom Hersteller verlangt, die Bauhöhe des Generators so klein wie technisch möglich zu machen.

### 2.2. Das Prinzip der Flexibilität

Ein besonderer Schwerpunkt bei der Durchführung des Projektes lag bei der konsequenten Realisierung einer grösstmöglichen Flexibilität. Das übliche Anordnungsprinzip mit fest zugeordneten Standplätzen für die Hochspannungsgeräte und einem festen Mess- und Steuerraum wurde deshalb aufgegeben. Jede Versuchsanlage, an beliebiger Stelle des Labors aufgebaut, kann mit den notwendigen Steuer- und Messfunktionen ausgerüstet werden. Dadurch wird es möglich, die Grösse des Prüfplatzes dem Spannungsniveau der Versuche anzupassen; es können also gleichzeitig z.B. zwei Versuche mit den höchsten vorhandenen Spannungsniveaus, bei anders liegenden





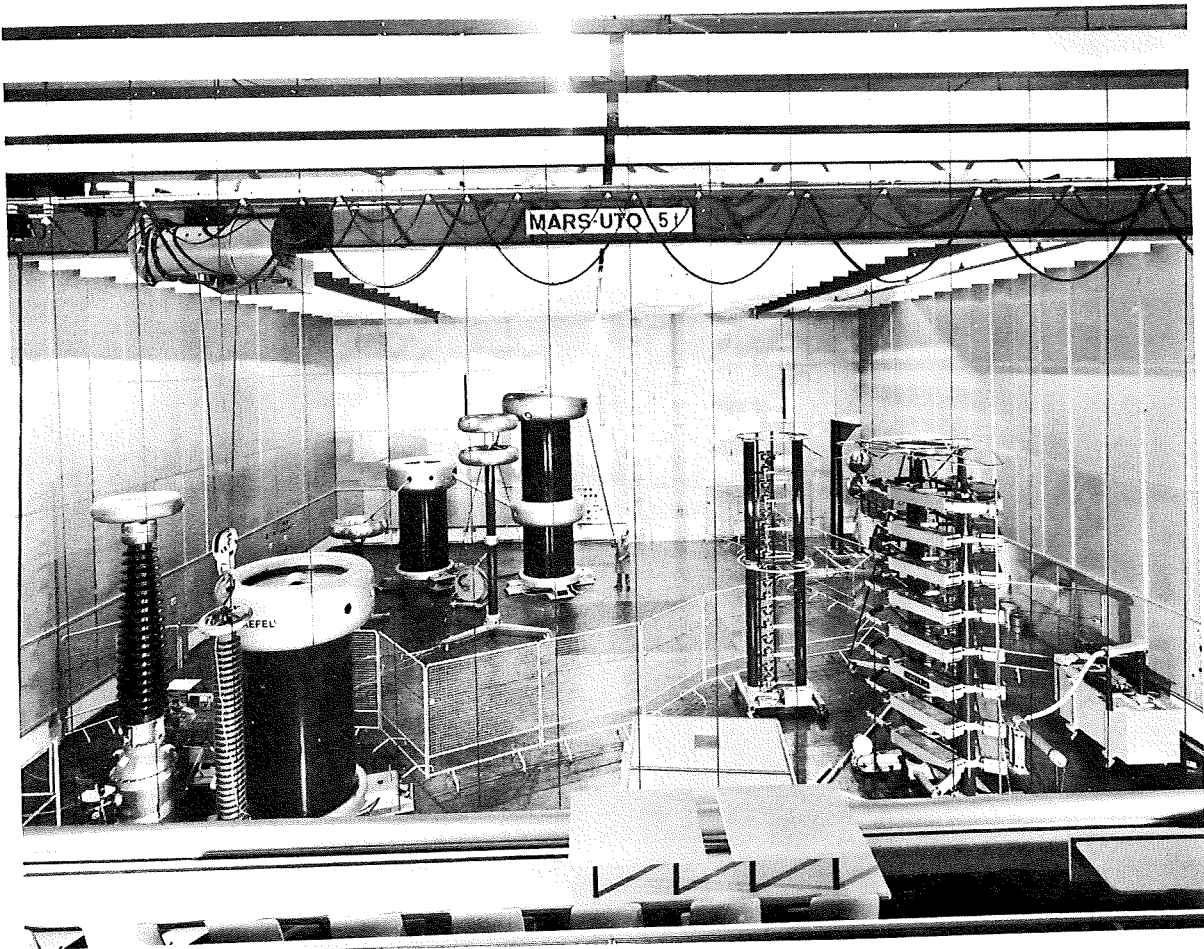


Fig.5: Das neue Hochspannungslaboratorium, von der Zuschauergalerie her gesehen.

Bedürfnissen aber auch eine grössere Anzahl von Versuchen bei kleineren Spannungen durchgeführt werden. Um dies zu realisieren, wurden folgende Massnahmen ergriffen:

- a) Die Prüftransformatoren und der Stossgenerator sind mit einer speziellen Tragkonstruktion zur schnellen Montage von Luftkissen versehen (Fig.6). Damit können die etwa 10 t schweren Geräte mit geringem Kraftaufwand frei im Labor verschoben werden. Die für den Betrieb der Luftkissen notwendige Druckluft wird über einen Druckschlauch dem normalen Druckluft-Leitungssystem des Hauses entnommen, das von zwei Kompressoren mit einer Leistung von je 20 PS gespeisen wird. Ausführungen über Funktionsweise, optimale Auswahl und Einsatz der Luftkissenelemente finden sich in der Literatur /12/. Die leichteren Geräte, wie Spannungsteiler, Funken-
- Strecken, Labortische etc. sind ausnahmslos auf Rädern frei beweglich. Auch die zur Abschrankung der Prüfplätze verwendeten Gitterelemente (siehe Fig.5) sind so gestaltet, dass sie sehr leicht gestapelt und verschoben werden können.
- b) Die Abgänge der regulierbaren Niederspannungsquellen sind auf Anschlussstableaux geführt, welche an den Seitenwänden des Labors verteilt sind (Fig.7). Daran können die Hochspannungsquellen über flexible Kabel mit neuentwickelten verriegelbaren 1000-A-Steckern angeschlossen werden. So wird die Platzwahl für die Hochspannungserzeuger kaum eingeschränkt. Die erwähnten Tableaux enthalten auch 22-polige Stecker, an die die Schaltplatte zur Fernsteuerung der Umformergruppe und der Reguliertransformatoren angeschlossen werden können. Diese Steuerplatte



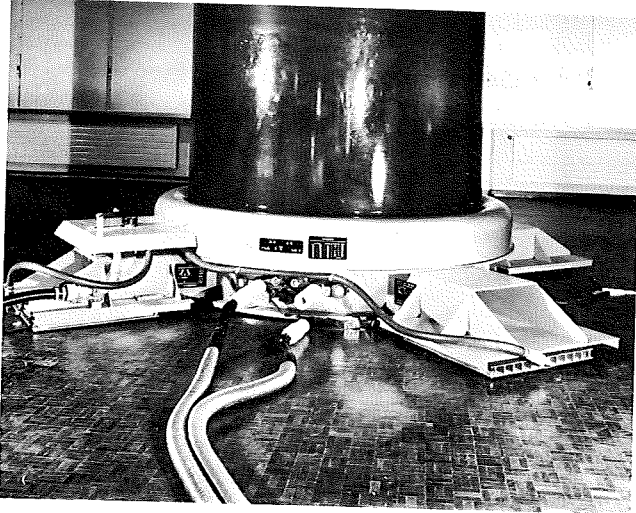


Fig.6: Fuss eines Prüftransformators mit Luftkissentragkonstruktion und 1000-A-Anschlussstecker

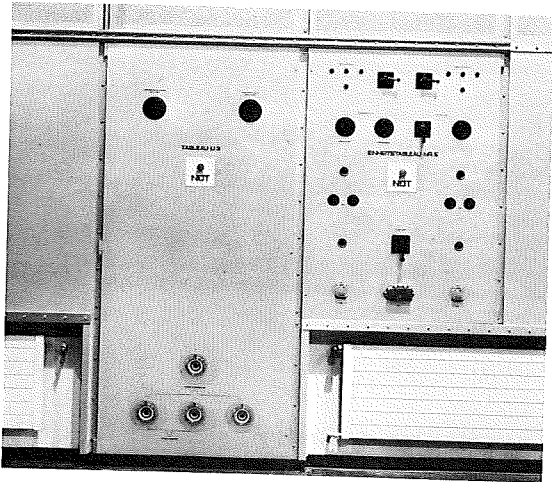


Fig.7: Anschlussableaux an den Wänden des Hochspannungslabors

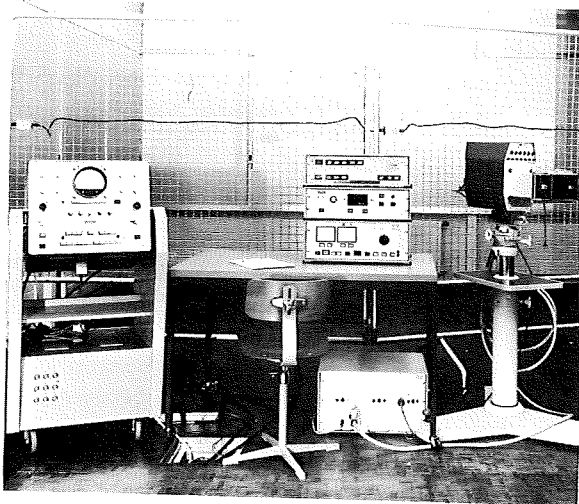


Fig.8: Arbeitsplatz im Hochspannungslabor mit Steuer- und Messgeräten

sind in Anlehnung an die heute übliche Technik, ebenso wie die Messgeräte, in einer einheitlichen 19"-Einschubtechnik aufgebaut. Somit lassen sich sehr einfach für jeden Versuch die notwendigen Steuer- und Messelemente kombinieren. Fig.8 zeigt beispielsweise einen Arbeitsplatz für Gasdurchschlags-Untersuchungen mit einem Kathodenstrahloszillographen, einem Fernsteuerpult, einer digitalen Scheitelwertmesseinheit, einer kombinierten Kugelfunckenstrecken- und Laborbeleuchtungssteuerung sowie einer Bildwandlerkamera zur fotografischen Aufnahme von Vorgängen, die sich im Nanosekundenbereich abspielen.

- c) Unter dem Laborboden ist schachbrettartig ein Netz von Stahlrohren verlegt. Darin lassen sich den Bedürfnissen entsprechend die Mess- und Steuerkabel einziehen. So sind sie einerseits gegen Beschädigung geschützt und andererseits den die Messung störend beeinflussenden elektromagnetischen Feldern entzogen /13/. An den Kreuzungspunkten der Rohre sind Anschlusskasten in den Boden eingelassen. Ein solcher Boden-Anschlusskasten ist in Fig.8 auf der rechten Seite des Kathodenstrahloszillographen zu erkennen.
- d) Auf Seiten der Hochspannungsquellen wurde ein - wie später noch zu zeigen sein wird - möglichst variantenreiches System angestrebt-

### 2.3. Abschirmung der Erdung

Zwei wesentliche Faktoren erforderten eine Abschirmung des Hochspannungslaboratoriums gegen elektromagnetische Felder und leitungsgebundene Störungen:

- a) Im gleichen Gebäude befinden sich Institute, die mit hochempfindlichen elektronischen Geräten, z.B. Prozessrechnern, arbeiten. Diese Geräte müssen gegen alle durch Hochspannungsversuche erzeugten Störungen geschützt werden. Ein ähnliches Problem stellt sich innerhalb des Hochspannungslabors, wenn empfindliche, in Halbleitertechnik ausgeführte elektronische Messgeräte von den bei Durchschlagsuntersuchungen entstehenden grossen elektromagnetischen Feldänderungen abgeschirmt werden müssen /14/.

- b) Die Durchführung der auch in Zukunft nicht mehr wegzudenkenden Teilentladungsmessungen an Hochspannungs-Prüfobjekten /15/ ist nur möglich, wenn die Prüf- und Messanordnung gegen die im interessierenden Frequenzbereich einfallenden Radiowellen oder sonstigen elektromagnetischen Störungen, die insbesondere auch von der Netzeinspeisung her wirken können, abgeschirmt wird.

Vollkommene Lösungen für die Abschirmung des Hochspannungslabors, wie sie anderenorts öfters realisiert wurden /16/, waren mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln nicht ausführbar. Es ging deshalb darum, unter Ausnützung der baulichen Gegebenheiten und unter Zuhilfenahme der bekannten Unterlagen für Dämpfungsberechnungen /17, 18/ in Zusammenarbeit mit dem Architektur- und Ingenieurbüro sowie den Bauunternehmungen eine preiswerte Lösung zu finden, die den gestellten Anforderungen gerecht wird. Diese Lösung besteht aus den folgenden Punkten:

- a) Zur Verhinderung eines Austausches von hochfrequenten Störungen zwischen Hochspannungslabor und Umgebung über die elektrischen Energie- und Steuerleitungen werden diese über Tiefpassfilter mit einem Dämpfungsverhalten gemäss Fig. 12 geführt. Diese Tiefpassfilter sind in Metallschränken direkt unterhalb des Laborbodens angebracht (Fig.9).
- b) Für die Laborwandverkleidung wurden eloxierte Aluminiumbleche verwendet, welche gleichzeitig als Abschirmelemente dienen. Die Verbindung der sich gegenseitig überlappenden Elemente erfolgte durch Verschraubung, wobei zuvor verschiedenartige Schraubverbindungen in Dauerversuchen auf ihre Leitfähigkeit getestet wurden. Der Uebergangswiderstand der angewendeten Schraubverbindung blieb - auch nachdem das entsprechende Muster 1 Jahr extremen Wetterbedingungen ausgesetzt wurde - unter  $0,3 \text{ m}\Omega$ .
- c) Wegen der aus statischen Gründen notwendigen grossen Betondicke konnten weder an der Decke noch am Laborboden Bleche zur Abschirmung Verwendung finden. Hier müssen verschweisste Streckmetallgitter aus Eisen (Maschenweite  $3 \times 5 \text{ mm}$ ) neben dem Betoneisen für die Abschirmwirkung sorgen (Fig. 10, 11).

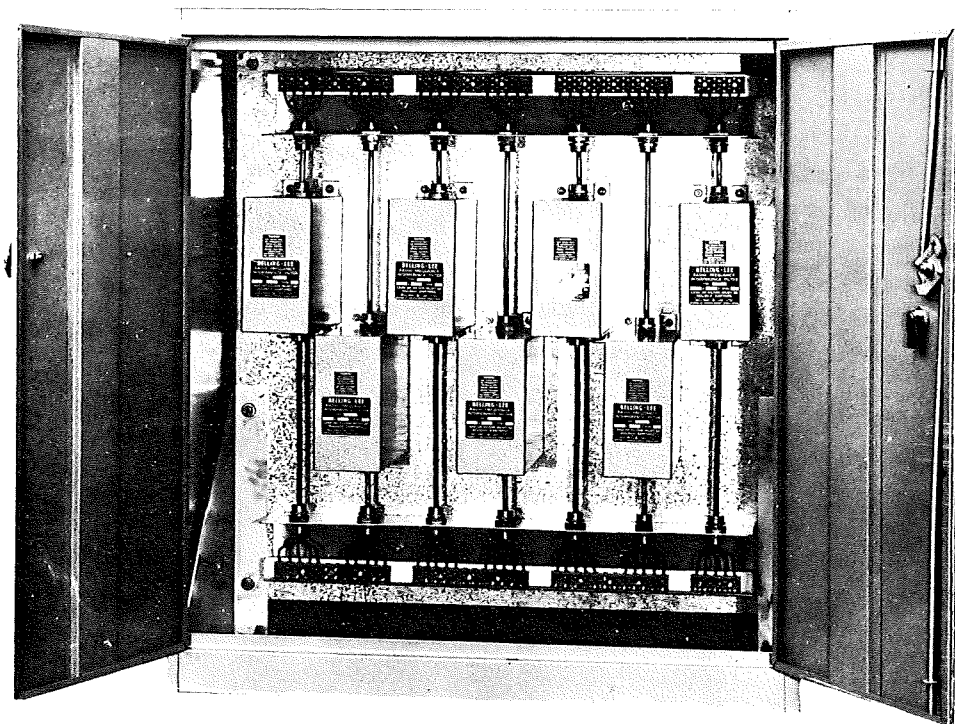


Fig.9: Schrank mit Tiefpassfilter für hohe Ströme (Werkbild Beiling & Lee Limited, Enfield, England)

d) Elektromagnetisch absolut "dichte" Türkonstruktionen konnten aus Kostengründen ebenfalls nicht realisiert werden. Deshalb werden einfachere, doppelwandige Metalltüren verwendet, bei denen lange Fugen durch geeignete Ueberlappungen vermieden und häufige Kontaktstellen durch einfache Messing-Kontaktleisten zwischen Rahmen und den Türelementen erzielt werden.

e) Die kritischen Stellen, bei denen die Sanitärleitungen und die Lüftungskanäle die Abschirmung durchstossen, sind so konstruiert, dass die Abschirmwirkung nicht beeinträchtigt wird. Die Messung der durch diese Massnahmen erzielten Abschirmwirkung erfolgte nach den bekannten Methoden /19/:

Mit einem Sender ausserhalb und einem Empfänger innerhalb der Abschirmung wurde in je 2 m Abstand von einem bestimmten Punkt die Dämpfung bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Die Resultate sind in Fig. 12 dargestellt und mit den garantierten Daten handelsüblicher geschirmter Kabinen verglichen. Wie erwartet sind die Türen und Oeffnungen (schliessbare Luke bei der Bodenmessstelle) die

schwächsten Glieder der Abschirmung. Entsprechend der Vorausberechnung tritt die grösste Abschirmwirkung im Arbeitsbereich zwischen 1...10 MHz auf ( $\geq 60$  dB). Die Erfahrungen mit der Abschirmung sind sehr gut; es waren bisher weder Störungen an empfindlichen Geräten in den Nachbarinstituten festzustellen, noch traten im Hochspannungslabor selbst bei Teilentladungsmessungen im üblichen Empfindlichkeitsbereich der Geräte (1 pC bzw. 1  $\mu$ V) Fremdstörungen auf.

Da das ganze Laborgebäude auf felsigem Grund steht, erscheinen die Erdungsverhältnisse zunächst als nicht unproblematisch. Es konnte jedoch ein eindeutiges Bezugspotential geschaffen werden /20/, indem die Armierungseisen in einem quadratischen Raster von ca. 4 m Seitenlänge miteinander verschweisst wurden. So bildet der gesamte Bau einen groben Faraday-Käfig, der als gesamte Einheit mit dem Wasserleitungsnetz verbunden wurde. In diesen Raster ist die Abschirmung des Hochspannungslabors eingebettet, welche ihrerseits das Bezugspotential für alle Messanordnungen im Labor bildet. Auch der Nullpunkt der Netzeinspeisung ist mit dieser als "Erdung" wirkenden

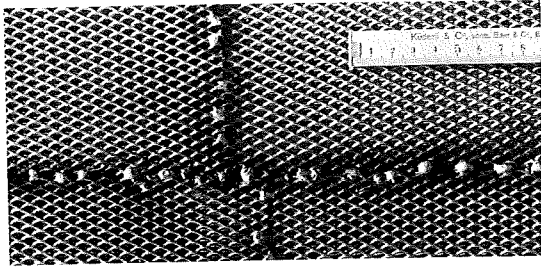


Fig.10: Abschirmung des Hochspannungslabors mittels verschweissten Streckmetall-Gittern

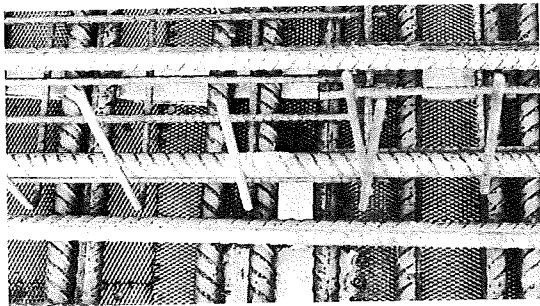


Fig.11: Skelett der Labordecke mit dem Beton-eisen und dem Streckmetall-Abschirmblech vor dem Eingiessen des Betons

Abschirmung verbunden. Da sich bei den Durchschlagsuntersuchungen alle elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge innerhalb der Abschirmung abspielen, dringen praktisch keine Störströme nach aussen, und der "Erdungswiderstand" des abgeschirmten Labors gegenüber der Aussenwelt verliert für die Versuchs- und Messtechnik seine Bedeutung.

#### 2.4. Zuschauergalerie, Akustik

Eine tribünenartige Zuschauergalerie (Fig.13) mit 140 Sitzplätzen ermöglicht die Durchführung von Experimentalvorlesungen und Demonstrationen. Dem selben Zweck dient auch die eingebaute Mikroportanlage mit zwei Lautsprechersäulen an der der Galerie gegenüberliegenden Laborwand, sowie eine von der Decke ausfahrbare Leinwand für Lichtbild- und Filmprojektionen. Damit die Zuschauer den Verlauf der Experimente verfolgen und kontrollieren können, wurde eine Anlage zur Grossanzeige der am Versuch gemessenen Ströme und Spannungen entwickelt /21/. Diese Grossanzeige erfolgt durch Projektion der Analog-Skalen eines Durchsichtinstruments und der

Digitalanzeige eines 3 1/2-Digit-Flüssigkristallementes an die Laborwand. Fig. 14 zeigt das Projektionsbild.

Die bei einem Hochspannungslabor erfahrungsgemäss recht komplizierten akustischen Probleme konnten mit relativ geringem Aufwand befriedigend gelöst werden. Schallschluckende Lamellen an der Decke und Steinwollmatten hinter den gelochten Aluminium-Bleichen (Lochung 10 %, Lochdurchmesser 4 mm) der Laborwandverkleidung sorgen für die bei Durchschlagsuntersuchungen und bei Demonstrationen vorlesungen notwendige Schalldämmung.

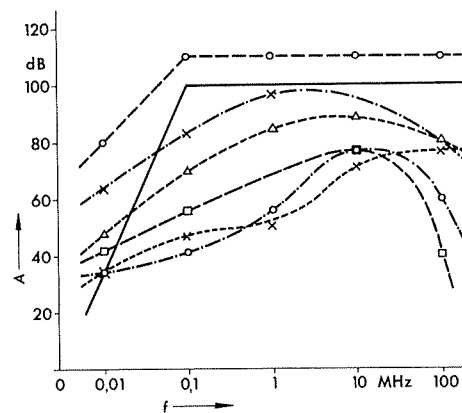


Fig.12: Dämpfungswerte verschiedener Abschirmungen und Filter

- garantierte Charakteristik der verwendeten Filter für die Laboreinspeisung
  - garantierte Dämpfungswerte von handelsüblichen, modular aufgebauten geschirmten Kabinen
  - x- gemessene Dämpfungswerte der Laborwand
  - △- gemessene Dämpfungswerte der Labordecke
  - gemessene Dämpfungswerte der grossen Labortüre
  - x- gemessene Dämpfungswerte der Bodenluke
  - gemessene Dämpfungswerte der Eingangstüre
- A Dämpfung, f Frequenz

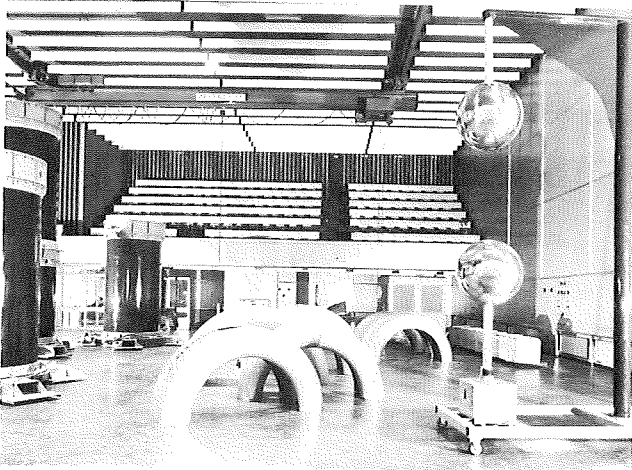


Fig.13: Montage der Prüftransformatoren im fertiggestellten Hochspannungslabor. Blick gegen die Zuschauergalerie.



Fig.14: Projektionsbild der Messwert-Grossanzeige

### 2.5. Beleuchtung, Lüftung, Transport

Für die Hauptbeleuchtung des Labors wurden keine Entladungsröhren verwendet, da deren Helligkeitssteuerung nur über Thyristor-Stellglieder möglich ist. Dadurch würden die Teilentladungsmessungen stark gestört. Die Helligkeit der eingesetzten Halogenlampen lässt sich dagegen sehr einfach mit Hilfe eines Stelltransformators steuern. Aber auch diese Lampen erwiesen sich als nicht ganz problemlos; sehr grosse Erhitzung - bedingt durch die Montage an der Labordecke - führten zu einer viel zu kurzen Lebensdauer. Es musste deshalb eine Spezialkonstruktion entwickelt werden, die

eine möglichst grosse Selbstkühlung der Lampen erlaubt.

Das Hochspannungslabor verfügt über eine eigene einfache Klimaanlage, die für die notwendige Umwälzung und Filterung der Luft sorgt. Als Regelparameter können der Anteil der Frischluftzufuhr im Kreislauf und die Raumtemperatur manuell vorgewählt werden.

Beim Betrieb eines Hochspannungslaboratoriums kommt den Transportwegen besondere Bedeutung zu. Es wurde deshalb darauf geachtet, durch direkten Zugang zum Warenlift, schliessbare Bodenluken und grosszügig dimensionierte Türen möglichst gute Verbindungen sowohl innerhalb des Gebäudes wie gegen aussen zu gewährleisten. Da die Schwertransporte innerhalb des Hochspannungslabors mittels Luftkissen geschehen, konnte die Tragkraft der Deckenkranhahn auf 5 t beschränkt werden. Hingegen ist die Einschienen-Kranbahn für die Auf- und Abladearbeiten an der Aussenseite des Hauptportals auf eine Tragkraft von 10 t dimensioniert. Fig. 15 zeigt einen Einsatz dieser Kranbahn bei der Anlieferung eines der drei 400 kV Prüftransformatoren. Zur Erleichterung der Montagearbeiten an den normalerweise grossräumigen Versuchsaufbauten verfügt das Labor über eine fahrbare, hydraulische Hebebühne, bei der neben den üblichen vertikalen und Rotationsbewegungen auch ein Teil der Plattform seitwärts um 2,5 m ausgefahren werden kann.

### 3. ENERGIEVERSORGUNG

#### 3.1. Uebersicht

In Fig. 16 ist die Energieversorgung der Laboratorien vereinfacht dargestellt. Um die Einspeisung der Institutslabors, zur Reduzierung der gegenseitigen Beeinflussung, soweit wie möglich von derjenigen der anderen Institute zu trennen, erfolgt diese über zwei 600-kVA-Transformatoren unmittelbar aus dem 11-kV-Ring der ETH-Versorgung. Einzig einige spezielle Spannungen können über Wahlleitungen aus der allgemeinen Hausversorgung bezogen werden. Da ein Hochschulinstitut normalerweise eine schnelle Personalrotation aufweist, wurde darauf geachtet, die Versorgung aus Wartungsgründen einfach und übersichtlich anzuordnen. So wurde auch auf eine Hochspannungsversorgung verzichtet und die ganze Verteilung auf 220/380 V; bzw. 290/500 V-Ebene ausgeführt. Die 380 V-Hauptsammelschiene ist durch zwei Sammelschienentrenner unterteilbar, um einerseits Betriebsunterbrüche bei Wartungsarbeiten zu vermeiden und um andererseits durch geeignete Schaltung Laststösse vom Einheitsnetz weitgehend fernzuhalten. Die fernsteuerbaren und -regelbaren Spannungsquellen höherer Leistung für die Speisung der Hochspannungserzeuger - eine Umformergruppe und drei Einphasen-Säulen-Stelltransformatoren verschiedener Leistungen und Nennspannungen - befinden sich im Maschinenraum direkt unter der Hochspannungshalle.

#### 3.2. Die Stelltransformatoren

Für die Beschaffung von drei verschiedenen Stelltransformatoren wurde eine Ausschreibung unter den in Frage kommenden Firmen durchgeführt. Nach dem Studium der eingegangenen Offerten entschied man sich für luftgekühlte Typen. Diese waren zwar grösser und teurer als entsprechende Öltransformatoren, aber es entfielen bauliche Massnahmen für Brandschutz und Ölabscheidung, und zudem sind Reparatur- und Revisionsarbeiten leichter durchzuführen. In Tabelle 1 sind die Nenndaten der drei Stelltransformatoren - alle sind als Einphasen-Säulen-Stelltransformatoren aufgeführt - zusammengestellt.

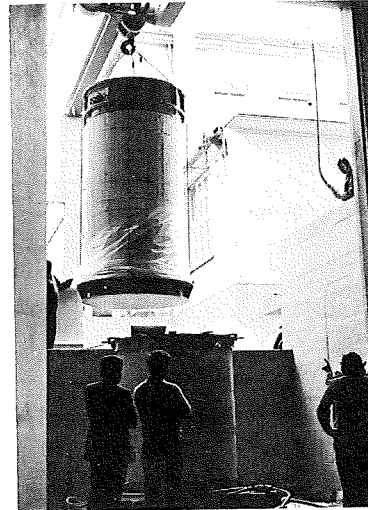


Fig. 15: Montage des 400 kV-Prüftransformators auf einem Isolierzylinder

Eine Einheit besteht aus einem 1:1 Einphasenfesttransformator und einem Autotransformator, sodass die Sekundärseite vom speisenden 220/380 V-Netz galvanisch getrennt ist. Diese Konstruktion bewirkt zudem, dass die Kurzschlussspannung im Gegensatz zu üblichen Auto-Transformatoren nur relativ wenig vom Stellbereich abhängig ist. Der Antrieb der Spannungsverstellung geschieht über einen Gleichstrom-Nebenschlussmotor, dessen Drehrichtung und Drehgeschwindigkeit ferngesteuert werden können. So lässt sich die Verstellzeit für den Durchlauf des ganzen Spannungsbereiches von 0 bis 100 % an den Fernsteuerpulten im Labor kontinuierlich in einem Bereich von 20 bis 150 Sekunden wählen. Fig. 17 zeigt das Schema des bei allen Stelltransformatoren identischen Fernsteuerungs-Prinzips. Die Fernsteuerpulte für die Stelltransformatoren und für die Umformergruppe wurden am Institut entwickelt und in der einheitlichen 19"-Technik aufgebaut. Fig. 18 gibt eine Ansicht dieser Bedienungspulte wieder. Während der Inbetriebsetzung wurden einige Klirrfaktoren der Sekundärspannung des 300 kVA-Stelltransformators unter verschiedenen Betriebsbedingungen gemessen. Im Leerlauf betrug der Klirrfaktor je nach Höhe der eingestellten Spannung zwischen 0,8 % und 1,3 %; nach Anschluss des mit 240 pF kapazitiv belasteten 400 kV-Prüftransformators lagen die entsprechenden Werte zwischen 1,5 % und 5,4 %.

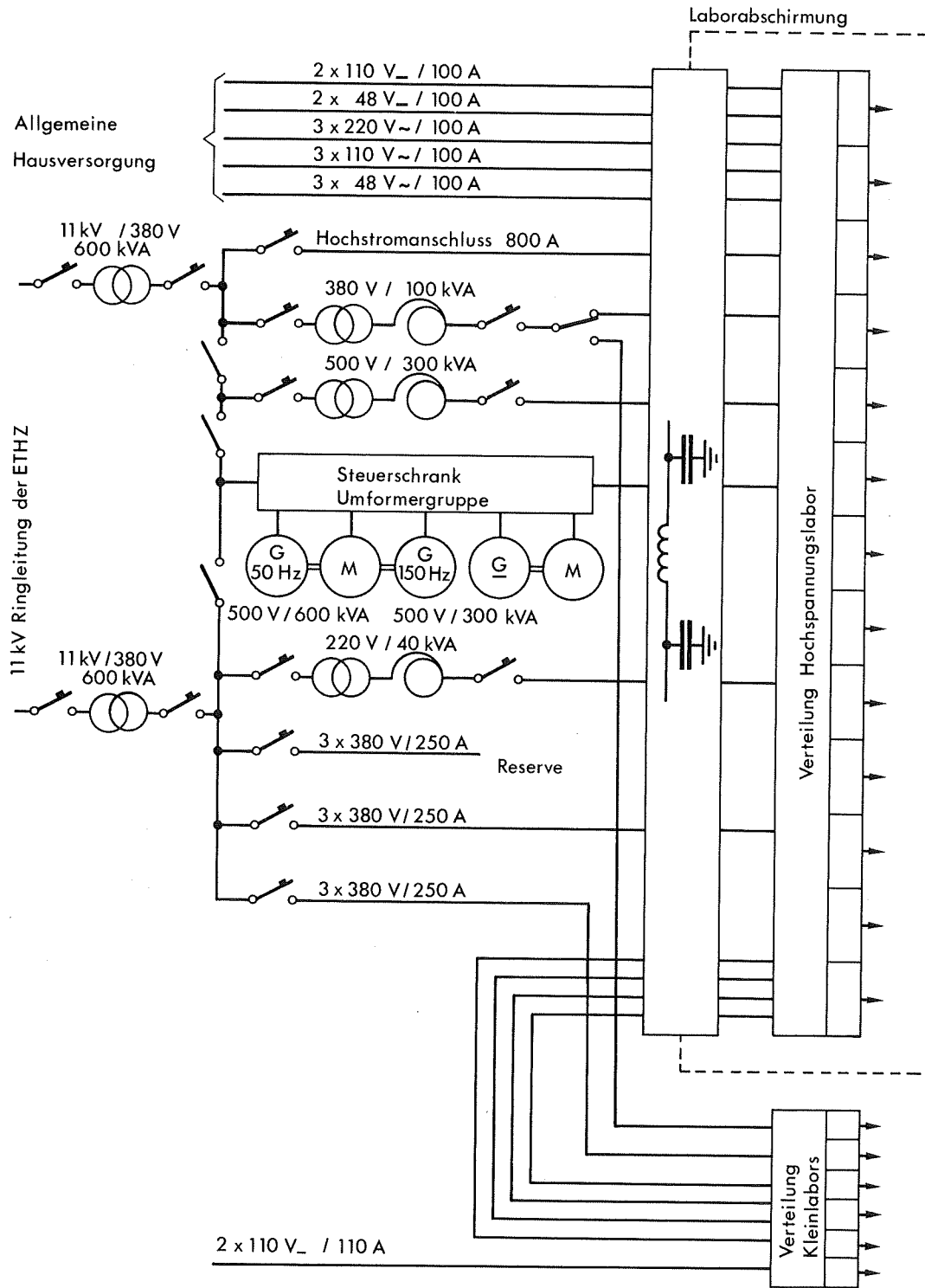


Fig.16: Vereinfachtes Uebersichtsschema der Energieversorgung



(50...ca. 1000 Hz) und einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand von Glättungs- oder Speicherkondensatoren die Welligkeit bei Nennlast im Bereich von 1 bis 5 % liegen wird. Auch die gespeicherte Energie wird immer noch gross sein, und eine sehr schnelle Regelbarkeit ist vor allem wegen der grossen Speicherkondensatoren kaum erzielbar. Ganz bedeutende Fortschritte wurden jedoch in den letzten Jahren durch den Einsatz neuer, vor allem elektronischer Komponenten erreicht.

### 6.2. Ausrüstung des Labors

Der bereits erwähnte Hochspannungsbaukasten bietet für Spannungen bis 200 oder auch 300 kV ausreichende Möglichkeiten, wenn keine besonderen Anforderungen an die Welligkeit oder Konstanz der Spannung gestellt werden. Die aus Si-Gleichrichtern bestehenden Gleichrichterelemente (140 kV Scheitel-Sperrspannung; 5 mA Dauerstrom) erlauben in Verbindung mit dem 100 kV-Prüftransformator und den Gleichspannungs-Kondensator-Elementen (bis 25 nF, 140 kV =) den Aufbau beliebiger Gleichrichterschaltungen; die Grenzleistungsfähigkeit wird beim Bau einer zwei- oder drei-stufigen Greinacher-Vervielfachungsschaltung (Cockroft-Walton-Schaltung) erreicht. Für die Spannungsmessung dienen Widerstands-Bauelemente (140 M $\Omega$ , 140 kV =) aus drahtgewickelten Widerständen, deren Temperaturkonstanz und Spannungsunabhängigkeit bei der Messung des Durchgangstromes eine auf ca. 2 % Genauigkeit begrenzte Spannungsmessung ermöglichen. Die Serienschaltung dieser Widerstands-Bauelemente ermöglicht eine Anpassung an das Spannungsniveau. Für die Erzeugung höherer Gleichspannungen, bei gleichzeitiger Erhöhung der Ansprüche an die Qualität der zur Verfügung stehenden Gleichspannung, musste eine geeignete Anlage beschafft werden. Ueberlegungen bezüglich der zukünftigen Forschungsarbeiten und Untersuchungen zur Festlegung der maximal notwendigen Stromausbeute führten auf Nenndaten von 800 kV Gleichspannung und einen wünschenswerten Dauerstrom von 10 mA. Einerseits kamen Elektrostatistische Generatoren wegen der nicht mehr zu erfüllenden Leistungsanforderung und andererseits konventionelle Greinacherkaskaden wegen der schon erwähnten Punkte und vor allem auch aus Platzgründen nicht in Frage. Eine sehr gute Lösung bot sich durch ein noch wenig bekanntes Schaltungsprinzip

an, das bisher nur in einer Patentschrift eingehend erläutert wurde /31/: Dabei werden viele eisenlose, kleine Transformatoren in Kaskade geschaltet, wobei die entsprechenden Primär- und Sekundärwicklungen über Serienkapazitäten verbunden und mit Parallelkapazitäten versehen sind. Auf diese Art und Weise kompensieren die Serienkapazitäten die Längsstreu-Induktivitäten und die Parallelkapazitäten die Gegeninduktivitäten, sofern die Kapazitäten bei Betriebsfrequenz sorgfältig auf Resonanz abgestimmt werden. An jeder Transformatorstufe lässt sich nun eine etwa gleich grosse Wechselspannung abgreifen, die durch mehrstufige Greinacher-Kaskadenschaltungen gleichgerichtet wird. Eine hohe Gleichspannung lässt sich dann durch die direkte Serienschaltung dieser Gleichrichterschaltungen erzielen.

Eine derartige Schaltung wird nur bei hohen Frequenzen von 50 bis 100 kHz wirtschaftlich arbeiten, da die über die Transformatorenkette zu transportierende Leistung proportional mit der Frequenz ansteigt, und nur dann relativ kleine Kondensatoren zur Erfüllung der Resonanzbedingungen genügen werden. Jede Stufe liefert eine Spannung von 50 kV und ist als Modul vergossen. Diese Module sind in einfacher Art und Weise aufeinandergestapelt und in einem mit SF<sub>6</sub> gefüllten Isolierrohr eingebaut. Im Isolierrohr befindet sich zudem ein Strombegrenzungs- und ein Messwiderstand, der durch eine kapazitive Steuerung auch eine Messung höherfrequenter Vorgänge ermöglicht. Die Einspeisung dieser Schaltung erfolgt durch einen elektronischen Hochfrequenzgenerator, der von diesem Messwiderstand den Spannungs-Istwert erhält und über einen Sollwertgeber gesteuert wird. Fig. 27 zeigt eine nach diesem Prinzip gefertigte Anlage für 1000 kV. Die in Tabelle 3 angeführten Daten der 800 kV/10-mA-Anlage beschreiben ihre Eigenschaften.

Dauerstrom	10 mA
Welligkeit (peak to peak)	< 0,01 %
Spannungskonstanz	0,01 %
Ausregelzeit für Last- und Netzspannungsschwankungen	< 300 $\mu$ s
Gewicht des Hochspannungsteils (ohne Kopfelektrode)	ca. 600 kg
Bauhöhe (ohne Kopfelektrode)	1,7 m

Tab.3: Nenndaten der Gleichspannungsanlage

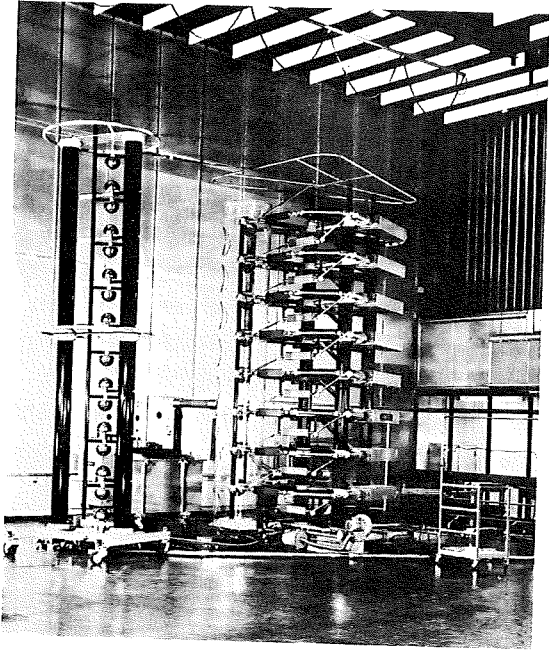


Fig.25: 1.6 MV-Stossgenerator

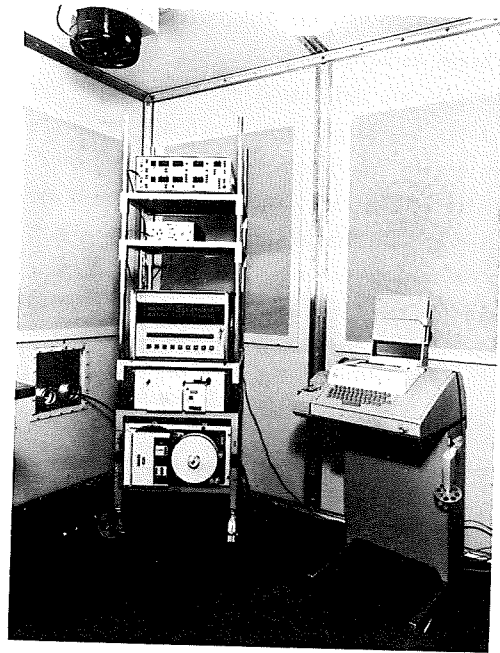


Fig.26: Digitale Datenerfassungsanlage zur On-line-Erfassung und -Auswertung von Stossspannungen

## 6. GLEICHSPANNUNGS-ERZEUGUNG UND -MESSUNG

### 6.1. Möglichkeiten der Gleichspannungs-Erzeugung

Es werden heute verschiedenartige Gleichspannungsquellen für den Laborbetrieb angeboten. Da vergleichende Literatur bezüglich der unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften dieser vielfältigen Erzeugungsprinzipien weitgehend fehlt, sollen in diesem Abschnitt die zu diesem Thema gemachten Überlegungen etwas ausführlicher dargestellt werden.

Gleichspannungsgeneratoren können nicht nur aufgrund ihres Spannungsbereiches und ihrer Stromergiebigkeit gekennzeichnet werden. Der zeitliche Verlauf der unter Last abgegebenen Spannung ist gleichermassen wichtig; dieser kann durch die Spannungswelligkeit sowie durch die Konstanz des Gleichspannungsmittelwertes (auch bei variabler Last) und dessen Regelbarkeit ausgedrückt werden. Für die Verwendung bei Durchschlagsuntersuchungen wird, zur Vermeidung unerwünscht starker Zerstörungen an den zu prüfenden Objekten (Isoliermaterial, Elektroden), die Frage nach der Kurzschlussimpedanz und der vom Generator ständig gespeicherten Energie vordringlich.

Daneben spielen natürlich die ökonomischen Faktoren (Grösse, Gewicht, Preis etc.) eine grosse Rolle. Als Erzeugungsprinzip für hohe, variable Gleichspannungen kommen entweder die Elektrostatischen Generatoren /29/ mit deren wichtigsten Vertretern, dem Bandgenerator von van de Graaf und dem Trommelgenerator, der von N.J. Felici zur technischen Reife entwickelt wurde, oder Gleichrichterschaltung in Betracht. Von einem Bandgenerator wurde 1973 die sicherlich höchste, jemals künstlich erzeugte Gleichspannung von 21 MV abgegeben /30/; mit Trommelgeneratoren lassen sich keine so hohen Spannungen erzielen, sie werden zur Zeit mit Spannungen bis zu 750 kV industriell gefertigt. Den Vorteilen dieser Elektrostatischen Generatoren (sehr kleine Welligkeit, beste Konstanz der Spannung bei entsprechender Regelung, kleiner Energieinhalt) stehen nicht zu vernachlässigende Nachteile (kleine Stromergiebigkeit bis max. wenige mA; mechanische Wartung) gegenüber.

Gleichrichterschaltungen müssen dann eingesetzt werden, wenn die Leistung der Elektrostatischen Generatoren zu klein wird. Alle Schaltungen dieser Art besitzen den Nachteil, dass bei der Umwandlung von Wechselspannungen technischer Frequenzen

Eine fahrbare Mess-Kugelfunkenstrecke, die vertikal auf dem selbsttragenden, isolierenden Fahrgestell montiert ist, wird für Kontrollzwecke verwendet. Da es beim heutigen Stand der Spannungsteiler-Technik nicht mehr notwendig ist, Eichwerte bis zu den im Labor erzeugten Maximalspannungen aufzunehmen, genügt im vorliegenden Fall ein Kugeldurchmesser von 750 mm.

## 5. STOSSSPANNUNGS-ERZEUGUNG UND -MESSUNG

Neben den bereits erwähnten Elementen des Hochspannungs-Baukastens, mit denen auch Stossspannungskreise zusammengestellt werden können, stehen zwei neue Stossgeneratoren zur Verfügung. Es handelt sich dabei um einen kleineren, sehr modular aufgebauten Generator mit 500 kV Summenladespannung und 15 kJ Energie-Inhalt, der bei Bedarf bis maximal 1000 kV ausgebaut werden kann (Fig.24) und um einen grösseren Typ mit einer Summenladespannung von 1,6 MV bei einem maximalen Energie-Inhalt von 80 kJ (Fig.25). Dieser zweite Stossgenerator ist auch in Fig. 5 auf der rechten Seite zu erkennen. Seine Schaltfunkenstrecken sind zur Vermeidung von Fehlzündungen in einen Plexiglaszylinder eingebaut, der von gefilterter Frischluft durchströmt wird. Die inneren Lade-, Serie-, Parallel- und Potentialwiderstände sind steckbar und daher leicht auszuwechseln. Für die Erzeugung von Schaltstossspannungen kann auch ein äusserer Seriewiderstand verwendet werden. Der Wirkungsgrad der Anlage liegt bei ca. 90 % für 1,2/50-Blitzstoss- und bei ca. 80 % für 250/2500 - Schaltstossspannungen. Im Steuerpult sind die notwendigen Instrumente und Stellglieder für die Ueberwachung und Steuerung der Stossanlage zusammengefasst. Die präzise Auslösung des Stossgenerators bei einer vorgewählten Ladespannung /23/ wird durch ein elektronisches Gerät übernommen. Dieses sogenannte Trigatron nimmt ferner die automatische Distanzeinstellung der Schaltfunkenstrecken entsprechend der gewählten Ladespannung vor und überwacht auch die Thyristor-Ladestromsteuerung des 200 kV-Gleichrichters. Der Gleichrichter ist in Fig. 25 im Hintergrund erkennbar, auf der linken Seite die triggerbare Mehrfachabschneidefunkenstrecke zur Erzeugung von abgeschnittenen Stossspannungen mit wählbarer Abschneidezeit, deren Konstruktion

und Eigenschaften in /24/ beschrieben sind. Die nach dem Schaltungsprinzip zu den in Serie geschalteten Funkenstrecken notwendige parallele Kondensatorsäule wird dabei gleichzeitig als Grundbelastungskapazität und als Hochspannungsteil eines schwach gedämpften Stossspannungsteilers verwendet; sie wurde mit 2000 pF so dimensioniert, dass die Aenderungen der Wellenform der Stossspannungen auch bei grösseren Belastungsänderungen gering bleiben. Die Abschneidefunkenstrecke wird durch diesen dreifachen Einsatz zu einem sehr wirtschaftlichen Element.

Die Anlage wird durch einen gedämpft-kapazitiven Stossspannungsteiler /25/ ergänzt. Die Kapazität des Hochspannungsteils beträgt 287,5 pF, die Summe der Dämpfungswiderstände 458  $\Omega$ . Drei verschiedene Niederspannungsteile liefern die drei Teilerverhältnisse 1:1000/2000/4000.

Für die Messung des Spannungsverlaufs am Niederspannungsteil des gedämpft-kapazitiven Stossspannungsteilers stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. Mit Hilfe der üblichen Stossspannungsozillographen (vgl. Fig. 8) und z.B. Polaroidkamaras kann der Spannungsverlauf fotografiert und anschliessend ausgewertet werden. Daneben stehen elektronische Stossspannungsvoltmeter - ebenfalls in der einheitlichen 19"-Einschubtechnik aufgebaut - zur Verfügung, die den Scheitelwert einer Stossspannung erfassen und sofort digital anzeigen. Da diese kommerziellen Geräte teuer sind, wurde am Institut eine neue Speicherschaltung entwickelt /26/, die den Eigenbau von preisgünstigen Stossvoltmetern mit digitaler Anzeige erlaubt. Damit können auch die Arbeitsplätze für Studienarbeiten und Praktikumversuche mit solchen modernen Geräten ausgerüstet werden.

In der Entwicklung befindet sich ausserdem ein digitales Datenerfassungssystem für Stossspannungen, bestehend aus einem ultraschnellen Analog/Digital-Konverter und einem Prozessrechner, das Stossspannungen on-line aufnimmt, auswertet und die Kennwerte wie Scheitelwert, Frontzeit, Halbwertzeit, Abschneidezeit sofort ausgibt /27,28/. Verschiedene Massnahmen mussten getroffen werden, um dieses System gegen die in einem Hochspannungslabor auftretenden grossen elektromagnetischen Störbeeinflussungen zu schützen /14/. Fig. 26 zeigt den Aufbau der Geräte in einer fahrbaren geschirmten Messkabine.

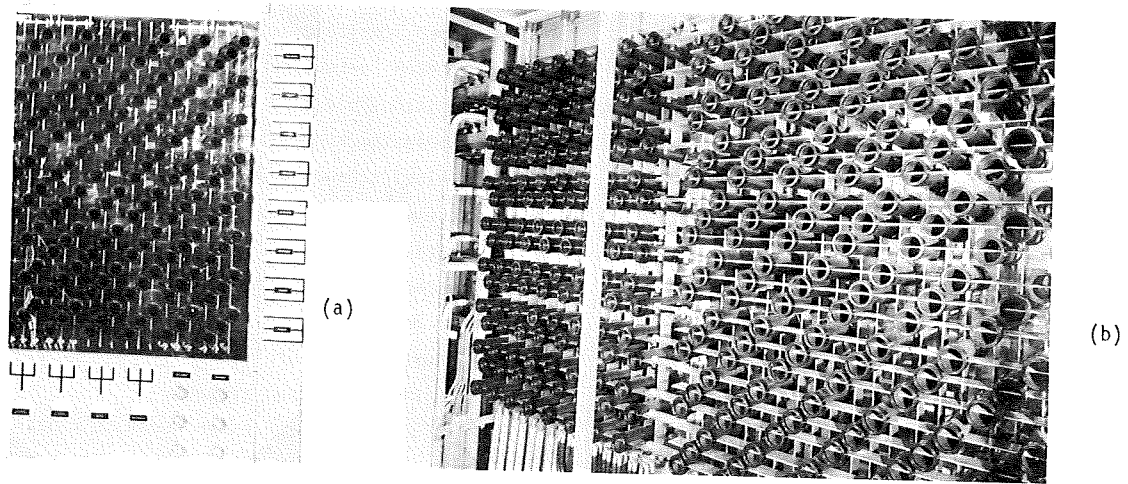


Fig.21: Linienwähler-Ansicht von der Vorderseite (a) und von der Rückseite (b)

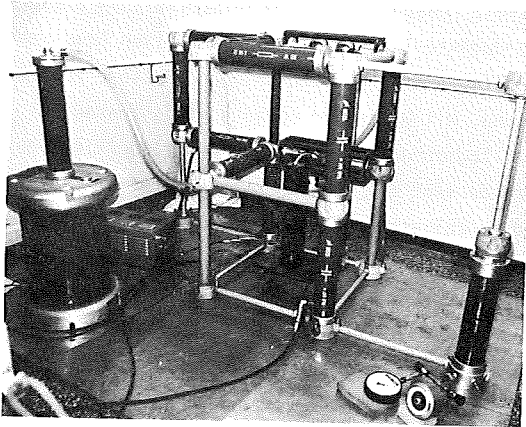


Fig.22: Versuchsaufbau mit Hilfe von Elementen des Hochspannungs-Baukastens

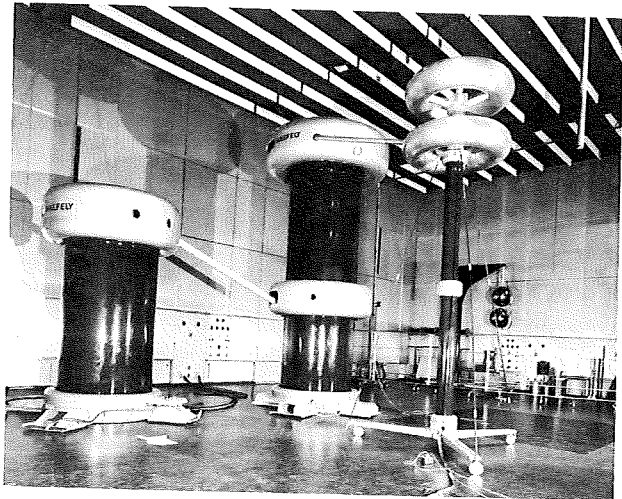


Fig.23: 800 kV - Prüftransformator-Kaskade mit kapazitivem Spannungsteiler. Im Hintergrund die 750 mm-Kugel funkenstrecke.

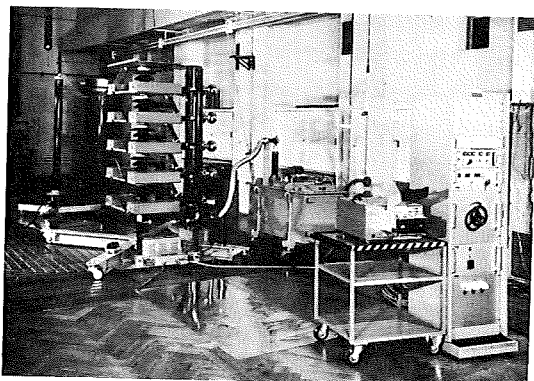


Fig.24: 500 kV-Stossgenerator

wobei in den untersten Bereichen mit etwas grösseren Klirrfaktoren und Spannungsschwankungen zu rechnen ist. Die kritische kapazitive Belastung, bei der die Selbsterregung der Generatoren einsetzt, ist etwas höher als Nennlast. Die Umformergruppe ist sowohl spannungs- wie stromgeregelt. Bei einer sprunghaften Veränderung des Spannungs-Sollwertes folgt der Spannungs-Istwert mit einer minimalen Anstiegs geschwindigkeit von 70 V/sec. Der nach Abschalten der Spannung automatisch erfolgende Schnelrücklauf benötigt ca. 16 Sekunden für den ganzen Bereich. Mit Hilfe des Stromreglers kann der Strom, der nach dem Ueberschlag fließen darf, eingestellt werden. Wegen der Maschinen-Zeitkonstanten treten die Auswirkungen dieses Reglers erst nach ca. 5 bis 6 Perioden in Erscheinung. Die Schallmessungen im Abstand von 1 m von der Achse der Maschinengruppe ergaben Werte um 92 dB im Bereich von 63 Hz bis 2 kHz. Obwohl diese Werte relativ hoch liegen, kann dank guter Schalldämmungsmassnahmen im Gebäude schon im darüberliegenden Hochspannungslabor kaum mehr ein Geräusch wahrgenommen werden.

Fig. 20 gibt eine vereinfachte Uebersicht über die Schaltung der Umformergruppe und ihre Fernsteuerung aus dem Hochspannungslabor.

### 3.4. Allgemeine Versorgung

Neben den Wandtableaux, wo die Hochspannungsquellen sowohl an die Umformergruppe wie an die Stelltransformatoren angeschlossen werden können, sind im ganzen Institut für die Energieversorgung der Versuche Einheitstableaux vorhanden (vgl. Fig.7). An jedem dieser Tableaux steht über 10 A-, 15 A- und 75 A-Steckdosen das 220/380 V-Netz zur Verfügung. Die diversen Gleich- und Wechselspannungsnetze der allgemeinen Hausversorgung können über die Wahlleitungen zugeschaltet werden. Der zugehörige Linienwähler (Fig.21) kann auch benützt werden, um zwischen zwei Arbeitsplätzen innerhalb des Institutes einen Energie- oder Signalaustausch zu ermöglichen, was besonders für die Fernüberwachung von Dauerversuchen von Nutzen ist. Zur Durchführung von Hochstromversuchen im Hochspannungslabor ist ein 800 A-Anschluss an das 220/380 V-Netz vorhanden.

## 4. WECHSELSPANNUNGS-ERZEUGUNG UND -MESSUNG

Die Erzeugung und Messung hoher Wechselspannungen erfolgt auf verschiedenen Ebenen. Ausser den bereits vorhandenen älteren Modellen von Prüftransformatoren im Bereich von 80 bis 500 kV mit den zugehörigen Messeinrichtungen wurden neben einem Sortiment von universell verwendbaren Teilen eines Hochspannungsbaukastens /22/ mit Möglichkeiten der Spannungs-Erzeugung und -Messung bis 200 kV drei identische 400 kV-Prüftransformatoren in Isoliermantelbauweise beschafft. Fig. 22 zeigt das Beispiel eines Versuchsaufbaus mit den erwähnten Baukastenelementen. Die drei 400 kV-Prüftransformatoren sind in Fig. 5 auf der linken Seite zu erkennen. Einer davon ist auf einem für 400 kV isolierten Zylinder montiert, so dass je nach Bedarf verschiedene Varianten für Einzelbetrieb, Parallelbetrieb, 800 kV-Kaskadenbetrieb (Fig.23) und Dreiphasenbetrieb zusammengestellt werden können. Die Leistung eines einzelnen Prüftransformators beträgt 400 kVA bei einer 25 % Einsatzdauer (15 Min, während einer Stunde); die darauf bezogene Kurzschlussspannung  $\epsilon_K = 7 \%$ . In bezug auf die Sprühfreiheit wird vom Herstellerwerk für jeden einzelnen Prüftransformator eine maximale Störspannung von 15  $\mu$ V, gemessen bei 400 kV mit einem Messkreis nach NEMA-Norm, bei 1 MHz garantiert. Kontrollmessungen im Labor haben diesen Grenzwert bestätigt.

Das kapazitive Teilersystem wurde entsprechend der Konfiguration der Prüftransformatoren aus drei identischen 400 kV-Messkondensatoren mit einer Kapazität von je 300 pF aufgebaut. Diese Kondensatoren können einzeln mit einer Einfachtoroid-Elektrode als 400 kV-Teiler oder mit zwei aufeinandergestellten Elementen und einer Doppeltoroid-elektrode als 800 kV-Teiler eingesetzt werden (vgl. Fig.23). Die Abmessungen der Doppeltoroide sind so gewählt, dass die maximale Oberflächenfeldstärke beim Scheitelwert der Wechselspannung 20 kV/cm nicht überschreitet. Für die Messung der Spannung am Sekundärteil des Teilers stehen zwei Scheitelspannungsvolumeter mit Digitalanzeige (vgl. Fig.8) zur Verfügung. Da diese Geräte relativ teuer sind, wurden am Institut für den Einsatz im Praktikum einfachere Scheitelspannungsvolumeter mit Digitalanzeiger entwickelt und gebaut.

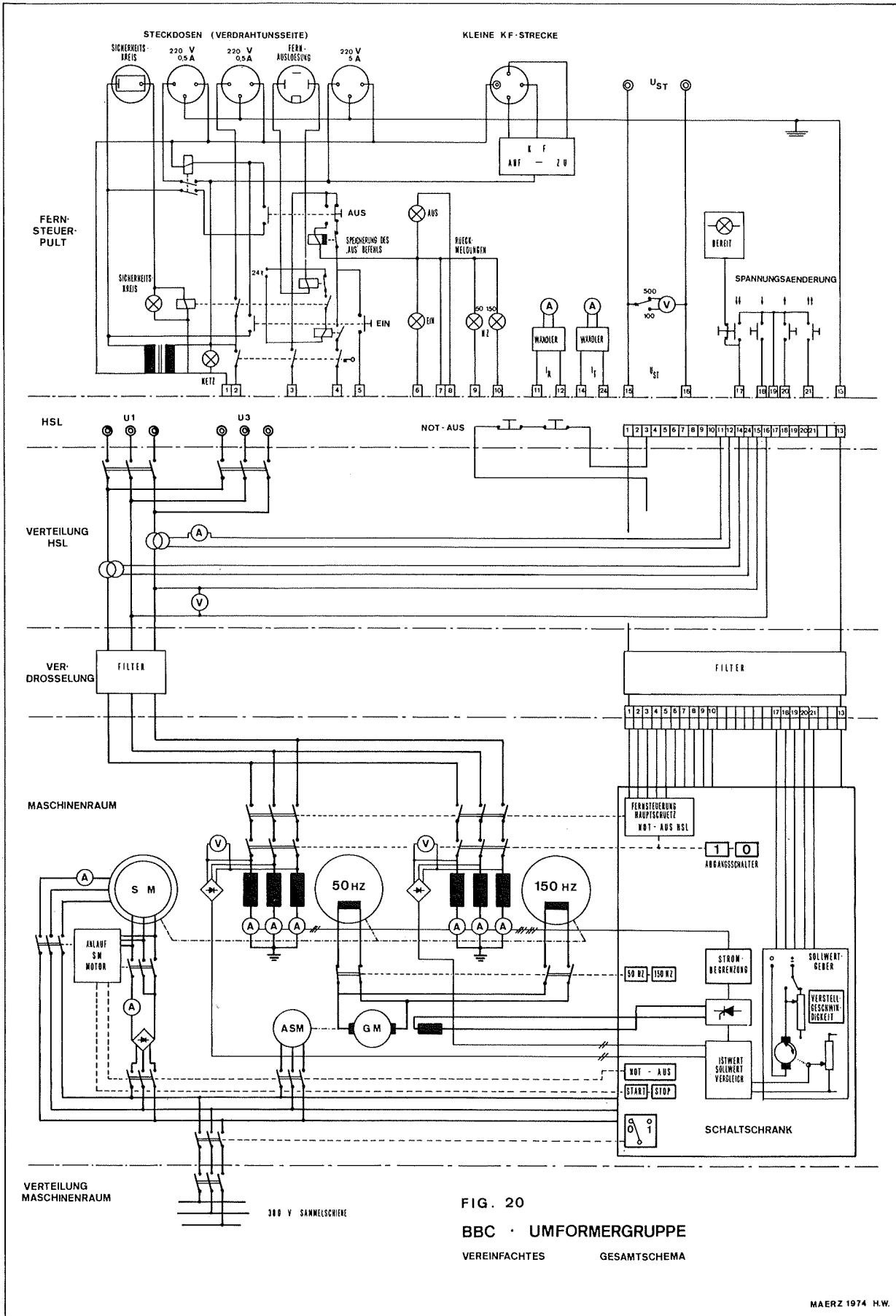


FIG. 20

BBC · UMFORMERGRUPPE

VEREINFACHTES GESAMTSCHEMA

	Synchron-Induktions-Generator SHyn 222a	Synchron-Induktions-Generator SJ 355 M6-5	Synchron-Induktions-Motor SJ 355 M2-5	Hochstrom- Erreger GJFa1-114c
<u>Nennspannung</u>	500V, 3 Phasen 500V, Einphasen	500V, 3 Phasen 500V, Einphasen	3 x 380 V	35 - 75 V
<u>Nennfrequenz</u>	50 Hz	150 Hz	50 Hz	Gleichstrom
<u>Leistungen</u>				
a) <u>dreiphasig</u>			280 kW	
- Dauerbetrieb cap.	450 kVA	225 kVA	bei cos phi = 0,9 ü.e.	
- Dauerbetrieb ind.	300 kVA	150 kVA		
- KB 30 min. cap.	600 kVA	300 kVA		
- KB 5 Sek. ind. (Ueberschlagsfall)	600 kVA	300 kVA		
b) <u>einphasig</u>				
- Dauerbetrieb cap.	300 kVA	150 kVA		19 kW (35 V)
- KB 30 Min. cap.	400 kVA	200 kVA		
- KB 5 Sek. ind. (Ueberschlagsfall)	400 kVA	200 kVA		90 kW (75 V)
<u>Dauerkurzschlussstrom</u>	1700 A	1000 A		
<u>Nenn Drehzahl</u>	3000 U/min	3000 U/min	3000 U/min	1450 U/min
<u>Nennstrom</u>	520 A	260 A	520 A	545 A

Tab. 2: Nenndaten der Maschinen der Umformergruppe



Leistung	0 - 300 kVA	0 - 100 kVA	0 - 40 kVA
Primäre Anschlussspannung	380V, 50 Hz	380V, 50 Hz	220V, 50 Hz
Strombelastung	600A	265A	180A
Sekundäre Abnahme	0 - 500 V	0 - 380 V	0 - 220 V
Kurzschlussspannung	ca. 7 %	ca. 7 %	ca. 7 %
Windungsspannung	0.5 % von U max.	0.5 % von U max.	0.5 % von U max.

Tab.1: Uebersicht über die Nenndaten der Stelltransformatoren

### 3.3. Die Umformergruppe

Die zusätzlich zu den Stelltransformatoren vorhandene Umformergruppe weist für spezielle Untersuchungen einige Vorzüge auf: Gute Sinusform, stufenlos verstellbare Spannung über den ganzen Einstellbereich, eine zusätzliche Prüffrequenz (150 Hz), Ausregeln von Spannungsschwankungen bei Laständerungen sowie gleichmässige Verteilung der einphasigen Last auf alle drei Phasen des speisenden Netzes. Auf der anderen Seite stellt der Betrieb im Hochspannungslabor zwei nicht leicht zu erfüllende Anforderungen an die Generatoren: Es soll eine möglichst oberwellenfreie Spannung erzeugt werden bei der praktisch rein kapazitiven Belastung durch ein Hochspannungsexperiment; weiter muss die Gruppe beim Ueber- oder Durchschlag des Prüfobjektes, was einem sofortigen Umschwing in den induktiven Betrieb bei stark ansteigendem Strom bedeutet, stabil bleiben. Infolge dieser ungewöhnlichen Anforderungen ist die Zahl der Firmen, die in der Lage sind, solche Maschinen zu liefern, sehr gering.

Die Umformergruppe (Fig.19) besteht aus drei mechanisch axial hintereinander gekuppelten, wassergekühlten Synchron-Induktionsmaschinen (SI-Maschinen), aufgestellt auf einer gemeinsamen Grundplatte und einer Hochstrom-Erreger-Gruppe. Die Nenndaten der Maschinen lassen sich der Tabelle 2 entnehmen. Die Anlage ist so ausgelegt, dass jeweils nur einer der beiden Generatoren im Betrieb ist, während der Rotor des anderen auf der gemeinsamen Welle unbelastet mitläuft. Der Generator-Erregerstrom wird von einer selbständigen Hilfserreregergruppe geliefert, welche aus einem Dreiphasen-Käfiganker-Antriebsmotor und einem Gleichstrom-Hochstrom-Erreger

besteht. Der in Fig. 19 im Hintergrund erkennbare Steuerschrank enthält die notwendigen Elemente für das Ein- und Ausschalten, das automatische Hochfahren und die Ueberwachung der Gruppe, sowie eine elektronische Einrichtung zur Strom- und Spannungsregelung. Es wurden unter Benützung eines Prüftransformators und diverser Belastungskondensatoren umfangreiche Abnahmeversuche durchgeführt, deren allgemein interessierende Resultate im Folgenden wiedergegeben werden:

Beim Zuschalten der Umformergruppe an das Netz treten je nach Schaltmoment beträchtliche Stromspitzen auf. Gemessen wurden Scheitelwerte bis 5 kA. Die Spannungsform der Generatoren zeigt einen sehr guten Sinus-Verlauf mit wenig Oberwellen. Der Klirrfaktor

$$K = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100 \%$$

$U_1$ : Grundwelle;  $U_2, U_3, \dots, U_n$ : Oberwellen)

der Ausgangsspannung des 50-Hz-Generators im Bereich von 100 bis 500 V liegt bei kleinen kapazitiven Belastungen im Bereich von 0,4...0,9 %, bei grösseren kapazitiven Belastungen zwischen den Grenzen von 0,6 und 1,5 %. Die Klirrfaktormessungen beim 150-Hz-Generator ergaben noch etwas günstigere Werte. Die Spannungsschwankungen bei Ausgangsspannungen von 100 bis 500 V, die durch Laständerungen und durch Schwankungen des Uebergangswiderstandes der Kohlebürsten im Erregerkreis verursacht werden, betragen weniger als 0,5 %. Der Verstellbereich der der Generatorspannung liegt zwischen 15 V und 500 V,

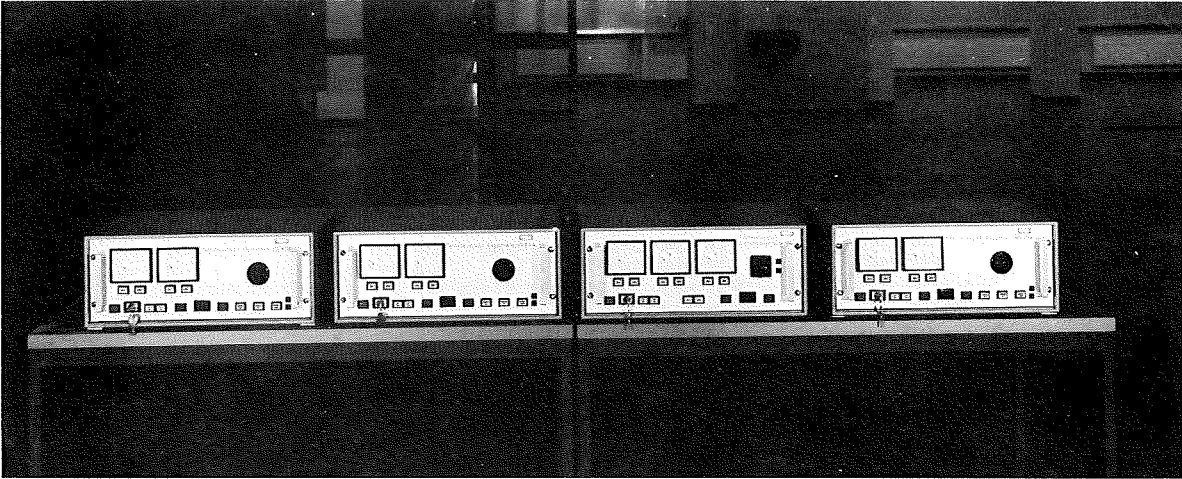


Fig. 18: Bedienungspulte für die Fernsteuerung der Stelltransformatoren und der Umformergruppe

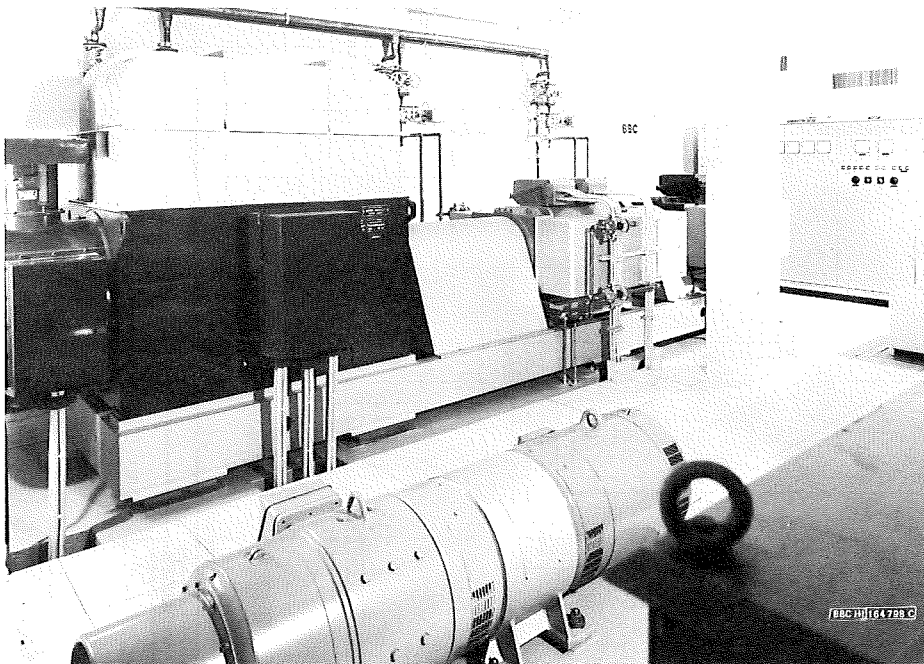
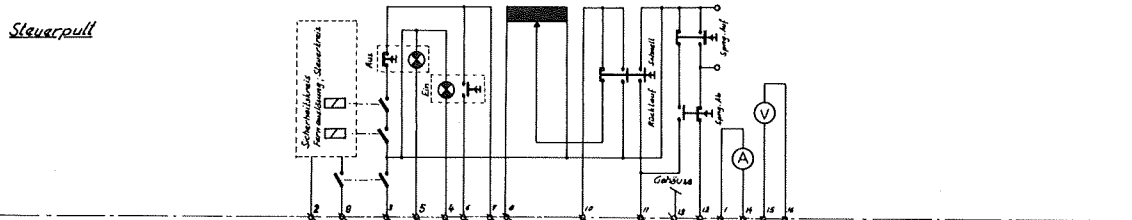


Fig. 19: Die Umformergruppe mit dem Hochstromerregger im Vordergrund. Im Hintergrund von links nach rechts: 50-Hz-Generator, Antriebsmotor, 150-Hz-Generator und Steuerschrank.

Stromlaufplan für die Fernsteuerung des 40 kVA Regeltrofos

Steuerpull

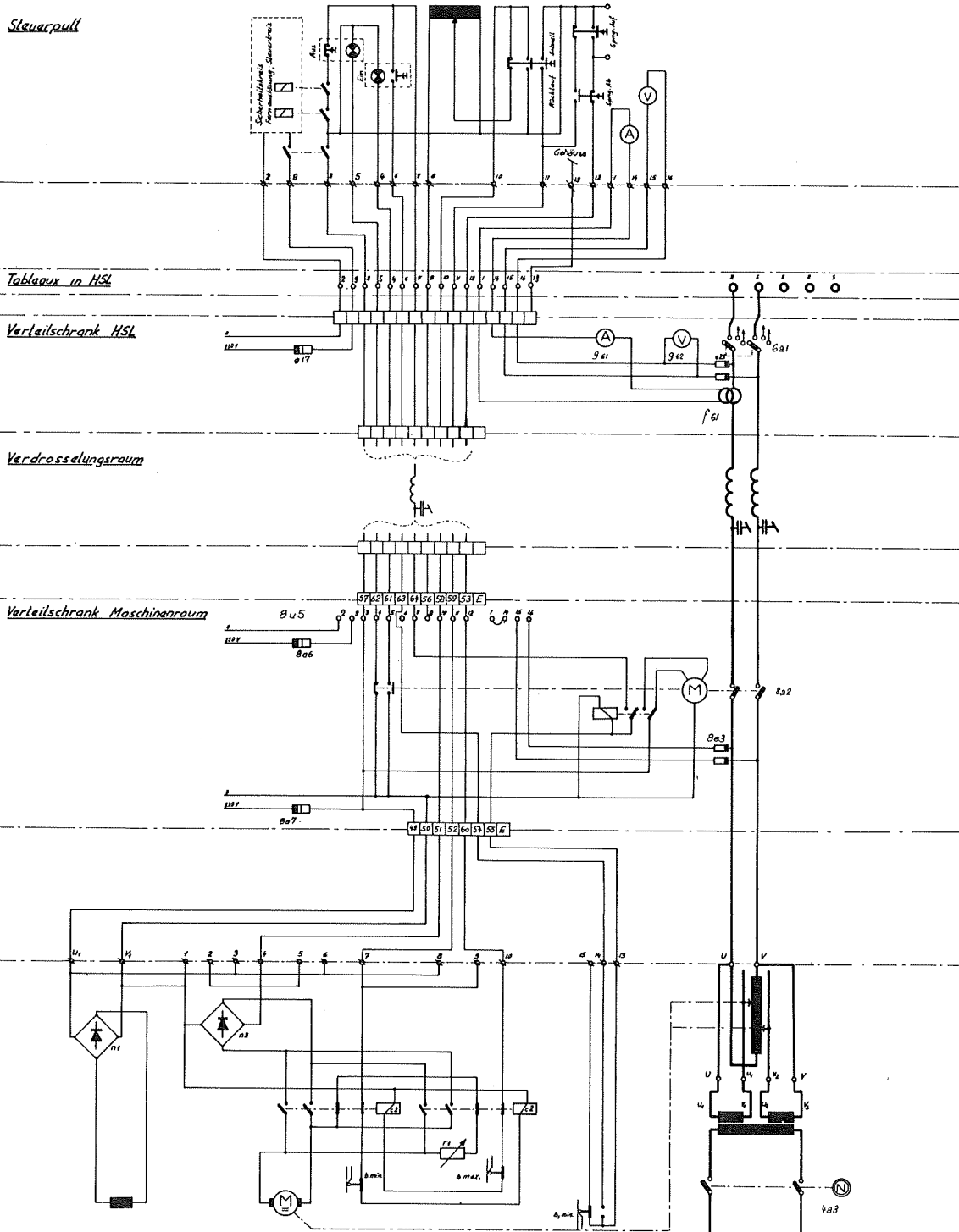


Tableaux in HSL

Verteilschrank HSL

Verdrosselungsraum

Verteilschrank Maschinenraum



Schallkombination zur Steuerung des Regeltrofos (REQ)  
(in Maschinenraum)

40 kVA  
Regeltrafo

Fig.17: Uebersichtsschema zur Fernsteuerung der Stelltransformatoren

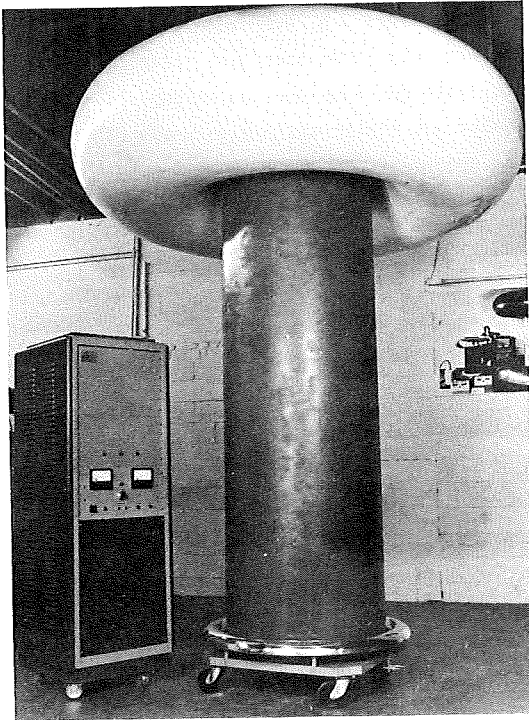


Fig.27: Werkbild einer Gleichspannungsanlage für 1000 kV, 2mA

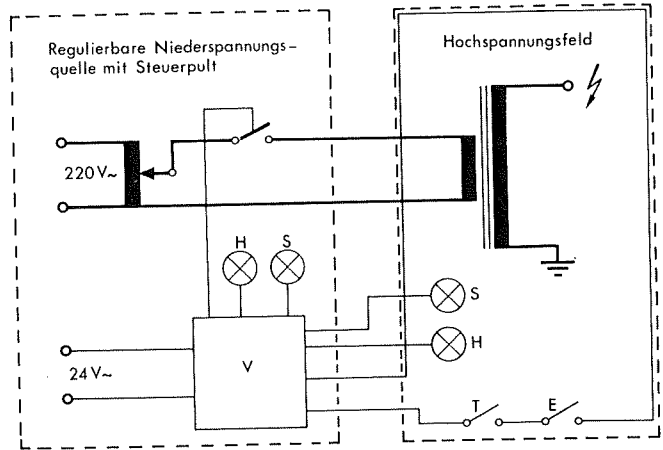


Fig.28: Prinzipschema des Sicherheitskreises

- E Schalter Erdungsstange
- H Anzeigelampe "Hochspannungskreis eingeschaltet"
- S Anzeigelampe "Sicherheitskreis geschlossen"
- T Türkontakt
- V Verknüpfungsglied

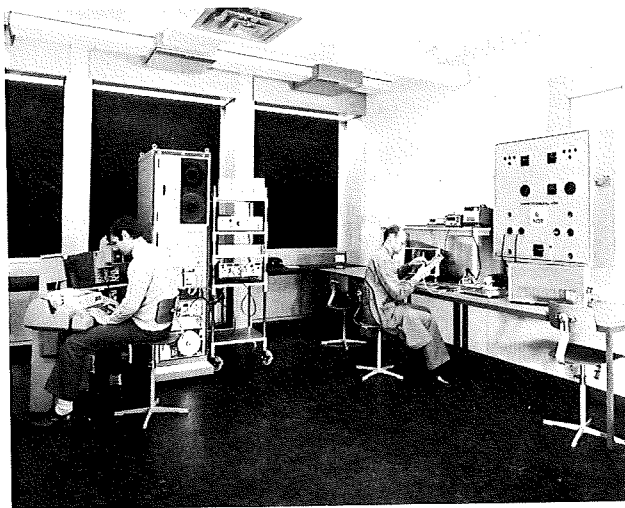


Fig.29: Das Elektroniklabor

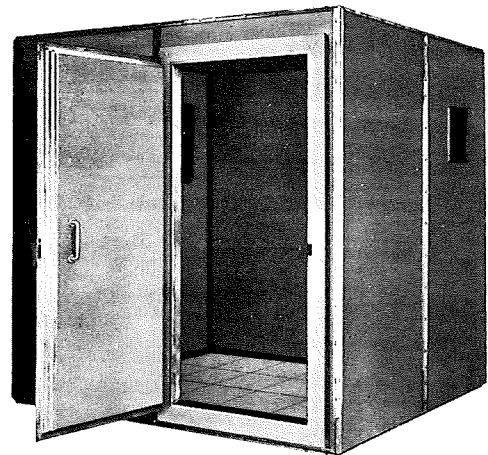


Fig.30: Modular aufgebautes, abgeschirmtes Kleinlabor in handelsüblicher Bauweise

## 7. SICHERHEITSSYSTEM

Um die Gefährdungsmöglichkeiten der mit Hochspannung arbeitenden Studenten und Institutsmitglieder weitgehend auszuschliessen, wird am Institut ein einfaches und störungssicheres Sicherheitssystem verwendet. Es ist einheitlich auf allen Hochspannungsarbeitsplätzen im grossen Labor wie in den Kleinlabors einsetzbar.

Das Prinzipschema dieser Einrichtung ist in Fig. 28 wiedergegeben. Eine einfache Automatik sorgt dafür, dass der Abgangsschalter zum Hochspannungskreis nur solange geschlossen bleibt, als auch der sogenannte Sicherheitskreis - bestehend aus einer durchgehenden Kabelverbindung um die Abschränkung des Versuchstisches herum und einer Anzahl von Schliesskontakten - geschlossen ist. Die Schliesskontakte dienen als Rückmeldung, ob die Abschränkungstüre geschlossen ist, und ob die Erdungsstangen an den dafür vorgesehenen Bügeln am Abschränkungsgitter eingehängt sind. Die Erdungsstangen werden in der Regel quer vor die Abschränkungstüre eingehängt, um die Versuchsteilnehmer daran zu erinnern, dass Kondensatoren in Gleich-Hochspannungskreisen in jedem Fall vor dem Berühren geerdet werden müssen. Meldeleuchten zeigen an, wenn der Sicherheitskreis geschlossen und der Hochspannungskreis eingeschaltet ist.

Zusätzlich sind an allen Wandtableaux gut sichtbare Notschalter angebracht, mit welchen die gesamten elektrischen Einspeisungen abgeschaltet werden können. Bei einer solchen Auslösung wird an verschiedenen im Institut verteilten Anzeigetafeln ein akustischer Alarm ausgelöst, verbunden mit einer optischen Anzeige des Ortes, an dem die Not-Ausschaltung erfolgte.

Die Leistungsschalter, die als Abgangsschalter der Stelltransformatoren dienen, sind bei der Durchführung von Hochspannungsexperimenten einer sehr hohen Schalthäufigkeit ausgesetzt. Es muss deshalb damit gerechnet werden, dass der Schalter nach längerer Gebrauchsdauer einmal versagen kann und trotz Aus-Befehl den Strompfad nicht unterbricht; ein solcher Defekt ist auch tatsächlich bisher einmal aufgetreten. Aus diesem Grunde wurde mit Hilfe eines Stromüberwachungsrelais und eines Spannungsüberwachungsrelais eine Sicherheitslogik aufgebaut. Diese sorgt dafür, dass bei Defekt des

Abgangsschalters d.h. wenn nach gegebenen Aus-Befehl immer noch ein Strom oder eine Spannung auf der Sekundärseite des Schalters vorhanden ist - der Primärschalter des Stelltransformators ausgelöst wird.

## 8. BÜRO- und KLEINLABORS

Die Institutsmitglieder konnten in mehreren geräumigen und hellen Büroräumen ihre Arbeitsplätze beziehen. Auch eine kleine Institutsbibliothek fehlt nicht. Daneben ergänzen einige Kleinlabors die bestehenden Arbeitsräume im alten Physikgebäude. So erhielt das Netzmodell zur Untersuchung transienter Vorgänge in Hochspannungs-Übertragungssystemen /32/ einen neuen Raum, und auch dem Bedürfnis nach einem Elektronik-Labor konnte Genüge getan werden. Fig. 29 zeigt dieses Labor, in dem die notwendigen Geräte und Einrichtungen für die Entwicklung von elektronischen Messgeräten vorhanden sind, und in dem Arbeiten im Zusammenhang mit der notwendigen Prozessrechner-Hardware und -Software für eine On-line-Erfassung und -Auswertung von Messgrössen durchgeführt werden. Für sehr empfindliche Teilentladungsmessungen steht ein in der handelsüblichen Elementbauweise (Fig. 30) erstelltes, abgeschirmtes Kleinlabor zur Verfügung. Bei einer Höhe von 2,5 m weist es eine Grundfläche von 5 x 3,7 m auf, was die Durchführung von Hochspannungsexperimenten bis ca. 200 kV ermöglicht. Die Dämpfungswerte der Abschirmung und die Charakteristik der Filter können Fig. 12 entnommen werden.

## 9. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Nachdem die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich nun über die beschriebenen modernen und zweckmässigen Arbeitsplätze für Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik verfügt, ist es den Verfassern eine Freude, verschiedenen Stellen ihren Dank auszusprechen. Unser Dank gilt den Bundesstellen für die grosszügige Bereitstellung von Einrichtungskrediten; der Eidgenössischen Bauinspektion V, der Sektion Bauten der ETHZ, der Koordinationsstelle für Einkaufsfragen der ETHZ, dem Architekturbüro K. Flatz und dem Ingenieurbüro P. Picard & V. Bischof für die gute Zusammenarbeit während der Planungs-, Bau- und Inbetriebsetzungsphase; dem Oberassistenten des Institutes Herrn A. Bertschinger und seinem Vorgänger Herrn Dr. F. Schwab für ihre Arbei-

ten im Zusammenhang mit den allgemeinen Planungsaufgaben und der Entwicklung des Sicherheitssystems sowie alle Institutsmitglieder des Laboratoriums für Hochspannungstechnik der ETHZ für ihren Einsatz bei den Inbetriebsetzungsarbeiten. Weiter sei Herrn E. Brügger von der VAW ETHZ für die Durchführung der fotografischen Aufnahmen und Herrn P. Mohr für die Redigierung des Manuskriptes unser Dank ausgesprochen.

\*\*\*\*\*

#### Literatur

- /1/ Sonderhefte des Bulletins der Gesellschaft Ehemaliger Studierender der Eidg. Technischen Hochschule: "Der Ausbau der ETH und der mit ihr verbundenen Anstalten". GEP Bulletin, Nr. 78 (Nov. 1967) und Nr. 79 (Mai 1968)
- /2/ K. Flatz: "Neubau Laborgebäude der Abteilung Elektrotechnik, der Bau aus der Sicht des Architekten". Schweiz. Handelszeitung, Nr. 8, 1974, S. 30/31
- /3/ V. Heyne: "Erweiterung des Transformatorenprüffeldes und Neubau eines Hochspannungslaboratoriums". BBC-Nachrichten, Bd. 51 (1969), Nr. 2, S. 67-73
- /4/ A. Fischer: "Hochspannungslaboratorien im In- und Ausland". ETZ-A, Bd. 90 (1969), Nr. 25, S. 656-662
- /5/ D. Legg, H.M. Ryan, J. Whiskord: "A New British Ultra High Voltage Laboratory". Conference Paper C 72 224-9, IEEE Winter Power Meeting, New York 1972
- /6/ G. Leroy, G. Gallet, M.F. Simon: "Les Renardières UHV Laboratory, Original Aspects in its Design and Operation". ETZ-A, Bd. 93 (1972), Nr. 7, S. 410-414
- /7/ G. Frühauf: "Das neue Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Darmstadt". ETZ-B, Bd. 15 (1963), Nr. 4, S. 78-81
- /8/ O.Mohr: "Die neuen Elektrotechnischen Institute der Technischen Universität Berlin". ETZ-A, Bd. 84 (1963), Nr. 7, S. 213-217
- /9/ H. Prinz und Mitarbeiter: "Feuer, Blitz und Funke". Zur Eröffnung des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München. Verlag F. Bruckmann, München 1965.
- /10/ H. Lau: "Das neue Hochspannungsinstitut der Universität Karlsruhe". ETZ-A, Bd. 95 (1974), Nr. 8, S. 387-391
- /11/ K. Feser: "Bemessung von Elektroden im UHV-Bereich, gezeigt am Beispiel von Toroidelektroden für Spannungsteiler". ETZ-A, Bd. 96 (1975), Nr. 4, S. 206-210.

- /12/ J. Froidefond, B. Vdovenko: "Les manutentions sur coussin d'air au Laboratoire à Très Haute Tension des Renardières". EdF-Bull. de la Direction des Etudes et Recherches - Série B. 1973, Nr. 3/4, S. 83-92
- /13/ A.J. Schwab, J. Herold: "Electromagnetic Interference in Impulse Measuring Systems". IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record, New York 1973, S. 289-294
- /14/ P. Wiesendanger: "Automatic Data Acquisition in High Voltage Laboratories, Problems of Electromagnetic Interference". IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record, Montreux 1975, S. 150 - 155.
- /15/ IEC-Publication 270: "Partial discharge measurements". Genève, 1968
- /16/ K. Kowalkowski: "Elektromagnetische Abschirmung einer Hochspannungshalle". Siemens-Bauteile-Informationen, Bd. 8, (1970), Sonderheft Funk-Entstörung, S. 38-42
- /17/ G. Koradi, N. Hylten-Cavallius: "Electromagnetic Shielding of High Voltage Laboratories". IEEE Summer Power Meeting 1970, Paper No. 70 TP 604-PUR
- /18/ E. Schulz: "Der Reduktionsfaktor von Schirmen". Frequenz 21 (1967) Nr.9, S.292-300
- /19/ IEEE Standards Publication Nr. 299: "Proposed IEEE Recommended Practice for Measurement of Shielding Effectiveness of High-Performance Shielding Enclosures". Juni 1969
- /20/ K. Berger: "Grundsätzliche Ueberlegungen zur Revision der Vorschriften über die Erdung von Hochspannungsanlagen". Bulletin SEV, Bd. 52 (1961), Nr. 9, S. 337-345
- /21/ E. Mannes, P. Wiesendanger, M. Witzig: "Messwertprojektion im Grosslabor". ETZ-B, Bd. 27 (1975), Nr. 17, S. 453-455
- /22/ H. Prinz, W. Zaengl: "Ein 100-kV-Experimentierbaukasten". Elektrizitätswirtschaft, Bd. 59 (1960), Nr. 20, S. 728-734
- /23/ A. Rodewald: "Zur präzisen Auslösung von Stossgeneratoren bei einer vorgewählten Ladespannung". Bulletin SEV, Bd. 59 (1968), Nr. 20, S. 947-952
- /24/ K. Feser, A. Rodewald: "Eine triggerbare Mehrfachabschneidfunkenstrecke für hohe Blitz- und Schaltstossspannungen". Internationales Symposium Hochspannungstechnik (ISH), München 1972, S. 124-130
- /25/ W. Zaengl: "Das Messen hoher, rasch veränderlicher Stossspannungen". Diss. Technische Hochschule München, 1964
- /26/ A. Bertschinger, M. Brandestini: "Impulse Peak-Voltmeter with a Novel Memory-Circuitry". Internationales Symposium Hochspannungstechnik (ISH), Zürich 1975, S. 194-198
- /27/ P. Wiesendanger: "Entwicklungstendenzen der Laborautomatisierung in der Hochspannungs-Versuchstechnik". Bulletin SEV, Bd. 65 (1974), Nr. 1, S. 30-33
- /28/ P. Wiesendanger: "On-line-Erfassung und -Auswertung von Stossspannungen mittels schnellem Analog-Digital-Converter und Minicomputer". Internationales Symposium Hochspannungstechnik (ISH), Zürich 1975, S. 321-325
- /29/ N.J. Felici: "Elektrostatische Hochspannungs-Generatoren". Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1957.
- /30/ High Voltage Engineering Corporation: "XTU Successfully Tested to Guaranteed 16 Million Volts". Newsletter, Science Division, August 1973
- /31/ Harald A. Enge: "United States Patent 3 596 167"
- /32/ J. Vontobel: "Beiträge zur Weiterentwicklung von Netzanalysatoren", Diss. Nr. 3643, ETH Zürich, 1965



Herausgeber:

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)  
Laboratorium für Hochspannungstechnik  
Gloriastrasse 35  
CH - 8006 Zürich

Prof. Dr. Ing. W. Zaengl  
Dipl.Ing. ETH et lic.oec.publ. P. Wiesendanger

Druck:

Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ)  
Bern

Photographien:

E. Brügger (ETH Zürich), F. Engesser (Küsnacht), P. Wiesendanger (ETH Zürich)  
BBC (Baden), Haefely & Cie. AG (Basel)  
Belling & Lee Ltd. (England), Deltary Corp. (USA)