

Übertragung von Forschungsarbeiten der Hochschule in die Praxis eines Hochleistungsprüffeldes

Autor(en): **Baumgartner, R. / Lang, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **71 (1980)**

Heft 21

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905300>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Übertragung von Forschungsarbeiten der Hochschule in die Praxis eines Hochleistungsprüffeldes

Von R. Baumgartner und E. Lang

621.316.54

Ein der Schalterentwicklung dienendes Hochleistungsprüffeld steht selbst in einem fortwährenden Prozess der Weiterentwicklung. Die steigenden Anforderungen bedingen den Einsatz modernster Elektronikgeräte. Es wird gezeigt, welche Massnahmen getroffen werden müssen, um die Anwendung von Elektronik trotz des in einem Prüffeld naturgemäss hohen, breitbandigen Störpegels zu ermöglichen.

Un laboratoire d'essais à grande puissance pour le développement de disjoncteurs est lui-même constamment en cours de développement. Les exigences de plus en plus sévères nécessitent l'emploi d'appareils électroniques les plus modernes. On montre les mesures qu'il faut prendre pour permettre l'application de l'électronique, malgré le niveau de perturbation naturellement élevé et à bande large dans un tel laboratoire d'essais.

1. Einleitung

Die Entwicklung von Hochspannungsapparaten für die Verteilung elektrischer Energie erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen der Konstruktionsabteilung und den Hochspannungs-, Hochleistungs- und mechanischen Prüffeldern. Das Hochleistungsprüffeld spielt dabei für die Entwicklung von Hochspannungs-Leistungsschaltern eine dominierende Rolle.

Das Ausschaltvermögen von Hochleistungsschaltern wurde in den letzten Jahren enorm gesteigert (Fig. 1) und liegt heute bei etwa 10000 MVA für eine einzige Löschkammer. Dieser Wert übertrifft die dreiphasige Kurzschlussleistung des Kernkraftwerkes Gösgen um etwa den Faktor 4. Damit diese Prüffelder ständig weiterentwickelt und immer komplexere Prüfmethoden erarbeitet werden. Dabei gewinnt in zunehmendem Masse der Einsatz von modernsten elektronischen Steuer-, Mess- und Auswertesystemen an Bedeutung. Elektronische Geräte mit der Fähigkeit, Nutzsignale im mV-Bereich zu verarbeiten, können in einem Hochleistungsprüflabor mit dem unvermeidlichen hohen elektromagnetischen Störpegel nicht ohne spezielle Massnahmen eingesetzt werden. Die Verfasser hatten Gelegenheit, an entsprechenden Problemen im Hochspannungslabor der ETHZ mitzuarbeiten und die dort gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse auf die gleichgelagerte Ebene eines industriellen Prüffeldes zu übertragen.

2. Prüftechnik

Die Ausschaltleistung eines Schalterpoles ist gegeben durch das Produkt des unterbrochenen Kurzschlußstromes und der zeitlich darauf folgenden, betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung an den Anschlussklemmen. Unmittelbar nach der Stromunterbrechung steht die Schaltstrecke noch unter der thermischen Nachwirkung des vorangegangenen Kurzschlußstromes. In diesem Zeitraum wird sie bereits durch die transiente, wiederkehrende Spannung beansprucht. Anschaulich dargestellt handelt es sich beim Ausschaltvorgang um einen Wettlauf zwischen der elektrischen Verfestigung der vom Kurzschlußstrom noch heissen, durch die forcierte Löschgasströmung gekühlten Schaltstrecke und der sich ab dem Löschmoment aufbauenden wiederkehrenden Spannung.

Ein Hochleistungsprüffeld ist in die in Figur 2 dargestellten Hauptkomponenten aufgeteilt. Das «Kraftwerk» simuliert für den Prüfling die Bedingungen im Netz. Es kann aus einem oder mehreren Kurzschlussgeneratoren (Fig. 3) bestehen, welche den Prüfstrom und in beschränktem Umfang die Prüfspannung liefern. Die rasche Steigerung der Kammerleistung auf das Vielfache der Kurzschlussleistung heutiger Kurzschlussgeneratoren hat dazu geführt, dass Strom und Spannung aus getrennten Quellen (Generator, Kondensatorbatterie) bezogen werden müssen. Dies ist möglich, weil der hohe Prüfstrom vor dem Moment der Stromunterbrechung (Stromnull) fliesst und die wiederkehrende Spannung unmittelbar nachher anstehen muss. Dazu wurden besondere Prüfkreise entwickelt, die eine praxisnahe Wiedergabe des Stromnulldurchganges

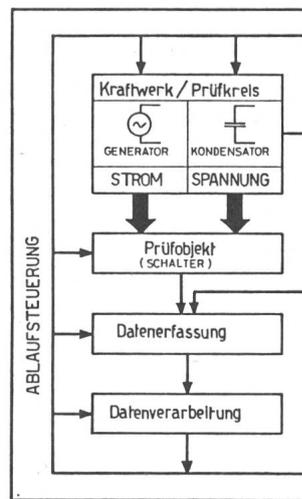
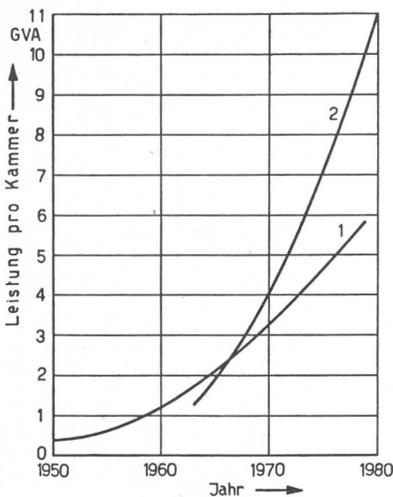


Fig. 1 Steigerung der Ausschaltleistung pro Löschkammer

- 1 Druckluftschalter
- 2 SF₆-Schalter

Fig. 2 Schematische Darstellung eines Hochleistungsprüffeldes während eines synthetischen Ausschaltversuches

Messgröße	Bereich	Auswertung	Messwertaufnehmer
Prüfstrom	Einige A...250 kA	Effektivwert, Scheitelwert, Asymmetrie, Steilheit vor der Unterbrechung	Shunt, Stromwandler, Rogowskispule
Nachstrom	1...50 A	Verhalten der Löschstrecke in den ersten μ s nach der Löschung	Magnetfeldröhre (wird in der Hochstrom- phase bis zu 1000mal übersteuert)
Wiederkehrende Spannung	Einige kV... 800 kV	Scheitelwert, Steilheit nach der Stromunterbrechung	Kapazitive, evtl. ohmsche Teiler
Lichtbogenspannung	\approx 100...5000 V	Löschs Spitze, Lichtbogenarbeit	Kapazitive, evtl. ohmsche Teiler
Kontaktbewegung	20...150 mm	Eigenzeit des Schalters, Geschwindigkeit, Lichtbogenzeit	Induktive und resistive Weggeber
Druckverlauf	0,1...50 bar	Kontrolle des Druckaufbaues	Druckaufnehmer piezoelektrisch, piezoresistiv
Temperatur ausser- halb des Licht- bogenbereiches	Bis einige 100 °C	Vergleich von Messung und Berechnung	Thermoelemente, Temperaturindikatoren
Lichtbogen- eigenschaften und Verhalten im realen Schalter		Lage im Lichtbogenlöschsystem, Form, Dichteverteilung, Feldstärke, Löschströmung	Filme mit Höchstgeschwindigkeitskameras - Schlierenaufnahmen - Schmierbildaufnahmen

ermöglichen. Bei der Stromüberlagerung [1; 2] liefert ab ca. 300 μ s vor dem Stromnulldurchgang eine Kondensatorbatterie allein den Prüfstrom und ist nach der Löschung Teil eines Einschwingkreises, der den Schalter mit der wiederkehrenden Spannung beansprucht (Fig. 4). Bei der Spannungsüberlagerung [1; 2], einer anderen Synthetikschialtung, wird auch der Spannungsanstieg unmittelbar nach Stromnull noch vom Generator geliefert und anschliessend mit der vom Kondensatorschwingkreis produzierten Einschwingspannung überlagert.

Ausschaltversuche sind einmalige Vorgänge, welche in etwa 0,01 s ablaufen und die häufig, für die Nachbildung von Schnellwiedereinschaltzyklen bereits 0,3 s später, mit gleichen Werten wiederholt werden müssen. Um bei diesen raschen Vorgängen ein Maximum an Information zu gewinnen, müssen ausserordentlich viele Messwerte registriert werden. Diese erlauben dem Ingenieur, eine möglichst genaue Diagnose über die Vorgänge im Prüfling zu erstellen und Wege zur Verbesserung des Prüfobjektes zu finden. Tabelle I gibt eine Übersicht über interessierende Messgrößen und ihre Auswertung. Nebst der Fülle der nötigen Messwerte müssen bei allen Messungen zahlreiche Zusatzbedingungen mitberücksichtigt werden, wie: Messwertaufnehmer auf Potential; sehr schnelle, transiente Vorgänge im Bereich unter 10 μ s Dauer; lange Messleitungen, grosse Signaldynamik u. a.

Ähnlich wie bei einem in der Energieproduktion eingesetzten kommerziellen Kraftwerk ist auch hier der Einsatz eines hochentwickelten Überwachungssystems unabdingbar. Um den zeitgerechten Ablauf eines nur einige 10 ms dauernden Versuches zu gewährleisten, ist zudem ein erheblicher Aufwand an schneller Steuerelektronik notwendig.

Somit verlangen die Anforderungen an ein rationelles Prüffeld den Einsatz modernster Mess-, Steuer- und Registrierelektronik. Im folgenden Abschnitt wird ein Weg aufgezeigt, wie die heutige, sehr empfindliche Elektronik trotz des hohen elektromagnetischen Störpegels eines Hochleistungsprüffeldes eingesetzt werden kann.

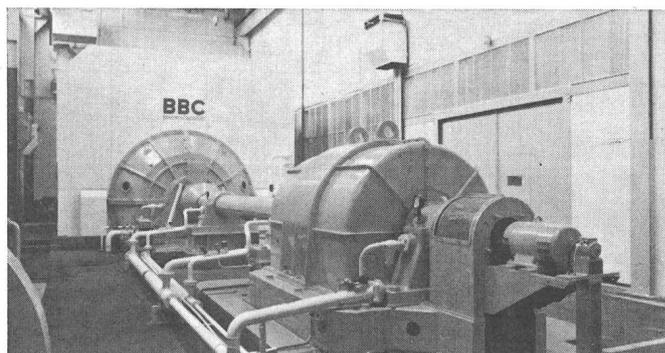


Fig. 3 Kurzschlussgenerator
Leistung 3600 MVA



Fig. 4 Kondensatorbatterie für Synthetikversuche
Energieinhalt 400 kJ

Frequenzbereich	Ursache	Wirkung
50 Hz, 60 Hz ($16^{2/3}$ Hz)	<ul style="list-style-type: none"> - Asymmetrische Leitungskapazitäten und magnetische Kopplung aus dem Hochstromkreis - Isolationsfehler im Sammelschienensystem 	<ul style="list-style-type: none"> - Störströme im Erdungssystem - Kurzschlußstrom im Erdsystem, welcher über der Erdimpedanz einen Potentialtrichter erzeugt
300...800 Hz	<ul style="list-style-type: none"> - Asymmetrische Leitungskapazitäten und magnetische Kopplung aus dem Synthetikkreis - Isolationsfehler im Synthetikkreis 	
≈ 50 kHz...10 MHz	<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudenspektrum bei Rückzündungen im Prüfobjekt, dabei wird in den ersten $10 \mu\text{s}$ die Kapazität unmittelbar beim Prüfling (Zuleitung, Labor, Durchführung) schwingend entladen (di/dt bis $1,5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ [2]) 	<ul style="list-style-type: none"> - Die hohen di/dt erzeugen an den Erdinduktivitäten hohe Spannungen von sehr kurzer Dauer. Diese vermögen aber Überschläge zu zünden. Wird eine Isolationsstrecke überschlagen, an welcher Netzspannung anliegt, so richtet der Folgestrom aus dem Netz grösseren Schaden an.

3. Massnahmen für den Einsatz moderner Elektronik

Bei den Versuchen im Hochleistungslabor der BBC in Baden treten transiente Spannungen bis 800 kV (z.B. Rückzündungen) und Ströme bis 250 kA auf, welche naturgemäss starke elektromagnetische Einstreuungen verursachen. Es müssen daher Massnahmen getroffen werden, die verhindern, dass Überspannungen das Personal gefährden, dass Anlagen und Elektronikkomponenten zerstört werden und Einstreuungen auf Mess- und Steuerleitungen zur Verfälschung der Messergebnisse und zu Fehlauflösungen führen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung moderner Elektronik ist die konsequente Planung und Durchführung von EMV-Massnahmen (EMV = Elektromagnetische Verträglichkeit). Unter EMV versteht man die Fähigkeit elektrischer Betriebsmittel und Systeme, in einer bestimmten elektromagnetischen Umgebung ohne gegenseitige Beeinträchtigung zu funktionieren.

3.1 Im Hochleistungslabor auftretende elektromagnetische Störfelder und ihre Wirkung

Die bei den Versuchen auftretenden elektromagnetischen Felder können sich direkt in eine Mess- oder Steuerschleife einkoppeln und sich dem Nutzsignal als Störspannung überlagern. Wegen der sich ändernden Felder fliessen Ströme im Erdsystem, so dass einzelne Erdpunkte unterschiedliche Potentiale annehmen können, obschon sie galvanisch miteinander verbunden sind. Tabelle II gibt eine Übersicht, mit welchen wesentlichen Störströmen gerechnet werden muss. Es treten also Ströme im ganzen Frequenzspektrum von 50 Hz ($16^{2/3}$ Hz) bis 10 MHz auf. Dies ist ein wesentliches Störspannungs-

problem im Hochleistungslabor, da hochfrequente und niederfrequente Störströme bei vertretbarem Aufwand nicht mit den gleichen Methoden bekämpft werden können. In den folgenden Abschnitten werden die Möglichkeiten der Störspannungsreduktion erläutert.

3.2 Abschirmung bei hohen Frequenzen

Wird ein Leiter von einem hochfrequenten Strom durchflossen, so wird dieser Strom durch Wirbelströme auf die Aussenfläche des Leiters verdrängt. Das Eindringmass δ bezeichnet diejenige Tiefe, bei welcher die elektrische Feldstärke auf den e -ten Teil ihres Oberflächenwertes abgenommen hat.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}}$$

- f = Frequenz (1/s)
- σ = spez. Leitfähigkeit (A/Vm)
- μ = Permeabilität (Vs/Am)

Das Eindringmass ist um so kleiner, je grösser die Leitfähigkeit und die Permeabilität eines Leiters ist. In einer Tiefe von 5δ ist die Feldstärke schon unter 1% ihres Oberflächenwertes abgesunken.

Die Abschirmwirkung einer coaxialen Anordnung kann anhand von Figur 5 erklärt werden [3]. Eine äussere Quelle, z.B. eine Rückzündung im Prüfschalter während des Versuchs, erzeugt im Kabelmantel einen hochfrequenten Wechselstrom I_m . Aufgrund der Stromverdrängung nimmt die Stromdichte nach innen ab. Die sich dem Nutzsignal überlagernde Störspannung U_1 ist gleich dem Integral der elektrischen Feldstärke entlang der Innenkante des Rohres von A nach B und somit vom Eindringmass δ abhängig.

Der sog. Kopplungswiderstand, ein Gütemass für die Abschirmung, ist definiert als Quotient

$$R_K = U_1 / I_m$$

Bei eingepprägtem I_m ist also die Störspannung um so grösser, je grösser der Kopplungswiderstand ist. Er nimmt bei gleichbleibender Wandstärke des Rohres mit zunehmender Frequenz ab, da das elektrische Feld immer weniger einzudringen vermag.

Der Kopplungswiderstand ist abhängig vom Aufbau und von der Länge des Kabelmantels. Näherungsweise kann R_K mit einer Formel von Kaden [4] berechnet werden.

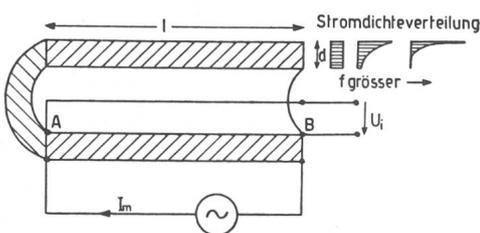


Fig. 5 Abschirmwirkung einer coaxialen Anordnung
 I_m Störstrom der Frequenz f im Kabelmantel
 U_1 Störspannung
 d Dicke des Kabelmantels
 l Länge des Kabelmantels

$$\frac{|R_K|}{R_0} = \frac{2 \frac{d}{\delta}}{\sqrt{\cosh \frac{2d}{\delta} - \cos \frac{2d}{\delta}}} \approx \begin{cases} 1 & \text{für } d < \delta \\ 2\sqrt{2} \frac{d}{\delta} e^{-\frac{d}{\delta}} & \text{für } d > \delta \end{cases}$$

R_0 = Gleichstromwiderstand des Kabelmantels (Ω)

d = Dicke der Abschirmung (m)

In Figur 6 sind die Kopplungswiderstände für einige Abschirmungen dargestellt. Alle Abschirmungen zeigen bei Frequenzen unter 20 kHz einen nahezu konstanten Wert für R_K , da bis zu diesen Frequenzen das Eindringmass nicht wesentlich kleiner als die Wandstärke ist. Darüber nimmt R_K bei den geschlossenen, dichten Abschirmungen wegen des jetzt dominierenden Skin-effektes ab. Kurve 1 zeigt die begrenzte Wirksamkeit eines einfachen Kupfergeflechtes. Da es keine geschlossene Oberfläche besitzt, macht sich der Durchgriff des elektrischen Feldes bei Frequenzen über 200 kHz mit einer Zunahme des Kopplungswiderstandes bemerkbar.

Ist die Kabelabschirmung aus mehreren Stücken zusammengesetzt, so sind an den Stoßstellen Übergangswiderstände $R_{\ddot{u}}$ vorhanden. Diese müssen möglichst klein gehalten werden, da der Spannungsabfall $I_m \cdot R_{\ddot{u}}$ einen wesentlichen Beitrag an die Störspannung U_i liefern kann.

Mit der Abschirmung des Meßsignalpfades kann zuverlässig verhindert werden, dass unzulässige Störspannungen auf den Messeingang gelangen. Ein praktisches Meßsystem ist aber auch mit Steuer- und Speiseleitungen verbunden, welche als Antennen wirken. Damit keine Störspannungen durch diese Hintertüre in die Elektronik gelangen können, müssen diese Leitungen über Durchführungsfilter geführt werden. Figur 7 zeigt den typischen Dämpfungsverlauf eines kommerziell erhältlichen Netzfilters, welches bei Frequenzen über etwa 10 kHz wirksam wird. Eine weitere Möglichkeit wäre die Speisung des Meßsystems aus Batterien, was aber meist aus betrieblichen Gründen unerwünscht ist. Steuersignale können auch über optische Entkopplungsstrecken geführt werden.

Figur 8 zeigt ein Meßsystem in einem Hochleistungsprüfkreis, welches die vorstehenden Grundlagen berücksichtigt und die Anwendung konventioneller Geräte gestattet. Handelsübliche Messgeräte (Transientenspeicher, Oszillographen) für hohe Frequenzen (10 MHz) messen meist asymmetrisch gegen Erde. Ebenso müssen die wichtigsten Signalquellen (kapazitive Teiler, Shunts) einseitig geerdet werden. Die eingekoppelte Störspannung U_i ist abhängig vom Gesamtstrom I_m auf der Kabelabschirmung und den Kopplungs- und Übergangswider-

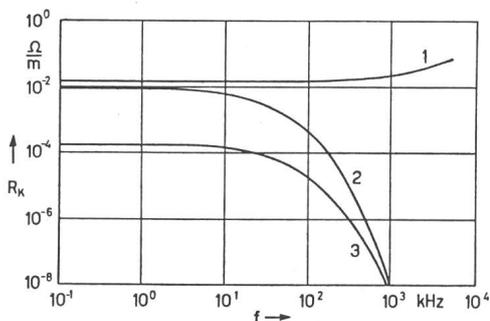


Fig. 6 Frequenzgang der Kopplungswiderstände R_K verschiedener Kabelabschirmungen

- 1 Einfaches Kupfergeflecht [5]
- 2 Eisen-Wellrohr 80/0.2 mm, gerechnet [3]
- 3 Messingrohr 70/2 mm, gerechnet [3]

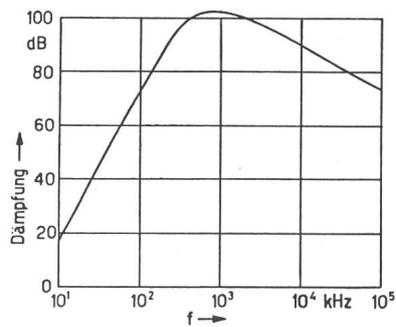


Fig. 7 Frequenzgang der Dämpfung eines kommerziellen Netzfilters

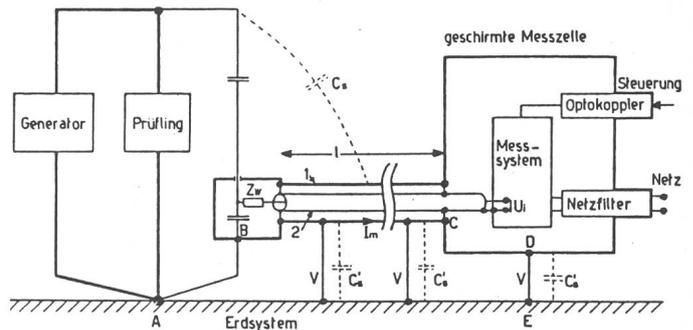


Fig. 8 Hochleistungsprüfkreis mit EMV-Massnahmen gegen hochfrequente Störungen

- 1 Abschirmrohr
- 2 Koaxiales Kabel

ständen zwischen B und C. Dieser Strom fließt beim Zusammenbruch der Spannung im Prüfling aufgrund der magnetischen Einkopplung in der Schleife ABCDE und wegen der kapazitiven Kopplung mit dem Hochspannungskreis über die Streukapazitäten C_s .

Eine nur einseitige Erdung des Aufbaus bei A kann diesen Strom nicht verhindern, da die Stromschleife über die Erdkapazitäten C_s' geschlossen wird. Die einzige Möglichkeit, den Ausgleichsstrom I_m vom Messkabelmantel fernzuhalten, besteht darin, dieses in ein Abschirmrohr zu verlegen. Aufgrund der Stromverdrängung fließt praktisch kein Strom auf dem Messkabelmantel, und damit wird auch die Einstreuung klein. Das Abschirmrohr wird möglichst oft mit dem niederimpedanten Erdsystem verbunden, damit sich die Ströme möglichst in der Nähe des Prüfobjektes ausgleichen können.

Die Verbindung DE ist auch wichtig aus Sicherheitsgründen. Erdpotentialdifferenzen zwischen A und E können sonst unzulässige Berührungsspannungen zwischen geschirmter Messzelle und Erde erzeugen. Die konventionellen Messgeräte werden in einer geschirmten Messzelle betrieben; dadurch werden an die Geräteabschirmungen keine speziellen Anforderungen gestellt. Mit Hilfe von Filtern und Optokopplern wird dafür gesorgt, dass Störspannungen nicht über Netz- und Steuerleitungen eindringen können.

3.3 Abschirmung bei niedrigen Frequenzen

Das Frequenzverhalten des Kopplungswiderstandes und der Filterdämpfung zeigen, dass die in 3.2 beschriebene Technik bei niedrigen Frequenzen (50 Hz) sehr aufwendig wird. Es müssten Rohre mit grossen Wandstärken oder aus teurem, schwierig zu verarbeitendem, hochpermeablem Material ver-

wendet werden. Figur 9 stellt einen für niedrige Frequenzen geeigneten Messaufbau dar. Eine direkte magnetische Einkopplung ist im Koaxialkabel aus Symmetrie Gründen nicht möglich. Da das System nur einseitig geerdet ist, kann wegen der bei niedrigen Frequenzen hohen Erdimpedanz $1/(\omega \cdot C_s)$ kein Mantelstrom fließen. Die Speisung des Messgerätes erfolgt über einen Trenntransformator, welcher für niedrige Frequenzen eine sehr hohe Dämpfung aufweist. Wegen der einseitigen Erdung ist aber wieder das Problem der verschleppten Potentialdifferenzen in einem Störfall vorhanden.

3.4 Übertragung in die Praxis

Die vorstehenden Ausführungen über die Vermeidung von unzulässigen Einstreuungen in die Mess- und Steuerkanäle zeigen, dass der Ingenieur im Hochleistungsprüffeld mit gegensätzlichen Massnahmen konfrontiert wird, wenn der ganze Frequenzbereich von 50 Hz bis 10 MHz wirksam überstrichen werden soll. Die Forderungen des Personenschutzes, des Geräteschutzes, des Störabstandes und des Aufwandes führten zu dem in Figur 10 dargestellten Grundkonzept für die Erdung und Abschirmung.

Der Hochstromkreis und der Hochspannungskreis der Synthetikprüfanlage wird nur am Fusspunkt des Schalters mit dem Anlageerdsystem verbunden, damit im Normalfall nur die induzierten Ströme im Erdsystem fließen können. Alle übrigen elektrisch leitenden Teile der Anlage (Cu-Bodenplatten, Rohre, Stahlträger usw.) werden miteinander verbunden, damit die Impedanz des Erdsystems möglichst klein wird und keine gefährlichen Schritt- und Berührungsspannungen entstehen können.

Wo eine galvanische Verbindung aus Funktionsgründen (Speiseleitungen, Steuerleitungen) nicht möglich ist, werden genau definierte maximale Potentialdifferenzen (Anwendung

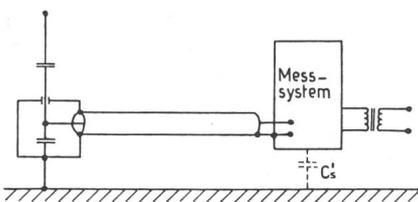


Fig. 9 Messkreis mit Massnahmen gegen niederfrequente Störeinstreuungen

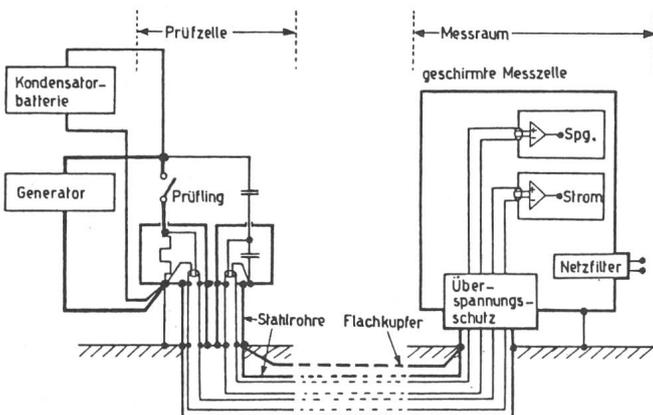
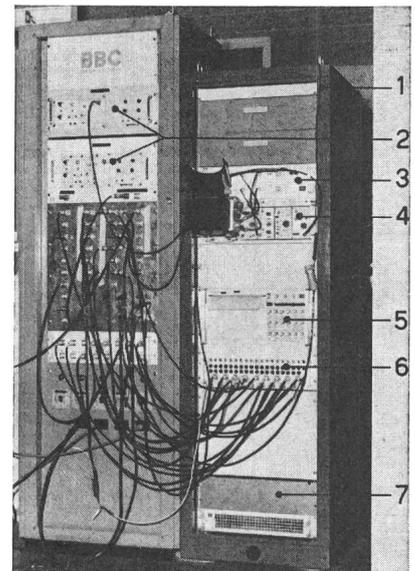


Fig. 10 Erdung und Abschirmung in der Hochleistungs-Synthetikprüfanlage

Fig. 11
Moderner elektronischer Messplatz

- 1 HF-dichter 19"-Schrank
- 2 Steuergeräte
- 3 Schutzschaltung für Oszillograph
- 4 2-Strahl-Oszillograph
- 5 18-Kanal-UV-Schreiber mit Faseroptik
- 6 Schutzschaltung für UV-Schreiber
- 7 Netzfilter



von Funkenstrecken, Gasableitern, Varistoren, Transzorbiodioden usw.) zugelassen oder die Leitungen gegen Erde abgeblockt (Blockkondensatoren, Filter). Rückzündungen treten häufig auf bei Entwicklungsversuchen an der dielektrischen Grenze des Prüfobjektes und bei der Aufnahme der Spannungskennlinie. Aus diesem Grunde sind diese Massnahmen wesentlich zur Verhinderung von Schäden in der Anlage.

Die einseitige Erdung der Messkanäle, wie sie für niedrige Frequenzen nach 3.3 sinnvoll ist, kann nicht angewendet werden. Potentialdifferenzen zwischen Prüfmesszelle und Messraum würden durch das Messkabel verschleppt und können das Personal gefährden und Überschlüge erzeugen. Es wird daher die in Figur 8 dargestellte Schirmungsmethode angewandt. Die Messleitungen werden über grössere Strecken in einem geschlossenen Rohr geführt, zu welchem Flachkupferschienen zur Verminderung der Impedanz parallelgeschaltet sind. Das Signal wird auf einer geschirmten Zweidrahtleitung geführt und differentiell gemessen. Die am Gleichstromwiderstand des Schirmrohres bei niedrigen Frequenzen abfallende Spannung erscheint dadurch als Gleichtaktspannung am Verstärkereingang, wo sie gut unterdrückt werden kann. Die gemessene Gleichtaktspannung beträgt im Labor der BBC Baden, je nach Schaltung, zwischen 0,5 und 0,9 V Scheitelwert bei einer Prüfung mit 50 kA_{eff} Kurzschlußstrom. Bei Spannungszusammenbrüchen im Prüfling (Rückzündungen) von 475 kV wurde ein Spitzenwert von 0,5 V gemessen.

Im Messraum werden die Messgeräte in hochfrequenzdichten Schränken betrieben, wie sie auf dem Markt erhältlich sind. Die Netzzuführung wird mit Trenntransformatoren und Netzfiltern abgeblockt.

Werden die genannten Richtlinien konsequent eingehalten, so ist ein störungsfreier Betrieb von empfindlicher Elektronik im Hochleistungslabor möglich. Figur 11 zeigt einen modernen Messplatz mit analoger Registrierung, welcher mit handelsüblichen Messgeräten und den notwendigen Schutzelementen ausgerüstet ist.

4. Schlussbetrachtungen

Das Erdungskonzept in der bestehenden Hochleistungsprüfanlage konnte mit geringem Aufwand verbessert werden. Mit den präsentierten Grundsätzen konnte ein Weg vorge-

zeichnet werden, der bei konsequenter Einhaltung den erfolgreichen Einsatz von moderner, hochempfindlicher Elektronik ermöglichte. Einige dieser Richtlinien wurden an Hochschulen unter quasi idealen Bedingungen erarbeitet und unter z.T. schwierigen, den betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekten Rechnung tragenden Umständen an die Praxis angepasst. Dadurch konnten wesentliche Verbesserungen in der komplexen Versuchsablaufsteuerung, der Messdatenerfassung und -auswertung erreicht werden. Ebenso erlaubt der Einsatz modernster Elektronik, das Hochleistungsprüffeld auf dem neuesten, den Errungenschaften im Komponentenbau angepassten Stand zu halten und dadurch auch weiterhin bei Neuentwicklungen an vorderster Front präsent zu sein.

Literatur

- [1] *E. Slamecka*: Die Beanspruchung von Hochspannungsleistungsschaltern in synthetischen Prüfschaltungen. ETZ-A 86(1965)3, S. 68...75.
- [2] *A. Braun* und *H. Huber*: Prüfung von Leistungsschaltern mit synthetischen Methoden. Brown Boveri Mitt. 60(1973)4, S. 185...190.
- [3] *P. Wiesendanger*: Automatische, digitale Aufzeichnung und Auswertung von transienten Signalen in der Hochspannungstechnik. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 5863, 1977.
- [4] *H. Kaden*: Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. 2. Auflage. - Technische Physik in Einzeldarstellungen Bd. 10 - Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1959.
- [5] *A. Schwab* und *J. Herold*: Elektromagnetische Interferenzerscheinungen in Hochspannungslaboratorien. In: Jahresbericht des Hochspannungsinstitutes der Technischen Hochschule Karlsruhe, 1974, S. 18...20.

Adresse der Autoren

Rudolf Baumgartner, Dr. sc.techn., dipl. El.-Ing. ETH, Leiter des Elektroniklabors, und *Ernst Lang*, dipl. El.-Ing. ETH, Leiter des Ressorts Kurzschluss-Versuchsanlage, Abteilung Entwicklungsversuche Apparate, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.