

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 14

Artikel: Das neue Hochspannungslaboratorium der ETH Zürich

Autor: Wiesendanger, P. / Zaengl, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915300>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Das neue Hochspannungslaboratorium der ETH Zürich

Von P. Wiesendanger und W. Zaengl

1. Das neue Laborgebäude 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 Höggerberg zu verlegen, war die Möglichkeit gegeben, die ganze Abteilung für Elektrotechnik innerhalb eines in sich geschlossenen Areals nordöstlich der Sternwartstrasse unterzubringen.

Als weiterer Schritt erfolgte dann im Rahmen des Gesamtausbau der ETHZ [1]¹⁾ die Errichtung des «Laborgebäudes Elektrotechnik», welches an der Physikstrasse liegt. Es wurde in einer nur etwa dreijährigen Bauzeit fertiggestellt und zu Beginn des Sommersemesters 1973 den Benützern überlassen (Fig. 1). Der neungeschossige Bau, über den an anderer Stelle bereits berichtet wurde [2], beherbergt das «Institut für Automatik und industrielle Elektronik», das «Institut für elektrische Maschinen» und einen Teil des «Laboratoriums für Hochspannungstechnik». Die Inbetriebnahme des neuen Hochspannungslaboratoriums konnte im

621.3.027.3 : 621.317.2 : 378.662 (494.341)

September 1973 erfolgen. 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 Hochspannungslaboratorium

Heute kann sich 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-Übertragungssystemen aktuell wurden. Der dazu erforderliche enorme Aufwand ist bekannt und kann heute nur mehr von wenigen Ländern aufgebracht werden [3]. Da die Forschungsaufgaben ohnehin 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 auch mittelgrosse Laboratorien geeignet.

Im vorliegenden Fall war die Laborgrösse durch die Hanglage des Geländes, die beschränkte Grundfläche für das Gesamtgebäude und die bestehenden baurechtlichen Vorschriften stark eingeengt. Aus Fig. 2 kann die Eingliederung des Hochspannungs-Laboratoriums in das Laborgebäude Elektrotechnik entnommen werden.

Um bei der vorgegebenen relativ bescheidenen Raumgrösse optimale Anwendungsmöglichkeiten zu gewährleisten, wurden folgende Leit-Ideen entwickelt:

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

a) Eine optimale Isolationsbemessung soll eine spannungsmässig gute Ausnützung des Raumes gewährleisten.

b) Eine grösstmögliche Flexibilität der Einrichtungen soll trotz der beschränkten Grundfläche 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 Strassenniveau 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. 3 vermittelt einen Eindruck von der Grösse und von einigen technischen Ausrüstungen des Laboratoriums. In den folgenden Abschnitten werden 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 [4] und eine zweckmässige Gestaltung der Laborwände. 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 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. 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 Bedürfnissen aber auch



Fig. 1 Frontansicht des neuen Laborgebäudes Elektrotechnik der ETHZ

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. Damit können die etwa 10 t schweren Geräte mit geringem Kraftaufwand frei im Labor verschoben werden [5].

b) Die Abgänge der regulierbaren Niederspannungsquellen sind auf Anschlussableaux geführt, welche an den Seitenwänden des Labors verteilt sind. Daran können die Hochspannungsquellen über flexible Kabel mit neuentwickelten verriegelbaren 1000-A-Steckern angeschlossen werden. So wird die Platzwahl für die Hochspannungserzeuger kaum eingeschränkt.

c) Die erwähnten Tableaus enthalten auch 22polige Stecker, an die die Schaltpulte zur Fernsteuerung der Umformergruppe und des Reguliertransformators angeschlossen werden können. Diese Steuerpulte 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.

d) Unter dem Laborboden ist schachbrettartig ein Netz von Stahlrohren verlegt. Darin lassen sich den Bedürfnissen entsprechend die Mess- und Steuerkabel einziehen.

e) Auf seiten der Hochspannungsquellen wurde ein – wie später noch zu zeigen sein wird – möglichst variantenreiches System angestrebt.

2.3 Abschirmung und 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.

b) Die Durchführung der auch in Zukunft nicht mehr wegzudenkenden Teilentladungsmessungen an Hochspannungs-Prüfobjekten 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 realisiert wurden [6], waren mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln nicht ausführbar. Es ging deshalb darum, unter Zuhilfenahme der bekannten Unterlagen für Dämpfungsberechnungen [7; 8] eine preiswerte Lösung zu finden, die den gestellten Anforderungen gerecht wird. Diese Lösung besteht aus 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. 4 geführt.

b) Für die Laborwandverkleidung wurden eloxierte Aluminiumbleche verwendet, welche gleichzeitig als Abschirmelemente dienen.

c) Aus verschiedenen Gründen konnten weder an der Decke noch am Laborboden Bleche zur Abschirmung Verwendung finden. Hier müssen verschweisste Streckmetallgitter aus Eisen (Maschenweite 3×5 mm) neben dem Betoneisen für die Abschirmwirkung sorgen.

d) Es werden doppelwandige Metalltüren verwendet, bei denen lange Fugen durch geeignete Überlappungen 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. Die Resultate sind in Fig. 4 dargestellt und mit den garantierten Daten handelsüblicher geschirmter Kabinen verglichen. Die Erfahrungen mit der Abschirmung sind sehr gut; es waren bisher weder Störungen an empfindlichen Geräten in den Nachbarinstituten festzustellen, noch traten im Hochspannungslabor bei Teilentladungsmessungen im üblichen Empfindlichkeitsbereich der Geräte (1 pC bzw. $1 \mu\text{V}$) Fremdstörungen auf.

Da das ganze Laborgebäude auf felsigem Grund steht, erschienen die Erdungsverhältnisse zunächst als nicht unproblematisch. Es konnte jedoch ein eindeutiges Bezugspotential geschaffen werden, 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 mit dem Wasserleitungsnetz verbunden wurde. In diesem Raster ist die Abschirmung des Hochspannungslabors eingebettet, welche ihrerseits das Bezugspotential für alle Messanordnungen im Labor bildet. Auch der Nullpunkt der Netzeinspeisungen ist mit dieser als «Erdung» wirkenden Abschirmung verbunden. Da sich bei den Durchschlaguntersuchungen 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.

3. Energieversorgung

In Fig. 5 ist die Energieversorgung der Laboratorien vereinfacht dargestellt. Um die Einspeisung der Institutslabors soweit wie möglich von derjenigen der anderen Institute zu trennen, erfolgt sie 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. Es wurde darauf geachtet, die Versorgung aus Wartungsgründen einfach und übersichtlich anzuordnen. So wurde die ganze Verteilung auf 220/380-V-, bzw. 290/500-V-Ebene ausgeführt. Die 380-V-Hauptsammelschiene ist durch drei Sammelschienentrenner unterteilbar, um einerseits Betriebsunterbrüche bei Wartungsarbeiten zu vermeiden und um andererseits durch geeignete Schaltung Laststösse vom übrigen Labornetz 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. Als Stelltransformatoren wurden luftgekühlte Typen gewählt. Dadurch entfielen bauliche Massnahmen für Brandschutz und Ölabscheidung, und zudem sind Reparatur- und Revisionsarbeiten leichter durchzuführen. Die Windungsspannung der Stelltransformatoren liegt unter 0,5 % der Maximalspannung; die Kurzschlußspannung beträgt ca. 7 % und ist nur wenig vom Stellbereich abhängig.

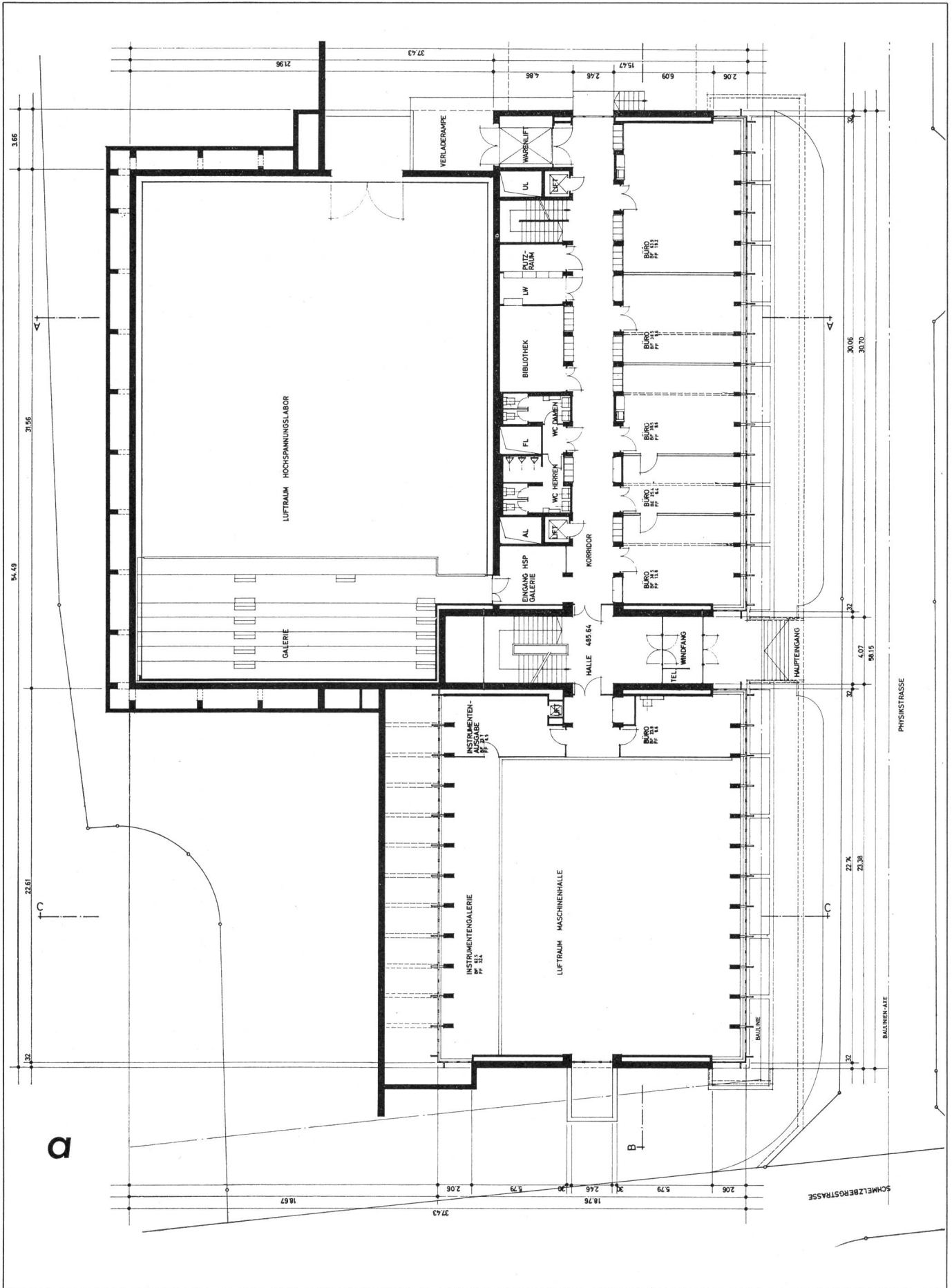


Fig. 2 Laborgebäude Elektrotechnik der ETHZ
a Grundriss auf der Höhe des Eingangsgeschosses
b Schnitt A-A

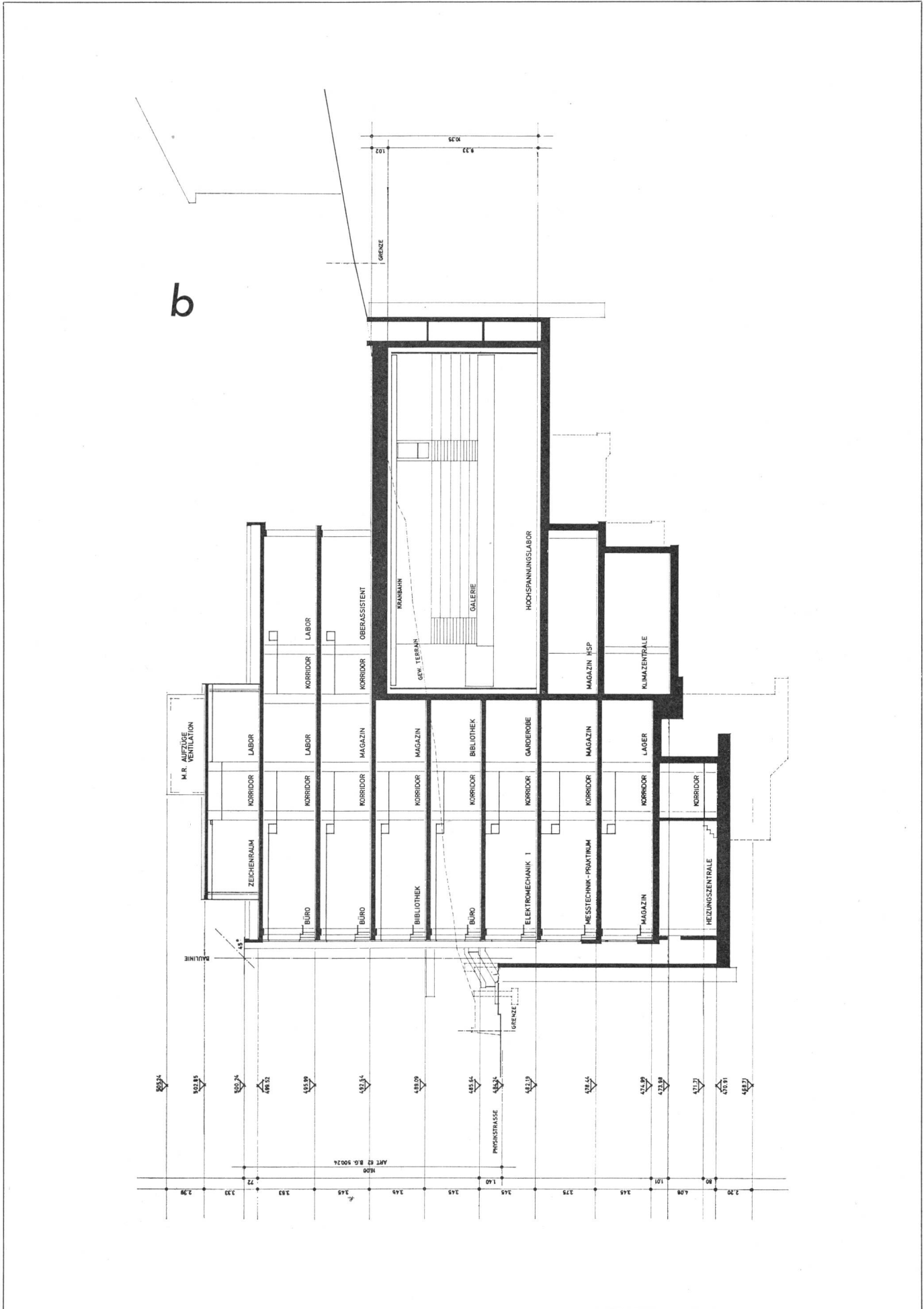
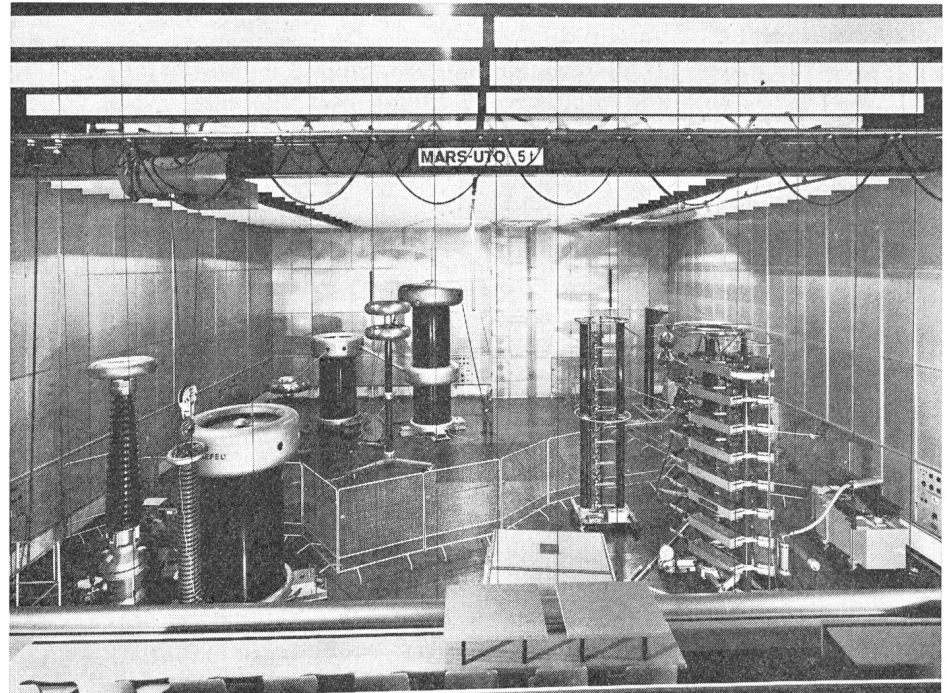


Fig. 3
Das neue Hochspannungslabor,
von der Zuschauergalerie her gesehen



Die zusätzlich zu den Stelltransformatoren vorhandene Umformergruppe weist für spezielle Untersuchungen einige Vorzüge auf: Gute Sinusform der Spannung, 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 Über- oder Durchschlag des Prüfobjektes, was einen sofortigen Umschwung in den induktiven Betrieb bei stark ansteigendem Strom bedeutet, stabil bleiben.

Die Umformergruppe besteht aus drei mechanisch axial hintereinander gekuppelten, wassergekühlten Synchron-Induktionsmaschinen, aufgestellt auf einer gemeinsamen Grundplatte. Sie wird von einem Synchronmotor mit 280 kW Nennleistung angetrieben. Die beiden Generatoren sind bei einer Frequenz von 50, bzw. 150 Hz für eine dreiphasige 30-min-Kurzzeitbelastung von 600, bzw. 300 kVA dimensioniert.

Der im gleichen Raum stehende Steuerschrank enthält die notwendigen Elemente für das Ein- und Ausschalten, das automatische Hochfahren und die Überwachung der Gruppe, sowie eine elektronische Einrichtung zur Strom- und Spannungsregelung. Es wurden unter Benützung eines Prüftransformators und diverser Belastungskondensatoren umfangreiche Abnahmeversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Spannungsform sehr gut ist. Die gemessenen Klirrfaktoren der 50- und 150-Hz-Spannungen lagen auch bei grossen kapazitiven Belastungen unter 1,5 %.

Im ganzen Institut sind für die Energieversorgung der Versuche Einheitstableaus vorhanden. An jedem dieser Tableaus 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 kann auch benützt werden, um zwischen zwei Arbeitsplätzen innerhalb des Institutes einen Energie- oder Signalaustausch zu ermöglichen, was beson-

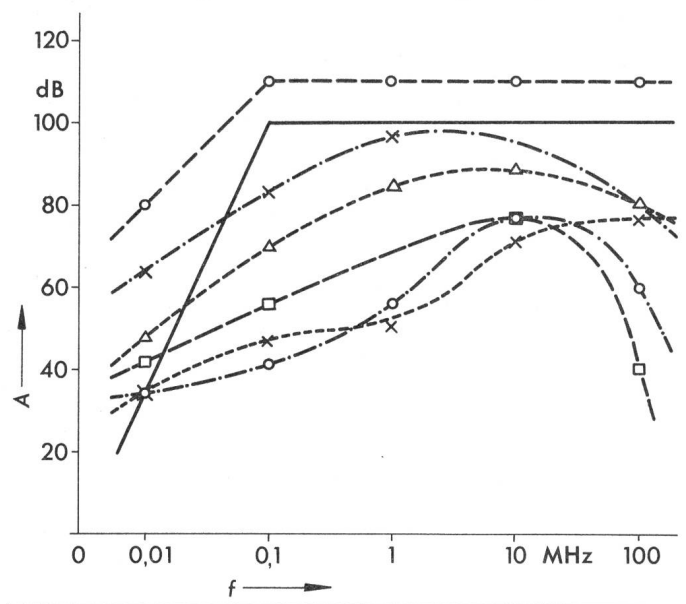
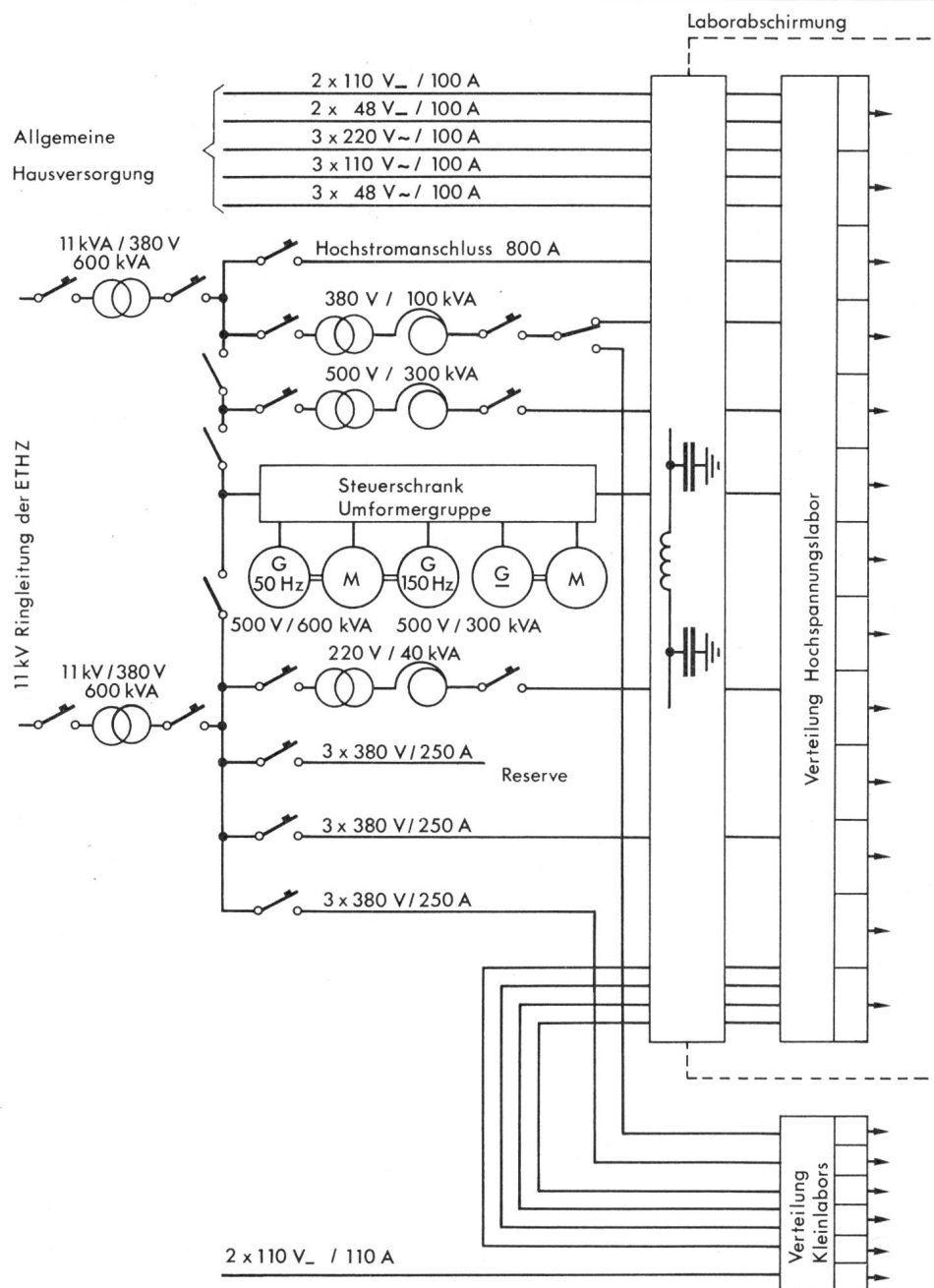


Fig. 4 Dämpfungswerte verschiedener Abschirmungen und Filter

- garantierte Charakteristik der verwendeten Filter für die Laboreinspeisung
- - - ○ - - - garantierte Dämpfungswerte von handelsüblichen, modular aufgebauten geschirmten Kabinen
- · - · × - · - · gemessene Dämpfungswerte der Laborwand
- - - △ - - - gemessene Dämpfungswerte der Labordecke
- - - □ - - - gemessene Dämpfungswerte der grossen Labortüre
- - - × - - - gemessene Dämpfungswerte der Bodenluke
- · - · ○ - · - · gemessene Dämpfungswerte der Eingangstüre

A Dämpfung, f Frequenz

Fig. 5
Vereinfachtes Übersichtsschema
der Energieversorgung der Räume
des Laboratoriums
für Hochspannungstechnik



ders 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. Es wurden neben einem Sortiment von universell verwendbaren Teilen eines Hochspannungsbaukastens mit Möglichkeiten der Spannungserzeugung und -Messung bis 200 kV [9] drei identische 400-kV-Prüftransformatoren in Isoliermantelbauweise beschafft. Fig. 6 zeigt das Beispiel eines Versuchsaufbaus mit den erwähnten Bauelementen. Die drei 400-kV-Prüftransformatoren sind in Fig. 3 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 und Dreiphasenbetrieb

zusammengestellt werden können. Die Leistung eines einzelnen Prüftransformators beträgt 400 kVA im 15-min-Kurzzeitbetrieb; die darauf bezogene Kurzschlußspannung $\epsilon_K = 7\%$. In bezug auf die Sprühfreiheit wird vom Herstellerwerk für jeden einzelnen Prüftransformator eine maximale Störspannung von $15 \mu\text{V}$, 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. 3). Die Abmessungen der Doppeltoroide sind so gewählt, dass die maximale Oberflächenfeldstärke beim Scheitelwert der Wechselspannung 20 kV/cm nicht überschreitet.

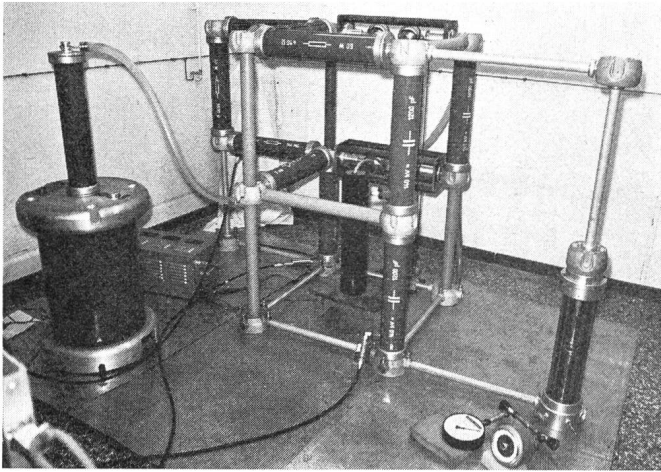


Fig. 6 Versuchsaufbau mit Hilfe von Elementen des Hochspannungsbaukastens

Eine fahrbare Mess-Kugelfunkenstrecke, die vertikal auf einem 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, und um einen grösseren Typ mit einer Summenladespannung von 1,6 MV bei einem maximalen Energie-Inhalt von 80 kJ. Dieser zweite Stossgenerator ist in Fig. 3 auf der rechten Seite zu erkennen. 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 Überwachung und Steuerung der Stossanlage zusammengefasst.

Der Gleichrichter ist in Fig. 3 erkennbar, ebenso die triggerbare Mehrfachabschneidfunkkenstrecke zur Erzeugung von abgeschnittenen Stoßspannungen mit wählbarer Abschneidezeit.

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 Änderungen der Wellenform der Stoßspannungen auch bei grösseren Belastungsänderungen gering bleiben.

Die Anlage wird durch einen gedämpft-kapazitiven Stoßspannungsteiler ergänzt. Die Kapazität des Hochspannungsteiles beträgt 287,5 pF, die Summe der Dämpfungswiderstände 458 Ω .

Für die Messung des Spannungsverlaufs am Niederspannungsteil des gedämpft-kapazitiven Stoßspannungsteilers stehen nicht nur Stoßspannungsszillographen und elektro-

nische Stoßspannungsvoltmeter, sondern auch ein im Institut entwickeltes digitales Datenerfassungssystem für Stoßspannungen zur Verfügung.

6. Gleichspannungs-Erzeugung und -Messung

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 $_c$) den Aufbau beliebiger Gleichrichterschaltungen; die Grenzleistungsfähigkeit wird beim Bau einer zwei- oder dreistufigen Greinacher-Vervielfachungsschaltung (Cockroft-Walton-Schaltung) erreicht. Für die Spannungsmessung dienen Widerstands-Bauelemente (140 M Ω , 140 kV $_c$) aus drahtgewickelten Widerständen, deren Temperaturkonstanz und Spannungsunabhängigkeit bei der Messung des Durchgangsstromes eine auf ca. 2 % Genauigkeit begrenzte Spannungsmessung ermöglichen.

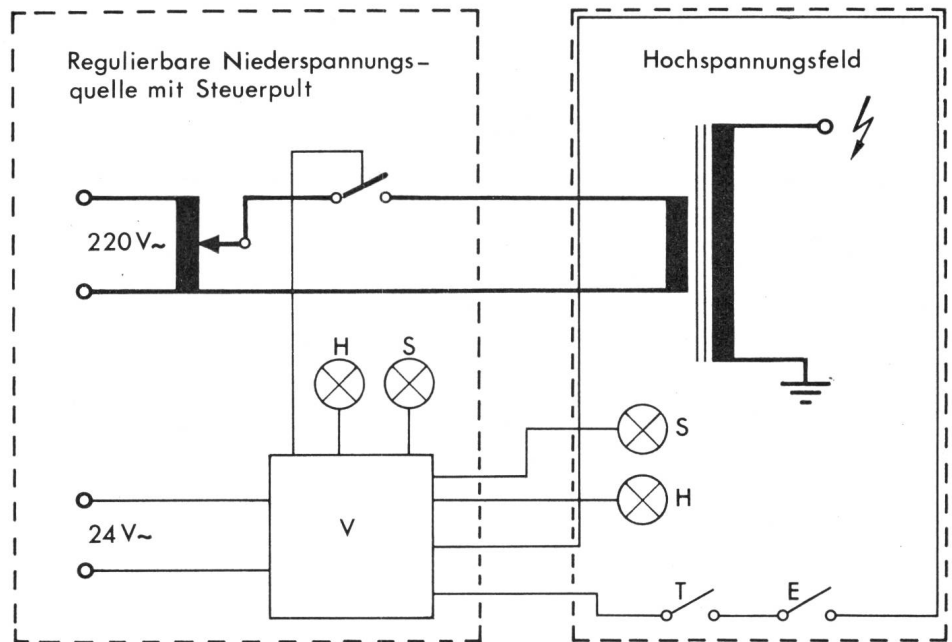
Für die Erzeugung höherer Gleichspannungen, bei gleichzeitiger Erhöhung der Ansprüche an die Qualität der zur Verfügung stehenden Gleichspannung, musste eine geeignete Anlage beschafft werden. Überlegungen bezüglich der zukünftigen Forschungsarbeiten und Untersuchungen zur Festlegung der maximal notwendigen Stromausbeute führten auf Nenndaten von 800 kV Gleichspannung und einen wünschenswerten Dauerstrom von 10 mA. Eine sehr gute Lösung bot sich durch ein noch wenig bekanntes Schaltungsprinzip an, das bisher nur in einer Patentschrift eingehender erläutert wurde [10]: Dabei werden viele eisenlose, kleine Transformatoren in Kaskade geschaltet, wobei die entsprechenden Primär- und Sekundärwicklungen über Serienkapazitäten verbunden und mit Parallelkapazitäten versehen sind. An jeder Transformatorstufe lässt sich eine etwa gleich grosse Wechselfspannung abgreifen, die durch mehrstufige Greinacher-Kaskadenschaltungen gleichgerichtet wird. Eine hohe Gleichspannung lässt sich dann durch die direkte Serienschaltung dieser Gleichrichterschaltungen erzielen. Jede Stufe liefert eine Spannung von 50 kV und ist als Modul vergossen. Diese Moduln sind in einfacher Art und Weise aufeinandergestapelt und in einem mit SF₆ 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.

Die folgenden 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 μ s
Gewicht des Hochspannungsteils (ohne Kopfelektrode)	ca. 600 kg
Bauhöhe (ohne Kopfelektrode)	1,7 m

Fig. 7
Prinzipschema des Sicherheitskreises

E Schalter Erdungsstange
H Anzeigelampe
 «Hochspannungskreis eingeschaltet»
S Anzeigelampe
 «Sicherheitskreis geschlossen»
T Türkontakt
V Verknüpfungsglied



7. Sicherheitssystem

Um die Gefährdungsmöglichkeiten der mit Hochspannung arbeitenden Studenten und Institutsmitglieder weitgehend auszuschliessen, wird am Institut ein einfaches und störungssicheres Sicherheitssystem verwendet.

Das Prinzipschema dieser Einrichtung ist in Fig. 7 wiedergegeben. Eine einfache Automatik sorgt dafür, dass der Abgangsschalter zum Hochspannungskreis nur solange geschlossen bleibt, als auch der sog. Sicherheitskreis – bestehend aus einer durchgehenden Kabelverbindung um die Abschrankung des Versuchsplatzes herum und einer Anzahl von Schliesskontakten – geschlossen ist. Die Schliesskontakte dienen als Rückmeldung, ob die Abschrankungstüre geschlossen ist und ob die Erdungsstangen an den dafür vorgesehenen Bügeln am Abschrankungsgitter eingehängt sind. Die Erdungsstangen werden in der Regel quer vor die Abschrankungstüre eingehängt, um die Versuchsteilnehmer daran zu erinnern, dass Kondensatoren in Gleich-Hochspannungskreisen in jedem Fall vor dem Berühren geerdet werden müssen. Meldelampen zeigen an, wenn der Sicherheitskreis geschlossen und der Hochspannungskreis eingeschaltet ist.

8. Schlussbemerkungen

Neben dem beschriebenen Hochspannungslaboratorium konnten noch eine Anzahl von Nebenräumen bezogen werden. Büroräume, Kleinlabors (darunter ein vollständig abgeschirmtes Kleinlabor für Teilentladungsuntersuchungen bis 200 kV), ein neuer Raum für das Leitungsmodell, sowie eine kleine Institutsbibliothek bilden die notwendige Ergänzung zum grossen Laboratorium.

Nachdem die Arbeiten abgeschlossen sind, ist es den Verfassern eine Freude, allen am Neubau Beteiligten – den zuständigen Bundesstellen, dem Architektur- und dem Ingenieurbüro, sowie den Mitarbeitern des Institutes – ihren herzlichen Dank auszusprechen.

Eventuelle Interessenten, die sich mit dem Problem des Baues einer Hochspannungshalle konfrontiert sehen, können auf dem Sekretariat des Laboratoriums für Hochspannungstechnik der ETHZ eine Broschüre beziehen, welche detaillierte Angaben über Auswahl und Inbetriebsetzung der in diesem Artikel beschriebenen Anlagen enthält.

Literatur

- [1] G. Risch und J. Burckhardt: Der Ausbau der ETH und der mit ihr verbundenen Anstalten. Sonderhefte des Bulletins der Gesellschaft Ehemaliger Studierender der Eidgenössischen Technischen Hochschule. *GEP Bulletin* -(1967)78, S. 7...27 + -(1968)79, S. 1...33.
- [2] K. Flatz: Vielseitig verwendbares Unterrichtsgebäude. Neubau Laborgebäude der Abteilung Elektrotechnik, der Bau aus der Sicht des Architekten. *Schweizerische Handelszeitung* 113(1974)8, S. 30...31.
- [3] A. Fischer: Hochspannungslaboratorien im In- und Ausland. *ETZ-A* 90(1969)25, S. 656...662.
- [4] K. Feser: Bemessung von Elektroden im UHV-Bereich, gezeigt am Beispiel von Toroidelektroden für Spannungsteiler. *ETZ-A*, 96(1975)4, S. 206...210.
- [5] J. Froidefond et B. Vdonvenko: Les manutentions sur coussin d'air au laboratoire à très haute tension des Renardières. *Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches EdF, Serie B* -(1973)3/4, p. 83...92.
- [6] K. Kowalkowski: Elektromagnetische Abschirmungen einer Hochspannungshalle. *Siemens Bauteile Information* 8(1970), Sonderheft Funkentstörung, S. 38...42.
- [7] G. Karady and N. Hylten-Cavallius: Electromagnetic shielding of high voltage laboratories. *Trans. IEEE PAS* 90(1971)3, p. 1400..1406.
- [8] E. Schulz: Der Reduktionsfaktor von Schirmen. *Frequenz* 21(1967)9, S. 292...300.
- [9] H. Prinz und W. Zaengl: Ein 100-kV-Experimentierbaukasten. *Elektrizitätswirtschaft* 59(1960)20, S. 728...734.
- [10] H. A. Enge: Cascade transformer high voltage generator. *United States Patent* Nr. 3 596 167 (1971).

Adressen der Autoren:

Dipl. El.-Ing. ETH et lic. oec. publ. P. Wiesendanger und Prof. Dr.-Ing. W. Zaengl, Laboratorium für Hochspannungstechnik der ETH Zürich, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.