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: 74 (1983)

Heft: 21

Artikel: Das Hochspannungslaboratorium der Hochschule der Bundeswehr München

Autor: Landers, E. U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904881

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.08.2025

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

Das Hochspannungslaboratorium der Hochschule der Bundeswehr München

E. U. Landers

Das Hochspannungslaboratorium der Hochschule der Bundeswehr München weist einige Besonderheiten auf, die einerseits durch das spezielle Forschungsgebiet «Hochspannungsspezifische Störungen», anderseits durch die hohen Anforderungen einer universitären Ausbildung der studierenden Offiziere zu Diplom-Ingenieuren in maximal vier Jahren bedingt sind. Die Anlagen und Einrichtungen werden beschrieben.

Le laboratoire d'essais à haute tension de l'Ecole Supérieure de la Bundeswehr, à Munich, présente quelques particularités dues, d'une part, à la recherche concernant les perturbations spécifiques à la haute tension et, d'autre part, aux sévères exigences d'un enseignement universitaire d'une durée maximale de quatre ans pour officiers désireux d'obtenir le diplôme d'ingénieur. Les installations et équipements sont décrits.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. *E. U. Landers*, Wissenschaftlicher Direktor, Institut für Elektrische Energieversorgung, Hochschule der Bundeswehr München, D-8014 Neubiberg.

1. Einleitung

Die Hochschule der Bundeswehr München wurde 1973 mit dem Ziel gegründet, den Zeit- und Berufsoffizieren im Rahmen ihrer Ausbildung ein wissenschaftliches Studium zu ermöglichen, dessen Diplomabschlüsse denen der öffentlichen Hochschulen gleichwertig sind. Wegen der minimalen Studienzeit von drei Jahren und drei Monaten und der Höchststudienzeit von vier Jahren wurde ein Trimestersystem eingeführt, das eine besonders intensive Betreuung der Studenten erfordert. Auch an die Ausstattung der Laboratorien wurden dadurch besondere Anforderungen gestellt, da sie trotz der überproportional hohen Auslastung in der Lehre ausreichend Raum für qualifizierte Forschung bieten müssen, die für eine anerkannte wissenschaftliche Ausbildung unverzichtbar ist.

In der Fachrichtung «Energietechnik» wurde ein Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Anlagen eingerichtet (Prof. Dr.-Ing. *J. Wiesinger*). Nach intensiver Konzeptions- und Planungsarbeit konnten die Aufträge für die Laborstromversorgung und die Grossgeräte der Hochspannungshalle Ende 1977 vergeben werden. Die nach der bauseitigen Fertigstellung der Halle im Mai 1979 begonnene Inbetriebnahme der Grossgeräte wurde im Februar 1981 abgeschlossen. Die Praktikumsstände konnten im März 1981 übergeben werden. Der Abschluss dieser Arbeiten und der Beschaffung der gesamten sonstigen Grundausstattung des Lehrstuhls im Jahr 1982 ist nun Anlass, über die Grundgedanken der Konzeption sowie über die Realisierung näher zu berichten.

2. Konzeption der Anlagen

Unter Berücksichtigung des begrenzten Finanz- und Baurahmens einer kleineren Hochschule (etwa 2500 Studenten) wurde ein Hochspannungslaboratorium konzipiert, das in der Grösse und in den maximalen Spannungen unter den Werten der meisten, in neuerer Zeit errichteten Hochspannungslaboratorien bleibt [1...6]. Neben Standarduntersuchungen bis zur Reihenspannung von 110 kV sollte der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten auf das Gebiet der *hochspannungsspezifischen Störungen* gelegt werden. Hierzu gehören die Fragenkomplexe der elektromagnetischen Kompatibilität (EMC), der Gefahren elektrostatischer Auf- und Entladungen, der direkten und indirekten Einwirkungen von Blitzentladungen sowie nuklearer elektromagnetischer Impulse (NEMP) [7].

Deshalb wurde die Hochspannungshalle für Gleich- und Wechselspannung nur mit einer Minimalkonfiguration ausgestattet und die verbleibenden Mittel auf eine hochwertige Ausrüstung für die Impulstechnik konzentriert. Der Stossspannungsgenerator für Blitz- und Schaltstossspannungen wurde durch einen Nachkreis zur Erzeugung von NEMP ergänzt. Das Kernstück bildet jedoch eine Doppel-Stossstromanlage, mit der zur Nachbildung von Blitzströmen auch multiple Stoss- und nachfolgende Langströme erzeugt werden können.

Für die Praktikumsstände massgebend war die Forderung, den Studierenden während der komprimierten Studienzeit eine fundierte Einführung in die Hochspannungsversuchstechnik bieten zu können. Deshalb wurden acht Praktikumsstände mit vier 100-kV- und vier 200-kV-Hochspannungsbaukästen eingerichtet. Ausserhalb der Praktika werden diese Laboratorien auch für experimentelle Diplom- und Forschungsarbeiten genutzt.

Messtechnik und Schirmung müssen sehr hohen Anforderungen genügen, da neben Stossspannungen bis zu 1 MV und Stossströmen bis über 300 kA insbesondere Spannungsanstiege bis zu 100 kV/ns und Stroman-

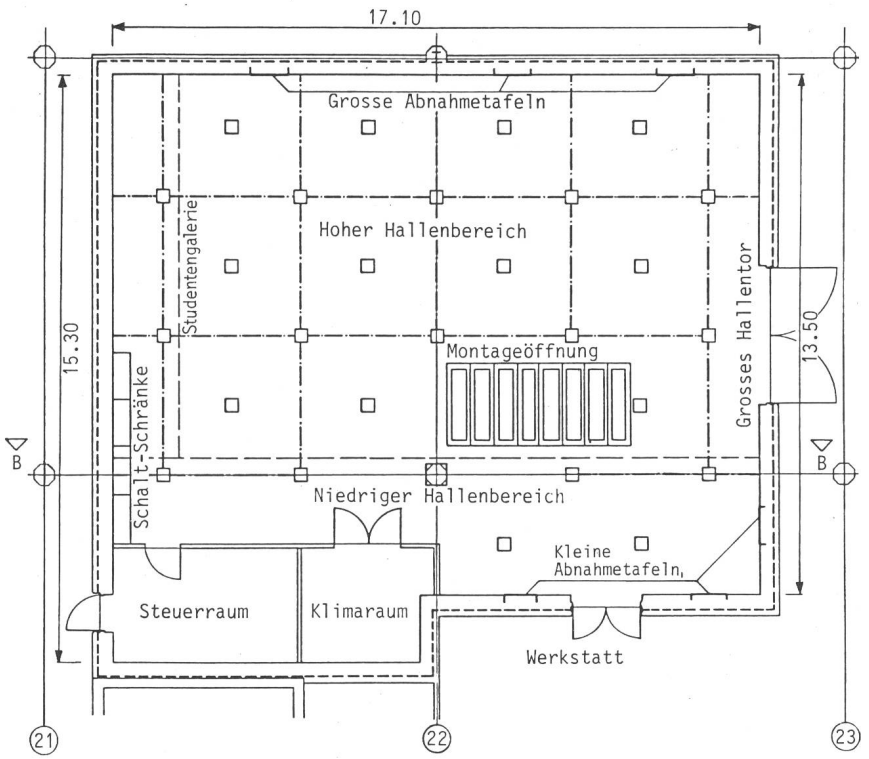

Fig. 1 Grundriss der Hochspannungshalle

stiege bis zu 50 kA/µs beherrscht werden müssen, gleichzeitig aber die Vorteile moderner, rechnergesteuerter Messwertverarbeitung genutzt werden sollen. Den hier zusammengestellten Anforderungen an die Hochspannungslaboratorien entsprechend mussten die sonstigen Laboratorien und die Werkstatt ausgelegt und ein alle diese Räume umfassendes Sicherheitssystem konzipiert werden.

3. Hochspannungshalle

3.1 Bauseitige Ausstattung

Die Räume des Hochspannungslaboratoriums wurden nicht in einem eigenen Gebäude, sondern zusammen mit den verschiedenartigsten Nachbarinstituten in einer Werkhalle untergebracht. Dies erforderte zum einen besonders hochwertige akustische und elektromagnetische Abschirmung, zum anderen ergab sich eine Einschränkung für die Abmessungen der Hochspannungshalle und des Hochspannungspraktikums. Deshalb wurde die Hochspannungshalle (Fig. 1) unterteilt in einen über zwei Stockwerke (EO und E1) reichenden hohen Hallenbereich und einen niedrigen Bereich mit der Höhe eines Stockwerks (EO) (Fig. 2). Der hohe Hallenbereich, in dem die Hochspannungsversuchsanlagen untergebracht werden, hat eine Grundfläche von 9,9×17,1 m bei einer Höhe von 8,2 m. Der niedrige Bereich mit einer Höhe von 4,1 m bietet Platz für die Steuer- und Messtechnik und ein Klimagerät. Als Verbindung mit dem Kellergeschoss (EO1) dient eine Bodenluke. Gegenüber dem grossen Hallentor befindet sich in der Ebene E1 eine Studentengalerie mit 40 Plätzen.

Alle hier angesprochenen Bereiche der Hochspannungshalle befinden sich in einer gestrichelt gezeichneten Abschirmung (Fig. 1 und 2) aus 1,25 mm starkem, HF-dicht verschweisstem Stahlblech. Alle nach aussen führenden Türen sind als Schirmtüren ausgeführt, und die gesamte Stromversorgung der Halle ist über Filter geführt. Die Schirmdämpfung im Bereich der Wand beträgt 70 dB bei 10 kHz und über 100 dB bei Frequenzen ab 100 kHz; in 1 m Abstand vor dem grossen Hallentor werden noch 60 dB bei 10 kHz und 80 dB ab 100 kHz erreicht.

Der Hallenboden besteht aus einem Betonestrich mit aufgeklebtem 0,6 mm starkem Kupferblech und einer Holzpflaster-Deckschicht. Das Kupferblech ist auf eine Erdungsschiene und auf Erdungspunkte herausgeführt. Alle Ausgleichsströme werden über diese stromtragfähige Potentialausgleichsebene geführt, so dass der Stahlblechschirm selbst nur mit geringen Strömen belastet wird.

Die Wand- und Deckenflächen der Halle sind mit gelochten Stahlblechpanelen, die mit Glasfasermatten hinterlegt sind, verkleidet. Dadurch wird innerhalb der Halle eine Nachhallzeit von < 1 s und eine Schalldämmung nach aussen von 140 dBA auf 60–70 dBA erreicht. Die Klimatisierung der Halle ist auf 20 ± 1,5 °C und eine relative Feuchte von 45 ± 5% ausgelegt. Die Ausleuchtung erbringt eine Beleuchtungsstärke von 100 lx auf dem Hallenboden. Für spezielle Aufgaben sind zusätzlich Rotlicht und vier fokussierbare Scheinwerfer installiert. Als Hebezeuge stehen ein 3,2-t-Brükkenkran und acht in der Hallendecke installierte 150-kg-Perlonseilzüge zur Verfügung.

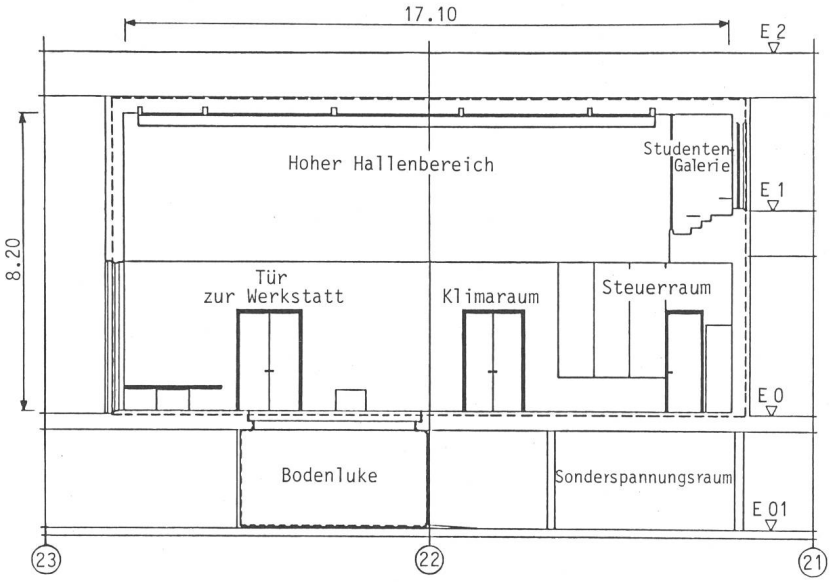

Fig. 2 Längsschnitt B–B durch die Hochspannungshalle

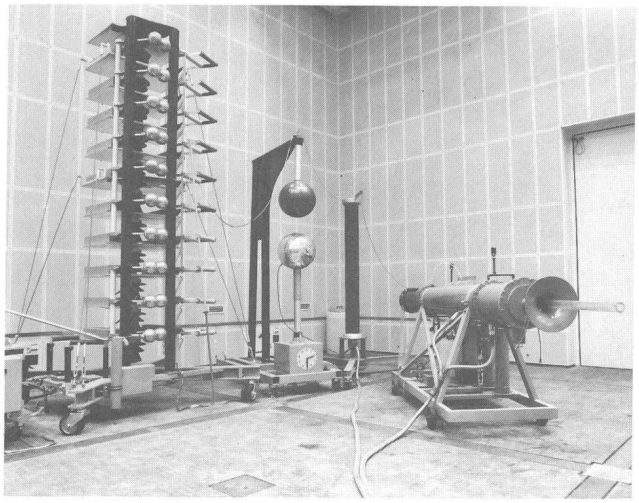

Fig. 3
Stossspannungsanlage mit NEMP-Generator
Ladegleichrichter, zehnstufiger Marx-Generator, Kugelfunkenstrecke, Belastungskondensator, NEMP-Generator

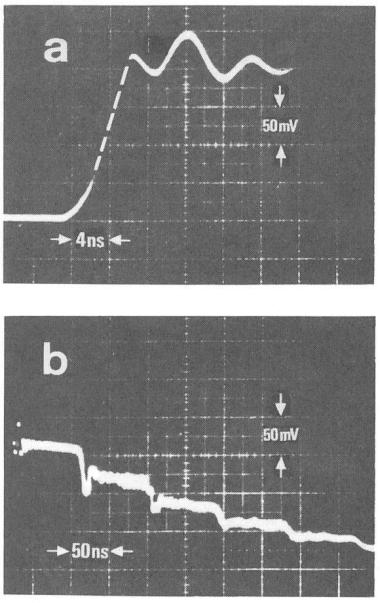

Fig. 4 Ausgangsspannung des NEMP-Generators
a Anstiegszeit $T_a \approx 4$ ns
b stufenförmiger Spannungsabbau im Rücken des Impulses

3.2 Wechsel- und Gleichspannungsanlage

Wie schon erläutert, wurde nur eine kleinere Wechsel- und Gleichspannungsanlage installiert. Der Prüftransformator in Isoliermantelbauweise ist für 350 kV und 75 kVA im Dauerbetrieb bzw. 350 kVA im Kurzzeitbetrieb 15 min ausgelegt und weist TE-Werte von < 1,5 pC auf. Zur Spannungsmessung und simultan als Normalkapazität kann der SF_6-gefüllte Pressgaskondensator eingesetzt werden, da er neben der Hauptkapazität von 50 pF noch über eine Hilfskapazität von 20 pF verfügt. Da sein TE-Pegel und auch der des 1-nF-Koppelkondensators unter 1 pC liegt, können bei der guten Schirmung der Halle TE-Messungen bei sehr kleinem Grundstörpegel durchgeführt werden. Zur Erzeugung hoher Gleichspannung kann dem Prüftransformator eine zweistufige Greinacherkaskade mit 20 mA Dauerstrom bei 500 kV und einer Welligkeit von 3% nachgeschaltet werden.

3.3 Stossspannungsanlage

Zur Erzeugung konventioneller Stossspannungen dient eine zehnstufige Stossspannungsanlage mit einer Summenladespannung von 1 MV und einer Energie von 30 kJ (Fig. 3). Mit ihr lassen sich Blitzstossspannungen 1,2/50 µs bis zu 970 kV und Schaltstossspannungen 250/2500 µs bis zu 830 kV erzeugen. Der Ladegleichrichter liefert Konstantstrom und ermöglicht eine Stossfolge von 30 s. Für die Spannungsmessung und als Belastungskapazität wird ein 1-MV-Stossspannungsteiler mit einer Primärkapazität von 1500 pF und einem Gesamt-Übersetzungsverhältnis von 1:10 000 eingesetzt. Die vertikale Funkenstrecke mit Kugeln von 0,5 m Durchmesser kann als Messfunkenstrecke oder als getriggerte Abschneidfunkenstrecke verwendet werden.

3.4 NEMP-Generator

Zur Erzeugung von extrem schnell veränderlichen Spannungen und elektromagnetischen Feldern mit einer Impulsform von 5/200 ns, wie sie zur Simulation nuklearer elektromagnetischer Impulse (NEMP) notwendig sind, wurde die Stossspannungsanlage durch einen nachgeschalteten NEMP-Generator [8] ergänzt (Fig. 3). Um die extrem kurze Anstiegszeit von etwa 4 ns (Fig. 4a) und einen definierten Wellenwiderstand der Quelle zu erreichen, wurde der Energiespeicher als koaxialer Wasserkondensator ($\varepsilon_r \approx 80$) mit etwa 5 nF und einer maximalen Ladespannung von 500 kV aufgebaut. Das Wasser wird mit einem vierstufigen Ionentauschersystem aufbereitet. Wegen des trotzdem noch relativ niedrigen Isolationswiderstandes von einigen 10 kΩ kann nur impulsförmig aufgeladen werden, wozu die Stossspannungsanlage mit einer Stossspannung 2/5 µs eingesetzt wird. Der Kondensator stellt eine homogene Leitung mit einem Wellenwiderstand von etwa 10 Ω dar, die über eine in den Innenleiter integrierte, ungetriggerte Druckgasfunkenstrecke direkt auf einen 90-Ω-Widerstand oder auf eine 90-Ω-Bandantenne aufgeschaltet werden kann. Der Anstieg der Spannung ist dabei nur durch die Qualität der Leitung und durch die Induktivität und die Durchschaltzeit der Funkenstrecke begrenzt. Der Abbau der Spannung im Rücken des Impulses erfolgt in Stufen mit der doppelten Laufzeit im Kondensator, wobei sich die Amplitudenänderung aus dem Verhältnis der Wellenwiderstände von 10 und 90 Ω ergibt (Fig. 4b). Die Einstellung der Impulsamplitude erfolgt über die Ladespannung und über die Variation von Gasdurck und Gasart (Argon bzw. Gemisch aus 97% N_2 und 3% SF_6) in der Funkenstrecke, wobei eine Amplitudenkonstanz von ± 3% erreicht wird.

Die Bandantenne (Fig. 5) ist symmetrisch und mit konstantem Wellen-

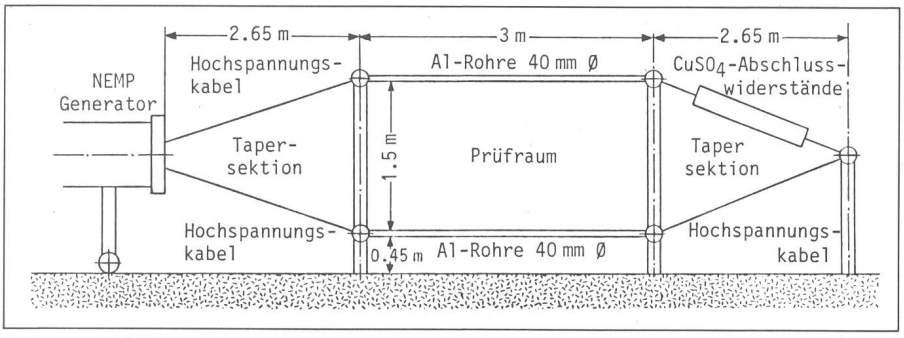

Fig. 5 Bandantenne (Wellenwiderstand 90 Ω) für den NEMP-Generator (Wellenwiderstand 10 Ω) mit PVC-Stützkonstruktion

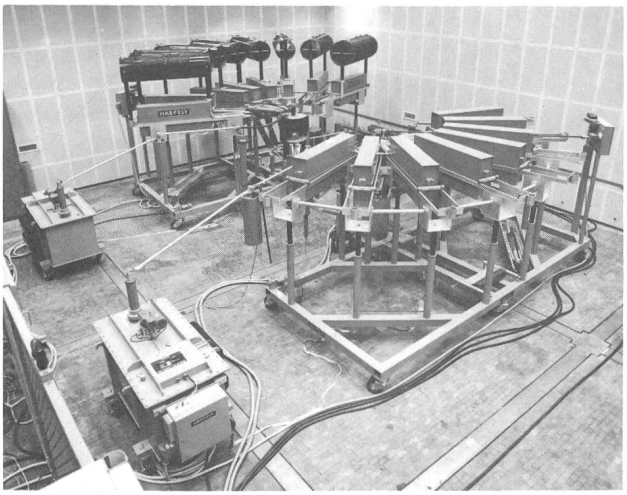

Fig. 6 Doppelstossstromanlage mit Ladegleichrichtern

widerstand von etwa 90 Ω aufgebaut. An die generatorseitige Tapersektion schliesst sich der Prüfraum mit einer Grundfläche von 3×3 m und einer Höhe von 1,5 m an. Eine weitere Taperstrecke mit integrierten Widerständen bildet den reflexionsfreien Abschluss der Antenne. Um die Isolationsprobleme zu beherrschen und um unerwünschte Wellenmoden zu vermeiden, werden die Antennenflächen nicht durch Platten, sondern durch Hochspannungskabel bzw. durch gegeneinander isolierte Aluminiumrohre gebildet. Die Abschlusswiderstände sind rohrförmige $CuSO_4$-Flüssigkeitswiderstände mit geringem Skineffekt. Mit diesem Generator lassen sich an konzentrierten Prüflingen Spannungsanstiege bis zu 100 kV/ns und im ebenen Teil der Antenne schnell ansteigende Felder bis über 300 kV/m erzeugen.

3.5 Stossstromanlage

Eines der Hauptforschungsgebiete befasst sich mit den Wirkungen von direkten und indirekten Blitzeinschlägen [9]. Hierzu wurde eine Doppelstossstromanlage konzipiert (Fig. 6), die auch die Simulation von multiplen Stossströmen und von überdurchschnittlichen Blitzstromparametern ermöglicht [10]. Jede Anlagenhälfte kann mit maximal acht Kondensatoren zu je 2,5 μF Kapazität bei 100 kV Ladespannung bestückt werden, was einer gespeicherten Ladung von 2 C und einer Energie von 100 kJ entspricht. Zu jeder Anlagenhälfte gehört ein Steuerpult und ein Konstantstromladegerät (Stossfolge 100 s), so dass Einzelbetrieb und auch eine Zusammen- oder Gegeneinander-Schaltung der Anlagenhälften möglich ist. Die maximalen Stossströme liegen über 300 kA bei schwingender Entladung mit etwa 30 kHz, über 110 kA für Stossströme 4/10 μs und über 50 kA für Stossströme 8/20 μs. Eine Anlagenhälfte ist mit zusätzlichen Induktivitäten ausgestattet, so dass auch Rechteckströme bis zu 500 A und 3200 μs Dauer erzeugt werden können. Netzfolgeströme bis zu 3 kA Scheitelwert können von einem thyristorgeschalteten Transformator mit Sekundärspannungen zwischen 20 und 400 V abgegeben werden.

Eine Besonderheit bei der Simulation von Blitzströmen ist die Anwendung der Crowbar-Technik. Hierzu wird bei schwingender Entladung im ersten Strommaximum der Prüfling durch eine zu ihm parallele Crowbar-Funkenstrecke in sich kurzgeschlossen. Dadurch klingt der Prüflingsstrom langsam im ms-Bereich gegen null ab, was zu einer wesentlichen Erhöhung von Impulsladung und Stromquadratimpuls führt (Fig. 7). Das Schaltelement muss dabei zunächst die volle Ladespannung von 100 kV halten und anschliessend in der Nähe des Spannungsnulldurchganges durchgeschaltet werden. Ausserdem soll trotz der hohen Strombelastung von über 100 kA der Spannungsfall an der Funkenstrecke möglichst klein gehalten werden, da hiervon die Abklingzeitkonstante abhängig ist. Am Lehrstuhl wurde dazu eine Crowbarfunkenstrekke entwickelt [11; 12], mit der im Prüfling Impulsladungen bis über 60 C (bei einer Kondensatorladung von nur 2 C) und Stromquadratimpulse bis über $3 \cdot 10^6$ A^2 s erreicht werden. Mit diesen Werten lassen sich Kenndaten simulieren, die bei negativen Blitzen über 99% und bei positiven Blitzen etwa 80% der gemessenen Stossströme natürlicher Blitze [13; 14] repräsentieren.

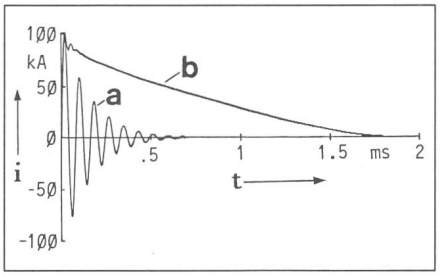

Fig. 7 Stossstrom zur Simulation von Blitzströmen

a schwingender Strom (ohne Crowbarschalter)
b aperiodischer Strom (mit Crowbarschalter)

Für die Zusammenschaltung beliebiger Einzelkomponenten der Stossstromanlage werden Trigatrons verwendet, die über je vier gegeneinander um 0–999 μs verschiebbare Zeitkanäle, über Zeitkanäle mit 1–999 ms Verschiebungszeit und über eine von 5 bis 360° einstellbare Netzsynchronisation verfügen. Damit lassen sich beispielsweise Doppelstossströme gleicher bzw. verschiedener Polarität oder Impulsströme mit nachfolgendem Rechteck- bzw. Netzfolgestrom darstellen.

3.6 Sicherheitssystem

Wegen der kleinen Abmessungen der Hochspannungshalle sind sämtliche Hochspannungsanlagen, alle Steuerpulte und die Messkabine auf Rollen verfahrbar. Zur Abtrennung der Prüffelder dienen fahrbare, 2×2 m grosse Gitter und Türelemente mit einer Maschenweite von 50 mm. Für die Stossstromanlage, bei der mit der Explosion von Prüflingen gerechnet werden muss, können diese Elemente zusätzlich mit vorgehängten Verkleidungsblechen bzw. Scheiben aus Sicherheitsglas versehen werden. Jedes Element ist mit Erdanschlüssen und einem Rot/Grün-Warnlampenpaar ausgestattet. Der durch sämtliche Gitter durchgeschlaufte Sicherheitskreis entspricht im einzelnen der im Hochspannungspraktikum verwendeten Anlage (vgl. Kap. 4.3). Durch die Zusammenschaltung mehrerer Steuerpulte können auch komplexe Anlagen (z. B. die Kombination von Stossstrom und Stossspannung) betrieben werden. Bei Unterbrechung oder Abschaltung der Sicherheitsspannung werden alle Stosskondensatoren über automatische Erdungsschalter entladen. Da wegen der guten Erdungsverhältnisse auch die 220-V-Netzspannung ein besonderes Gefährdungspotential darstellt, werden sämtliche Netzsteckdo-

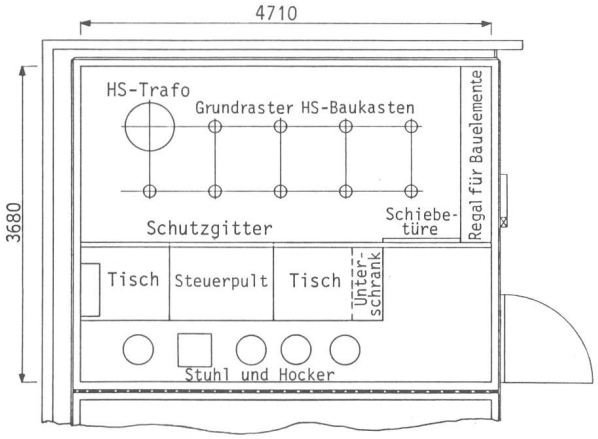

Fig. 8
Grundriss eines 200-kV-Praktikumsstandes

sen über 30-mA-Fehlerstromschutzschalter betrieben.

4. Hochspannungspraktikum

4.1 Bauseitige Ausstattung

Für das Hochspannungspraktikum, aber auch für Diplom- und Forschungsarbeiten stehen je vier Versuchsstände für 100 bzw. 200 kV in der Ebene E2 zur Verfügung. Die Stände sind als voll geschirmte Messkabinen mit einer lichten Höhe von 2,6 m und einer Tiefe von 3,68 m ausgeführt. Die Breite beträgt 3,69 m für die 100-kV- und 4,71 m für die 200-kV-Stände (Fig. 8). Die Stände sind in der Tiefe durch ein 2,28 m hohes Gitter (Maschenweite 50 mm) mit einer Schiebetüre in ein 2,05 m tiefes Hochspannungsfeld und ein 1,58 m tiefes Steuerfeld unterteilt.

Die einzelnen Stände sind mit Messdurchführungen versehen und mit Dämpfungswerten von 100 bis 120 dB bei Frequenzen ab 10 kHz sehr gut abgeschirmt. Durch das schirmmässige Einschliessen der versuchsbedingten Störungen kann auch empfindliche Mess- und Datenverarbeitungstechnik im jeweiligen Nachbarstand oder im freien Gangbereich zwischen den Ständen betrieben werden.

Die Grundfläche des Hochspannungsfeldes ist mit 2,5 mm starkem verzinkten Stahlblech ausgelegt, das als induktivitätsarme Potentialausgleichsebene wirkt. Als zusätzliche Anschlüsse hieran stehen eine Kupferschiene, vertikale Ankerschienen mit einer Tragfähigkeit von 100 kg/m und mehrere Aufhängepunkte mit je 10 kg Tragfähigkeit zur Verfügung.

Durch die Verkleidung der Innenwände mit Schalldämmpaneelen wird eine geringe Nachhallzeit und eine Schalldämpfung von 20 bis 40 dBA erreicht.

4.2 Hochspannungsbaukasten

Für die Versuchsschaltungen werden die Elemente des Hochspannungsbaukastens [15, 16] benutzt, mit dem zweistufig bis 200 kV Wechsel-, 280 kV Gleich- und 260 kV Stossspannung erzeugt werden können. Alle Elemente, bis auf die Hochspannungstransformatoren, sind in einem Bauelementerack im Hochspannungsfeld unterzubringen. Die waagrechten Flächen und die Tragholme des Racks sind mit geerdetem Aluminiumblech belegt, so dass alle Elemente automatisch in sich kurzgeschlossen und geerdet werden. Trotz der offenen Bauweise des Racks sind in den Ständen TE-Messungen mit Grundstörpegeln von 0,1 pC möglich.

Zusammen mit der Lieferfirma wurde der Hochspannungsbaukasten durch das Institut weiterentwickelt. Die bisher elektromechanischen und damit netz- bzw. erdpotentialabhängigen Antriebe der verstellbaren Elemente (Erdungsschalter, Mess-, Zünd- und Prüflingsfunkenstrecke) wurden auf Pneumatik umgestellt. Dadurch wurde völlige Potentialfreiheit bei beliebiger Einbaulage erreicht, so dass z. B. der Erdungsschalter auch in zweistufigen Anlagen zum Kurzschliessen von Kondensatoren oder als allgemeines Schaltelement verwendet werden kann. Nebenbei konnte die Spannungsfestigkeit des Erdungsschalters durch 50prozentige Abstandsvergrösserung verbessert und die Vielzahl von Funkenstreckentypen durch eine einzige, universell einsetzbare Funkenstrecke ersetzt werden (Fig. 9). Durch elektrisch gesteuerte Druckluftventile im Steuerpult und durch Verwendung eines Schnellkupplungssystems lassen sich diese Elemente über dünne Kunststoffschläuche leicht an die Steuerung anschliessen.

4.3 Steuerpult und Sicherheitsanlage

Das Steuerpult und die Sicherheitsanlage wurden vom Institut konzipiert. Wie aus dem Prinzipschaltbild (Fig. 10) zu ersehen ist, wird die gesamte Anlage über 30-mA-Fehlerstromschutz gefahren. Die Steuerspannung wurde aus Sicherheitsgründen auf 24 V, 50 Hz ausgelegt. Über eine Reihe von Kontakten werden mit dieser Spannung die Sicherheitsbedingungen überwacht. Die Kontakte für Druckwächter und Erdungsstange schützen gegen Kurzschluss, während Schlüsselschalter, Türkontakte und das Rot/Grün-Warnlampenpaar vor allem der Personensicherheit dienen. Durch Herausführen von Reihen-(Interlock-) und Parallelanschlüssen der

Fig. 9
Versuchsaufbau im Hochspannungspraktikum mit pneumatischem Erdungsschalter und pneumatischer Funkenstrecke

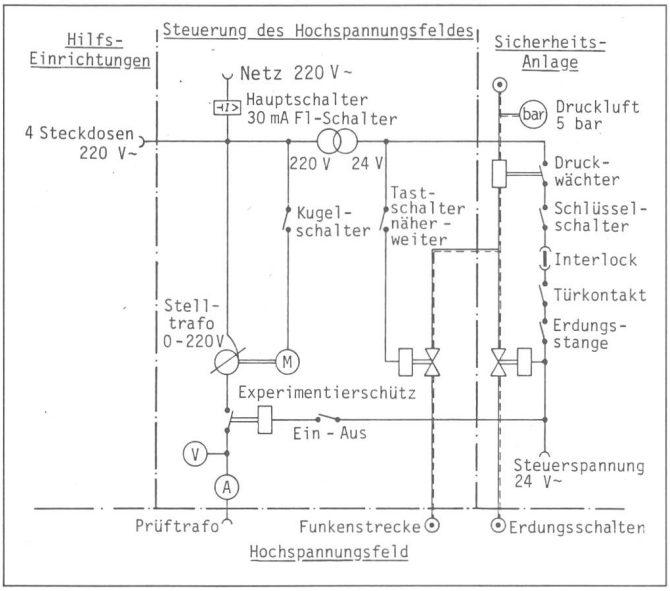

Fig. 10
Prinzipschaltbild des Steuerpultes und der Sicherheitsanlage

Steuerspannung sind beliebige Erweiterungen der Sicherheitsbedingungen und der zu überwachenden Anlagenteile möglich. Auch mehrere Steuerpulte lassen sich zu einem Sicherheitskreis zusammenschalten. Die Erdungsschalter öffnen und schliessen automatisch beim Einschalten bzw. beim Abschalten oder bei Unterbrechung der Steuerspannung. Die pneumatischen Funkenstrecken werden über Tastenpaare «näher–weiter» von Hand gesteuert. Die Primärspannung des Prüftransformators kann durch einen motorgetriebenen Stelltransformator in zwei Geschwindigkeitsstufen eingestellt werden. Zur Auslösung von Stossspannungen ist ein Triggergerät mit Zündverstärker und drei Zeitkanälen eingebaut. Auf Betriebsmessgeräten werden Primärspannung und -strom des Prüftransformators, die Ladegleichspannung von Stossanlagen und der Betriebsluftdruck angezeigt. Für die genaue Bestimmung der Hochspannung wurden vom Institut analoge Messgeräte entwickelt und gebaut, die bei Wechselspannung nach dem Verfahren von *Chubb* den über einen Messkondensator und bei Gleichspannung den über einen Messwiderstand fliessenden Strom anzeigen, wobei aus didaktischen Gründen auf eine Eichung in Spannungswerten bewusst verzichtet wurde. In Reihe mit dem potentialfreien Messwerk ist jeweils ein Niederspannungskondensator bzw. -widerstand gegen Erde gelegt, der mit dem entsprechenden Element auf der Hochspannungsseite einen Teiler bildet. Auf diese Weise kann simultan zur Messung durch einfaches Anschliessen eines Oszillografen auch die Kurvenform beobachtet werden.

5. Messtechnik

An die Messtechnik werden in der Hochspannungstechnik sehr hohe Anforderungen gestellt, da empfindliche Messungen bei extremen Störpegeln durchgeführt werden müssen. Aus den eingangs genannten Forschungsgebieten des Instituts ergeben sich grosse Unterschiede in den notwendigen Messbereichen, die bei den Spannungen vom MV-Bereich bei Stossspannungsuntersuchungen bis herab in den µV-Bereich bei TE-Messungen und bei den Strömen von einigen 100 kA bei Stossstromtests bis herab zu einigen pA bei elektrostatischen Untersuchungen reichen. Zudem sind die hauptsächlich untersuchten Impulsvorgänge, deren Stirnzeiten bei NEMP und bei elektrostatischen Entladungen im Bereich weniger Nanosekunden liegen, nicht reproduzierbare Einzelereignisse, die deshalb nur mit Echtzeit-Aufzeichnungsgeräten bei Bandbreiten bis zu einigen 100 MHz richtig gemessen werden können.

Wegen der oft notwendigen statistischen Auswertungen wurde versucht, die Vorteile rechnergestützter digitaler Messtechnik konsequent zu nutzen. Neben analogen Speicheroszillografen mit Bandbreiten bis 400 MHz bei Schreibgeschwindigkeiten bis zu 25 mm/ns werden deshalb digitale Transientenrekorder eingesetzt. Die Standardtypen haben eine Amplitudenauflösung von 8 bit bei einem Sampleintervall bis herab zu 10 ns, was Messungen bis zu 25 MHz zulässt. Als Grenzleistungsgeräte stehen zwei Digitizer zur Verfügung, die die Aufzeichnung einmaliger Vorgänge bis über 500 MHz mit einer Amplitudenauflösung von 9 bit bei einem äquivalenten Sampleintervall bis herab zu 10 ps ermöglichen. Mit diesen Geräten wurden vier Standardmessplätze aufgebaut, die über einen Transientenrekorder mit Monitorbildschirm und über einen Tischcomputer mit Drukker, Magnetband- und Disketten-Laufwerk und Plotter verfügen. Die digitalisierten Messdaten werden in den Rechner übernommen und können abgespeichert oder auch sofort verarbeitet werden. Auf diese Weise lassen sich Maxima, Minima, Abschneidezeiten usw. oder auch sekundäre Grössen, wie Ladung, Stromanstieg und Stromquadratimpuls bei der Aufzeichnung von Stossströmen, unmittelbar bestimmen. Die Ergebnisse können dann über Rechnerbildschirm, Drucker oder Plotter als Zahlenwerte oder als fertig skalierte und beschriftete Diagramme (vgl. Fig. 7) ausgegeben werden. Über die IEC-Bus-Schnittstellen der Rechner können weitere Messgeräte oder auch rechnergesteuerte Umschalter angeschlossen werden, so dass weitere Messwerte vom Rechner erfasst und Versuchsabläufe teilautomatisch gesteuert werden können. Eine Vollautomatisierung wurde nicht angestrebt, da die Versuchsbedingungen im Forschungsbetrieb sehr stark und häufig variieren.

Aus dem übrigen Messgerätepark hervorzuheben wäre noch eine mit 25 bis 115 kHz breitbandig arbeitende TE-Messeinrichtung mit einer Auflösung unter 0,1 pC, eine Scheringbrükke für Kapazitäten von 1,5 pF bis 11 µF bei ± 0,05% Genauigkeit und für Verlustfaktoren bis 3,5 bei einer Auflösung besser als 10^{-6}. Für Messungen im Bereich der Elektrostatik sind Strom- und Ladungsmessgeräte bis herab zu 0,01 pA und 0,1 pC, elektrostatische Voltmeter von 250 V bis 100 kV und ein Feldmessgerät für 2 bis 2000 kV/m vorhanden.

In der Hochspannungshalle steht eine fahrbare Messkabine mit einer Grundfläche von 1,8×1,8 m und einer Schirmdämpfung von 80 dB bei 10 kHz und über 100 dB ab 100 kHz zur Verfügung, die einen kompletten Standardmessplatz aufnehmen kann und dann noch Platz für zusätzliche Messeinrichtungen bietet. Die koaxialen und triaxialen Messkabel werden in kritischen Fällen in einem HF-dich-

ten Stahlwellschlauch geführt. Durch diese Massnahmen können in allen Fällen handelsübliche, nicht gesondert EMC-geschützte Messgeräte eingesetzt werden.

6. Sonderspannungsversorgung

Ausser der Beleuchtung werden alle Verbraucher in den Laboratorien über den Sonderspannungsraum in der Ebene EO1 (Fig. 2) eingespeist, der über einen eigenen 315-kVA-Transformator direkt an das 20-kV-Netz der Hochschule angeschlossen ist. Die hier bereitgestellten Spannungen werden über Filter auf Abnahmetafeln in den Laboratorien geführt. Auf den grossen Abnahmetafeln in der Halle stehen Leistungsanschlüsse für den 350-kV-Transformator, den 400-V-Folgestromtransformator, die drei Ladegleichrichter für Stossspannung bzw. Stossstrom und ein- bzw. dreiphasige Netzspannung für die Steuerpulte zur Verfügung. Auf drei kleinen Abnahmetafeln sind 5 bar Druckluft, ein- und dreiphasige Netzspannung und von einem 10-kVA-Maschinensatz eine regelbare Spannung von 0 bis 400 V bei 16⅔ bis 400 Hz vorhanden.

Die Abnahmetafeln der Praktikumsstände umfassen die Speisung des Steuerpultes mit 5 bar Druckluft und einphasiger Netzspannung für 5 kVA und ein- und dreiphasige Netzspannung. Alle elektrischen Anschlüsse sind über 30-mA-Fehlerstromschutz und Sicherungsautomaten abgesichert.

7. Notaus- und Notruf-System

Sämtliche Laborräume sind mit einem raumbezogenen Notaus- und Notruf-System ausgestattet. Das Notaus-System besteht aus mehreren neben der Raumtüre und an auffälligen Punkten plazierten Pilzdrucktasten, mit denen alle elektrischen Anlagen des betroffenen Raumes mit Ausnahme der Beleuchtung sofort spannungsfrei geschaltet werden können. Dank der automatischen Erdungsschalter gilt dies auch für die Hochspannungsfelder. Die Wiedereinschaltung ist nur mit einem Schlüssel möglich. Da im Bereich der Hochspannungsfelder nur das ausgebildete Personal des Instituts zur sachkundigen Hilfe eingesetzt werden kann, wurde dieses System noch durch ein Notrufsystem ergänzt. In sämtlichen Räumen des Instituts ist ein Meldetableau angebracht, das bei Auslösung des Notrufes einen akustischen Alarm bei gleichzeitiger optischer Anzeige des betroffenen Labors bewirkt. Dadurch ist eine schnelle und sachkundige Hilfe innerhalb kürzester Zeit gewährleistet.

8. Sonstige Einrichtungen

Die Arbeitsplätze für wissenschaftliche Mitarbeiter und Hilfskräfte und für Diplomanden sind in einem Elektronik- und einem Diplomandenlabor untergebracht. Hier können kleinere Versuche und die Entwicklung von messtechnischen und elektronischen Schaltungen durchgeführt werden. Ein Foto- und ein Ätzlabor, ein Terminalraum mit Anschluss an das Hochschulrechenzentrum und eine kleine, aber gut ausgestattete Werkstatt für die vielfältigen mechanischen Arbeiten runden die Ausstattung des Institutes ab.

Literatur

[1] *M. Aguet* e. a.: Le laboratoire haute tension. Bull. ASE/UCS 69(1978)12, p. 618...623.

[2] *H. Lau:* Das neue Hochspannungsinstitut der Universität Karlsruhe. ETZ-A 95(1974)8, S. 387...391.

[3] *A. Leschanz* und *G. Oberdorfer:* Das neue Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Graz. E und M 85(1968)12, S. 527...532.

[4] *A. Lukaschewitsch* und *E. Peschke:* Geschirmte Hochspannungshalle für Teilentladungsmessungen an Kunststoffkabeln. Siemens Z. 50(1976)7, S. 481...485.

[5] *W. Rasquin:* Hochspannungslaboratorium der Kabeltechnik für die Universität-Gesamthochschule Duisburg. Elektrizitätswirtsch. 79(1980)13, S. 459...464.

[6] *P. Wiesendanger* und *W. Zaengl:* Das neue Hochspannungslaboratorium der ETH Zürich. Bull. SEV/VSE 66(1975)14, S. 737...745.

[7] *E.U. Landers:* VDE-Seminar «Schutzmassnahmen gegen Blitz- und Schaltüberspannungen in Niederspannungsanlagen einschliesslich Mess-, Steuer- und Regelanlagen». Technik + München. Mitteilungsblatt der technisch-wissenschaftlichen Vereine Münchens -(1981)4, S. 76.

[8] *D. Ebeling, F. Früngel* und *H. Martinen:* Practical measures at a water-Blumlein 500 kV EMP generator and its oscilloscope measurements. Proceedings of the 4th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, March 10...12, 1981; Paper 24E6, p. 131...134.

[9] *P. Hasse* und *J. Wiesinger:* Handbuch für Blitzschutz und Erdung. 2. Auflage. München, Pflaum-Verlag/Berlin-Offenbach, VDE-Verlag, 1982.

[10] *K. Feser, M. Modrusan* und *H. Sutter:* Simulation of multiple lightning strokes in laboratory. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28...31 August 1979; Paper 41.05.

[11] *W. Zischank:* Schutzfunkenstrecken zur Überspannungsbegrenzung bei direkten Blitzeinschlägen. Dissertation der Hochschule der Bundeswehr, München, 1983.

[12] *W. Zischank:* Eine Crowbar-Funkenstrecke in einem kapazitiven Stossstromgenerator zur Simulation direkter Blitzströme. 17. Internationale Blitzschutzkonferenz, Den Haag, 1983.

[13] *K. Berger, R.B. Anderson* et *H. Kröninger:* Paramètres des coups de foudre. Electra -(1975)41, p. 23...37.

[14] *R.H. Golde:* Lightning. Vol. I: Physics of lightning. London/New York/San Francisco, Academic Press, 1977.

[15] *H. Prinz:* Feuer, Blitz und Funke. München, F. Bruckmann, 1965.

[16] *W. Zaengl:* Ein neues Hochspannungs-Praktikum. ETZ-B 14(1962)20, S. 549...553.