

Gedanken zur Entwicklung der Hochspannungsprüf- und Meßtechnik

K. Feser, Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

Zusammenfassung: Es wird über neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochspannungsprüftechnik berichtet. In einem Anhang ist der Stand der Technik, wie er sich heute darstellt, in einem Beitrag, den der Verfasser für das 6. ISH in New Orleans geschrieben hat, wiedergegeben. Darauf aufbauend werden zukünftige Entwicklungen, die sich insbesondere durch den Einsatz der Mikroelektronik in der Prüftechnik ergeben, dargestellt.

Neben der Entwicklung neuer Sensoren, oft auf Halbleiterbasis, für die Aufnahme der Meßgrößen, werden auch komplizierte Algorithmen für die Beurteilung eines Prüfergebnisses entwickelt, die einen wesentlich tieferen Einblick in das physikalische Modell erlauben. Bei all diesen Neuentwicklungen ist für die Prüftechnik die Online-Verarbeitung und Darstellung des Ergebnisses eine entscheidende Qualitätsverbesserung. Auch "lernfähige" Systeme, sog. Expertensysteme, werden zunehmend in der Beurteilung von Prüfergebnissen eingesetzt.

An einigen Beispielen wird die derzeitige Entwicklung bei den Sensoren, den Algorithmen bei der Meßwertverarbeitung und bei vollautomatischen Prüfabläufen beschrieben.

1. Einleitung

Die Mikroelektronik ist eine Schlüsseltechnologie, die eine grundsätzliche Veränderung der gesamten Prüf- und Meßtechnik bewirken wird. Insbesondere werden durch die Mikroelektronik die Steuerung, Regelung, Überwachung, Erfassung, Auswertung, Beurteilung und Simulation von Prüfvorgängen verändert. Dabei hilft die Mikroelektronik, die Informationsflut während der Prüfung zu bewältigen, Informationsmängel zu beheben, Simulationsrechnungen vor einer Prüfung durchzuführen oder den Prüffingenieur von Routinearbeit zu entlasten. Für einen bestimmten Prüfvorgang werden mehr Sicherheit, mehr Komfort und eine bessere Qualität erreicht.

Zusätzliche innovative Entwicklungen der heutigen Informationsgesellschaft, wie die Lichtwellenleitertechnik mit ihrer erhöhten Übertragungskapazität und ihrer reduzierten Störbeeinflussung und die Bustechnik, d.h. der geregelte Datenaustausch zwischen vielen dezentralen "intelligenten" Stationen, haben dazu geführt, daß wir heute von der 3. industriellen Revolution, "der elektronischen Vervielfältigung der menschlichen Routineintelligenz" durch die Mikroelektronik sprechen. Bei Prüf- und Qualitätssicherungskosten energietechnischer Produkte, die oft bis zu 30 % der Herstellkosten betragen können, wird der enorme Aufwand, der in die Automatisierung von Prüfvorgängen investiert wird, verständlich.

Für die zukünftige Entwicklung der Prüftechnik ist auch die Entwicklung der Prüfvorschriften zu beachten. Momentan wird die IEC Publikation 60 Teile 1-4 überarbeitet. Während bei der Überarbeitung der Teile 1 und 2 als wesentliche Neuerungen die Stab-Stab-Funkenstrecke als Checkfunkenstrecke bei Gleichspannungen und die Kugelfunkenstrecke bei Schaltstoßspannungen eingeführt wurden, wird die Überarbeitung der Teile 3 und 4 doch wesentlich größere Änderungen an der bisherigen Prüfpraxis bringen. Die Kalibrierung von Meßeinrichtungen soll bevorzugt durch Vergleichsmessungen mit Referenzsystemen erfolgen.

Entsprechend dem technischen Fortschritt wird die IEC Publikation 790, die sich mit Stoßvoltmetern und Oszillographen für die Hochspannungsprüftechnik beschäftigt, um eine neue Prüfvorschrift erweitert, die die digitale Meßtechnik, die sog. Transientenrekorder, behandelt. In dieser Vorschrift werden die Anforderungen aus der Hochspannungsprüftechnik an diese Meßgeräte formuliert. Besonders zu beachten sind dabei die Genauigkeit (vertikal, horizontal), die Kalibrierung und die elektromagnetische Verträglichkeit dieser Geräte.

2. Mikroelektronik als innovativer Antrieb in der Prüftechnik

Die Weiterentwicklung prüftechnischer Systeme durch die Mikroelektronik liegt vor allem in deren Meß- und Steuertechnik und in der Simulationstechnik. Auf folgenden Gebieten sind wesentliche Fortschritte zu erwarten:

- o Sensorik, Aktorik, z.B. neue physikalische Prinzipien der Spannungsmessung, der Druckmessung oder der Temperaturmessung, anwendungsspezifische Lösungen, "intelligente" Sensoren
- o Datenerfassung und Protokollierung, z.B. Überwachung eines Prüfvorganges, Revisionsintervalle für Prüfgeräte

- o Betrieb von Prüfsystemen, z.B. alle Steuerungen und Regelungen, Zustandserkennung, Einstellen von Schutzeinrichtungen, Erkennen von Grenzbelastungen
- o Meßwerterfassung und -verarbeitung, z.B. Spannungsmessung, optimale anwendungsspezifische graphische Darstellung
- o Schutzeinrichtungen, z.B. von Maschinen und Prüftransformatoren
- o Überwachungseinrichtungen, z.B. Isolationszustand von Isoliersystemen (Transformatoren)
- o Test- und Simulationsverfahren, z.B. Entwicklung optimaler Prüfverfahren, Modellierung komplexer Prüfschaltungen

Mit der Entwicklung neuer Hardware- und Softwarestrukturen wird die technische Entwicklung kompletter prüftechnischer Systeme durch die Mikroelektronik auch in Zukunft entscheidend beeinflusst. In der Hardware zeichnet sich eine weitere Erhöhung der Packungsdichte ab, die durch kleinere Signalpegel (3 V), kleinere Strukturen ($< 1 \mu\text{m}$) und durch dreidimensionale Aufbauten realisiert wird. Verteilte Rechnerstrukturen (Multiprozessorsysteme, Transputer), höhere Speicherdichten und schnellere Bussysteme erhöhen die Verarbeitungsleistung.

In der Erstellung der Software zeichnen sich verbesserte Engineering-Verfahren und Hilfsmittel (Tools) ab, z.B. für das Erkennen von wiederverwendbarer Software aus alten Projekten, oder die Überprüfung einer Software mit anerkannten Regeln bzw. Vorschriften. In Zukunft könnte auch die Planung der EMV in die Software-Erstellung von Systemen eingebunden sein. Momentan wird eine Software für einen EMV-gerechten Leiterplattenentwurf entwickelt.

Weitere Trends in der Softwareentwicklung nehmen auf die Parallelstrukturen der Rechner Rücksicht, z.B. durch Betriebssysteme, die eine automatische Verteilung der Programme an verschiedene Rechner ermöglichen werden. Besonders wichtig für die Akzeptanz neuer Systeme ist ein erhöhter Bedienungskomfort an der Mensch-Maschine-Schnittstelle, der in besonderer Weise auf die jeweilige Prüftechnik zugeschnitten sein sollte.

In der Prüftechnik werden Verbesserungen bzw. Vorteile durch den Einsatz mikroelektronischer Bauteile bzw. informationstechnischer Verfahren erwartet

- o durch eine schnellere Diagnose eines Prüfvorganges
- o durch die optimale Darstellung eines Prüfergebnisses
- o durch das sofortige Erstellen eines Prüfberichtes
- o durch einen schnelleren und sichereren Wiedereinsatz der Prüfanlage nach Störungen, z.B. durch eine schnellere und zielsicherere Störanalyse

- o durch geringeren Schaden, z.B. durch gezielte Abschaltung bei Überlast bzw. Störungen
- o durch kontinuierliche Vorausberechnungen und Vergleich mit wissensbasierten Systemen, z.B. durch Erkennen kritischer Situationen
- o durch regelmäßige Kontroll- und Prüfverfahren, die Revisionen und Wartungsintervalle adaptiv festlegen
- o durch Simulationsverfahren

3. Prüfspannungsquellen

In der Entwicklung von Prüfanlagen für die heute genormten Prüfspannungen sind keine spektakulären Änderungen zu erwarten, da die Prinzipien der Spannungserzeugung (mit Transformatoren, mit der Marxschen Vervielfachungsschaltung für Stoßspannungen oder der Greinacher-Schaltung für Gleichspannungen) seit langem bekannt sind und sich bewährt haben. Die technische Weiterentwicklung von Materialien und das bessere Wissen um Grenzbelastungen lassen aber eine kontinuierliche Weiterentwicklung der heute üblichen Schaltungen erwarten. Mit der Automatisierung von Prüfvorgängen zeichnet sich aber eine Tendenz zu auf einen bestimmten Prüfling optimierte Konstruktionen (z.B. gekapselte Spannungsquellen für SF₆-gekapselte Prüflinge) oder in die Fertigung integrierte, zugeschnittene Lösungen ab.

In der Fachwelt wird neu die Notwendigkeit von Steilstoßprüfungen diskutiert. Während die Notwendigkeit einer Steilstoßprüfung für Kappenisolatoren mit der Erarbeitung einer entsprechenden Prüfvorschrift bereits festzustehen scheint, wird die Notwendigkeit einer Steilstoßprüfung bei SF₆-isolierten Anlagen kontrovers diskutiert. Verschiedene Fehler, die nach Trennerschaltungen in SF₆-isolierten Anlagen aufgetreten sind, obwohl eine Vor-Ort-Prüfung mit Wechsel- oder Schaltstoßspannungen durchgeführt wurde, haben diese Diskussion ausgelöst. Betrachtet man die physikalischen Zusammenhänge, die zu diesen Fehlern geführt haben, so erkennt man die Notwendigkeit, das Prüfprocedere Vor-Ort und im Werk zu überdenken und entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Konstruktionen und Isolationssysteme anzuwenden. Für gewickelte Apparate, z.B. Transformatoren, ist eine abgeschnittene Blitzstoßprüfung für den Nachweis einer verträglichen Spannungsverteilung und von fehlenden Resonanzüberhöhungen bis zu den in der Praxis möglichen Frequenzen durchzuführen. Bei Trennerschaltung in SF₆-Anlagen können Frequenzen von einigen MHz an der Durchführung eines direkt angeschlossenen Transformators

auftreten. Die Abschneideeinrichtung bei der Werksprüfung des Transformators muß diese Steilheit nachbilden können. Hierfür sind Mehrfachabschneidfunkkenstrecken bei hohen Spannungen notwendig. Isolationssysteme in SF_6 haben bei den steilen Impulsbeanspruchungen eine höhere Festigkeit als bei Blitzstoßspannungen. Deshalb ist die Blitzstoßspannungsprüfung für den Nachweis der korrekten Dimensionierung ausreichend. Die Durchschläge bei Trennerschaltungen in SF_6 -Anlagen sind auf Fehlstellen zurückzuführen, die während der Vor-Ort-Prüfung entdeckt werden müssen. Die Diagnostik "Durchschlag" ist ein sehr grobes Mittel, das durch verbesserte diagnostische Verfahren, z.B. die Teilentladungsmessung, ersetzt werden muß. Eine Steilstoßprüfung wird auch für leittechnische Systeme gefordert. Diese sogenannten EMP-Prüfungen erzeugen elektromagnetische Felder mit Anstiegszeiten von 5 ns unter größeren Antennenanlagen. Für alle diese Steilstoßprüfungen sind optimale Hochspannungskreise und die dazu notwendige Meßtechnik zu entwickeln.

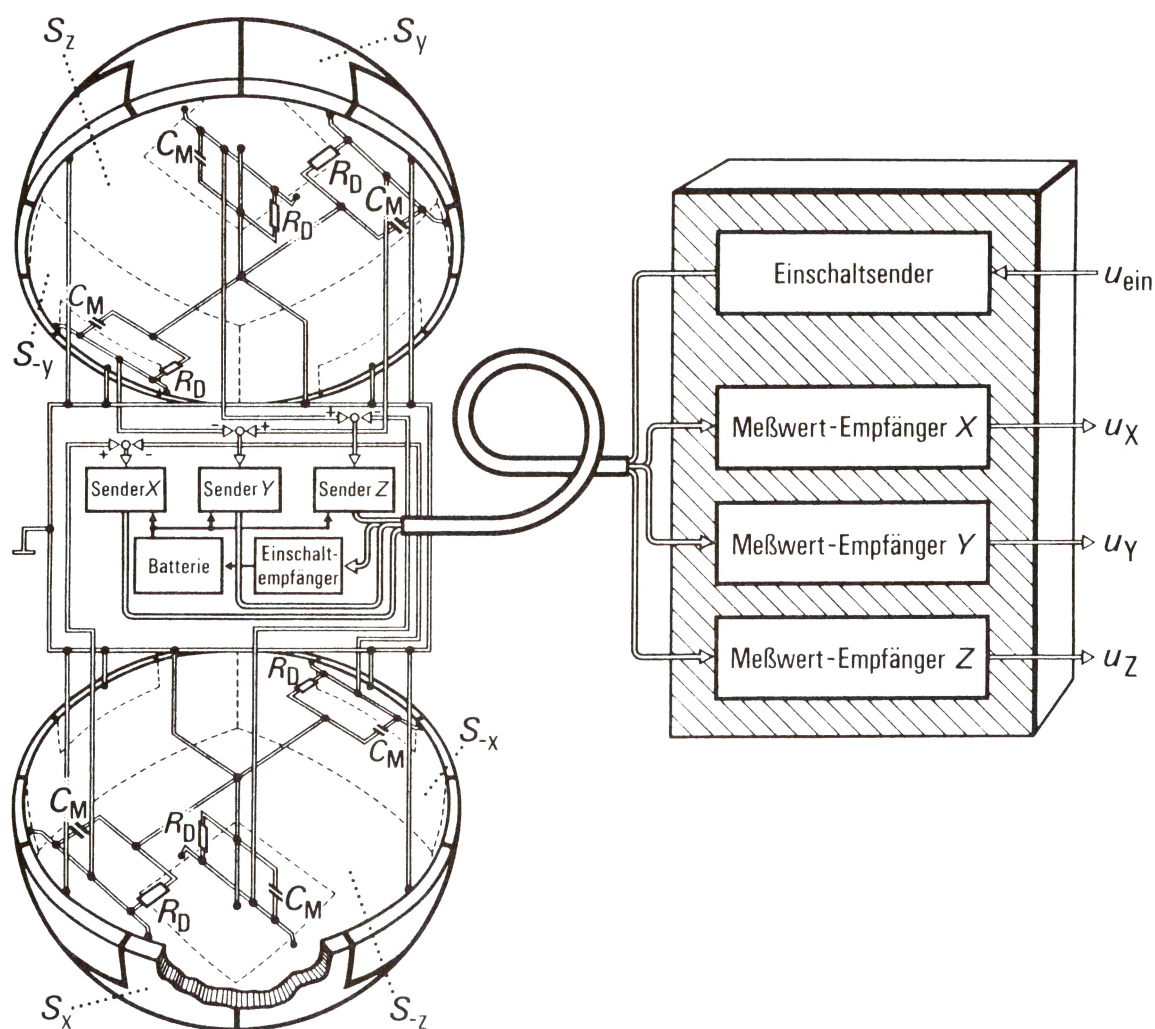


Fig. 1: Blockschaltbild der Kugelfeldsonde /1/

4. Meßwerterfassung

Zur Beurteilung von Prüfergebnissen sind physikalische Größen zu erfassen. In der Hochspannungsprüftechnik sind dies im wesentlichen Spannungen, Ströme und Feldstärken. Die Klimadaten (Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Verschmutzung) können das Isolationsverhalten mitbeeinflussen und werden deshalb während einer Hochspannungsprüfung ebenfalls registriert.

Auf dem Gebiet der Sensoren, z.B. Spannungsteiler für hohe Spannungen, sind durch die Mikroelektronik bzw. die Mikrosystemtechnik und die Optoelektronik neue Impulse zu erwarten. Fig. 1 zeigt z.B. das Blockschaltbild eines neuentwickelten Meßgerätes für die Messung transienter elektrischer Felder /1/. Diese Kugelfeldsonde erlaubt auch die praktisch rückwirkungsfreie Messung von hohen Spannungen /2/. Mit der Kugelfeldsonde kann infolge der hohen Bandbreite des Meßsystems von über 25 MHz auch das Ergebnis bei der Prüfung mit abgeschnittenen Blitzstoßspannungen, z.B. bei Transformatoren, entscheidend verbessert werden. Fig. 2 zeigt eine Vergleichsmessung der Kugelfeldsonde mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler mit einer Nennspannung von 1,6 MV.

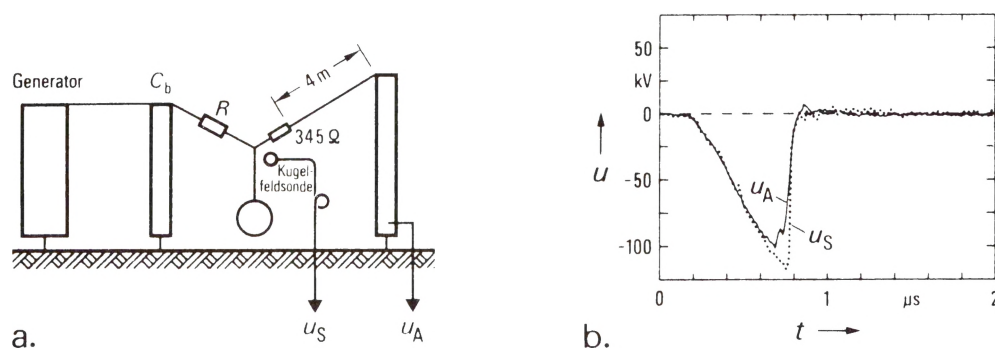


Fig. 2: Vergleichsmessung einer abgeschnittenen Blitzstoßspannung mit dem Kugelfeldsensor (u_S) und einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler (u_A) /2/

a. Anordnung

b. Spannungssoszillogramme

Man erkennt aus Fig. 2b, daß die abgeschnittene Blitzstoßspannung, gemessen mit der Kugelfeldsonde (u_S) im Bereich des Spannungsmaximums von der Spannung, gemessen mit einem Spannungsteiler, abweicht. Die Ursache ist die begrenzte

Bandbreite des Spannungsteilers infolge seiner räumlichen Ausdehnung, die physikalisch bedingt ist.

Die Entwicklung neuer Sensoren ist aus heutiger Sicht in der Hochspannungsprüftechnik auf wenige Anwendungen begrenzt. Die klassischen Sensoren werden auch in Zukunft die Prüftechnik beherrschen. Vollkommen neu werden aber die Geräte zur Erfassung der physikalischen Größen sein. Hier wird mit der Digitaltechnik und dem Mikrocomputer eine neue Generation von Meßgeräten entwickelt, die momentan in der Hochspannungsprüftechnik, auch in Routineprüfungen, Eingang finden. Durch die Reduzierung des Leistungs- und Raumbedarfs mikroelektronischer Produkte und ganz wesentlich die fallenden Kosten bei zunehmender Integration ist eine eindeutige Tendenz zu "intelligenten" Meßgeräten, d.h. Meßgeräten mit integrierten Mikrorechnern, zu beobachten. Dies hat den wesentlichen Vorteil, daß bestimmte Auswertungen bereits im Meßgerät erfolgen können und damit auch sofort angezeigt werden können. Fig. 3 zeigt das Blockschaltbild eines "intelligenten" digitalen Meßgerätes, das speziell für die Hochspannungsprüftechnik entwickelt wurde.

Die Software wertet die erfaßten physikalischen Größen, z.B. die Spannung, nach einer bestehenden Prüfvorschrift, z.B. IEC 60-1 bis 4, aus, und das Prüfergebnis wird in einer mit dem Prüflingenieur vereinbarten Form angezeigt und, falls gewünscht, protokolliert. Durch die digitale Erfassung physikalischer Größen und die bequeme Weiterverarbeitung mit einem Mikrorechner können komplizierte Algorithmen, die Prüfergebnisse optimal darstellen oder Prüfgrößen überwachen, wirtschaftlich eingesetzt werden.

Die größte Schwierigkeit beim Einsatz neuer digitaler Meßgeräte in der Hochspannungsprüftechnik ist die elektromagnetische Verträglichkeit dieser Geräte, die in der Regel mit einem Verarbeitungspegel von wenigen Volt arbeiten. Handelsübliche Geräte, die nicht speziell für die Hochspannungsprüftechnik entwickelt wurden, müssen deshalb in geschirmten Kabinen betrieben werden oder mit speziellen Schutzschaltungen versehen werden. Besonderes Augenmerk ist dabei dem analogen Teil jedes Meßgerätes zuzuwenden. Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) muß auch unter extremsten Bedingungen im Hochspannungslabor bei elektrischen Störfeldern mit Anstiegszeiten um einige ns und mit Amplituden um einige 10 kV/m sichergestellt werden. Der digitale Teilbereich und die Peripherie sind für eine optimale Darstellung auszuwählen. Es deuten sich zunehmende Kosten für den analogen Teil und abnehmende Kosten für den digitalen Bereich und die Peripherie an. Die Einsatzbereitschaft dieser

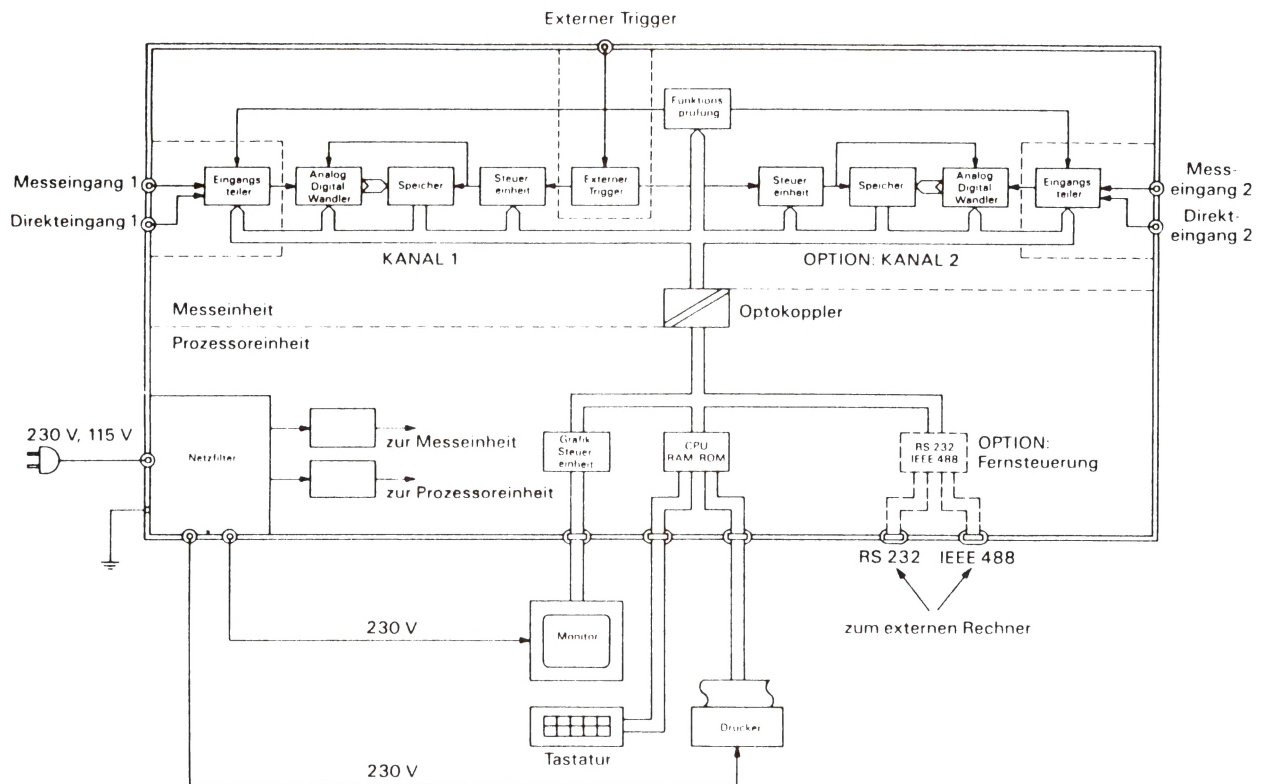


Fig. 3: Blockschaltbild eines digitalen Meßgerätes, z.B. Transientenrekorder

neuen Generation von Geräten wird auch durch die optimale Abstimmung von Hardware, Firmware und Software bestimmt. Ein- und Ausgabemöglichkeiten sowie die kundenspezifische Darstellung von Ergebnissen bestimmen, neben den Kosten, die Wahl eines digitalen Meßgerätes. Spezifische Probleme der Digitalisierung (z.B. Abtastung Δt , Auflösung (bit)) sind bei einer zu lösenden Meßaufgabe zu beachten. Durch die Bearbeitung der Meßwerte im Mikrorechner mit bestimmten Algorithmen ist ein "Umdenken" nötig. In den für die Normung wichtigen Gremien (z.B. IEC, VDE) wird diskutiert, inwieweit die "Rohdaten" einer Messung dem Prüflingenieur zugänglich sein sollen.

Durch die enorm gefallenen Kosten und die Qualitätsverbesserung werden Standard-PCs durch Zusatzkarten zu komplexen Meßgeräten erweitert. Dieser Trend wird weitergehen, da auf diese Weise die Bearbeitung und Visualisierung von Prüfergebnissen optimal vereinfacht wird. Im Hochspannungsprüffeld könnte dabei die Anbindung des Standard-PCs über eine optische Verbindung zu einem die EMV-Bedingungen im Prüffeld beherrschenden Erweiterungsmodul erfolgen. Die elektronischen Karten für diesen Modul werden heute bereits standardmäßig angeboten.

Die Vorteile einer Lösung mit einem PC liegen vor allem:

- o auf der weitestgehend vereinheitlichten Hardware (Kompatibilität)
- o in der Herstellung in Großserien (preisgünstig und zuverlässig)
- o in zuverlässig dokumentierten Systembausteinen und Schnittstellen
- o in einem durch Zusatzplatinen erweiterbaren Rechnersystem
- o im Standardbus mit vielfältig verfügbaren Zusatzplatinen
- o in einem standardisierten, sehr gut erprobten Betriebssystem
- o in einer komfortablen, leicht erlernbaren Bedienung auch komplexer Programme
- o in einer vielfältigen Software, die preisgünstig angeboten wird.

Der wesentliche Fortschritt der digitalen Meßtechnik mit angeschlossenen Mikrorechnern oder PCs ist in dem Einsatz von erweiterten und verbesserten Algorithmen für die Beurteilung eines Prüfergebnisses zu sehen. Oft werden dadurch erst eindeutige Prüfergebnisse ermöglicht und damit Prüfkosten reduziert. Zwei Beispiele sollen diese Möglichkeiten, die oft erst durch Normenänderungen eingeführt werden können, verdeutlichen. Die Blitzstoßspannungsprüfung von Transformatoren wird heute üblicherweise beurteilt durch den Vergleich der Spannungs- und Stromoszillogramme bei reduzierter, z.B. 62 %, und voller Prüfspannung (100 %). Es ist oft sehr schwierig, aufgrund der geringen Änderungen im Stromoszillogramm einen Fehler in der Wicklung von einem Durchschlag außerhalb des Transformators, z.B. im Erdungssystem, zu unterscheiden. Die Berechnung der Übertragungsfunktion $T(f)$ des Transformators aus der Eingangsspannung und dem Strom gegen Erde ist eine völlig neue Methode, die Transformatorprüfung sicherer zu machen /3/. Man kann eindeutig einen Fehler im Transformator von einem Überslag außerhalb unterscheiden (Fig. 4). Für den Einsatz dieser Methode in der täglichen Transformatorenprüfung sind noch Erfahrungen mit verschiedenen Transformatorkonstruktionen nötig. Über den Einsatz dieser Methode im Transformatorwerk der Siemens AG in Nürnberg /4/ wird berichtet.

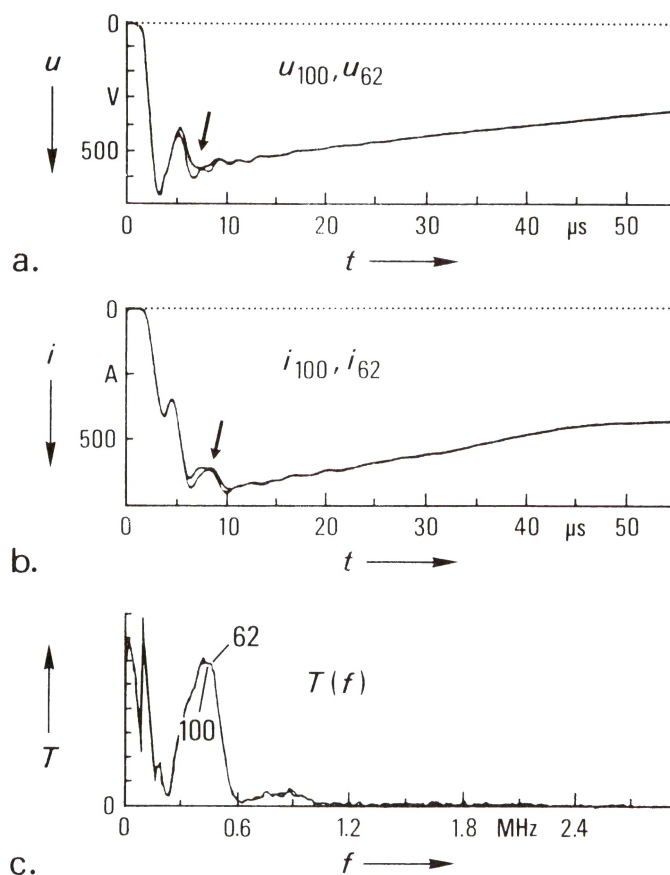


Fig. 4: Blitzstoßprüfung einer 16 kV Transformatorwicklung bei reduzierter (62 %) und voller (100 %) Amplitude /3/
a. Spannungsvergleich
b. Stromvergleich
c. Übertragungsfunktion

Das zweite Beispiel neuer verbesserter Algorithmen, die die Beurteilung von Prüfergebnissen wesentlich erleichtern können, ist die Unterdrückung sinusförmiger Störer in der Teilentladungsmeßtechnik mit einem adaptiven Filteralgorithmus /5/. Fig. 5 zeigt die einzelnen Schritte von der Messung im Zeitbereich mit Störsignalen, der Unterdrückung von Störfrequenzen im Frequenzbereich mit einem adaptiven Filter und der Rückrechnung des Meßsignales in den Zeitbereich ohne die sinusförmigen Störer.

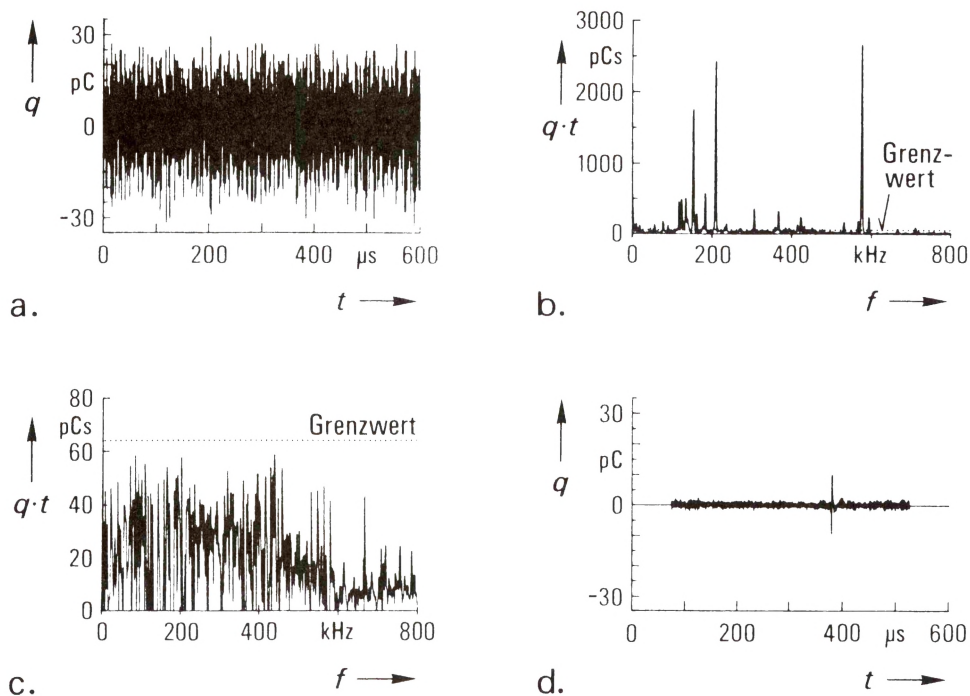


Fig. 5: Unterdrückung sinusförmiger Störgrößen

bei der Teilentladungsmeßtechnik /5/

a. Messung im Zeitbereich

b. Messung umgerechnet in der Frequenzbereich

c. Messung im Frequenzbereich nach dem Nullsetzen einiger Frequenzen
(alle Frequenzen mit Amplitudendichten über 64 pCs)

d. Rückrechnung des Ergebnisses c. in den Zeitbereich

Man erkennt nach der Bearbeitung eindeutig die Teilentladung im Prüfling (Fig. 5d), die in der primären Messung (Fig. 5a) infolge der sinusförmigen Störer nicht erkennbar war. Dieses Verfahren wurde an der Universität Stuttgart offline entwickelt und soll jetzt für die Prüfpraxis on-line weiterentwickelt werden. Auch über dieses Verfahren wird auf diesem Symposium im Detail berichtet.

Der Einsatz der Rechner für die Auswertung von Prüfergebnissen und deren Beurteilung führt unmittelbar zu Expertensystemen. Heute ist der Prüflingenieur der Experte, der sehr oft alte Meßergebnisse hervorholt und vergleicht. Diese Aufgabe kann von einem Rechner wesentlich schneller und genauer ausgeführt werden. Insbesondere können auch typische Fehlerbilder für einen bestimmten Prüfling gespeichert werden und mit einem aktuellen Prüfergebnis korreliert werden. Auf diese Weise ist neben der Fehlerursache eventuell auch eine Fehlerortsbestimmung denkbar. Die "Erfahrung" bzw. das "Wissen" ist in einem

PC jederzeit verfügbar, womit eine enorme Qualitätsverbesserung in der Prüfung denkbar wird. Heute können wir erste Schritte in diese Richtung beobachten. Auf diesem Symposium wird es auch zu diesem Thema einen Beitrag geben.

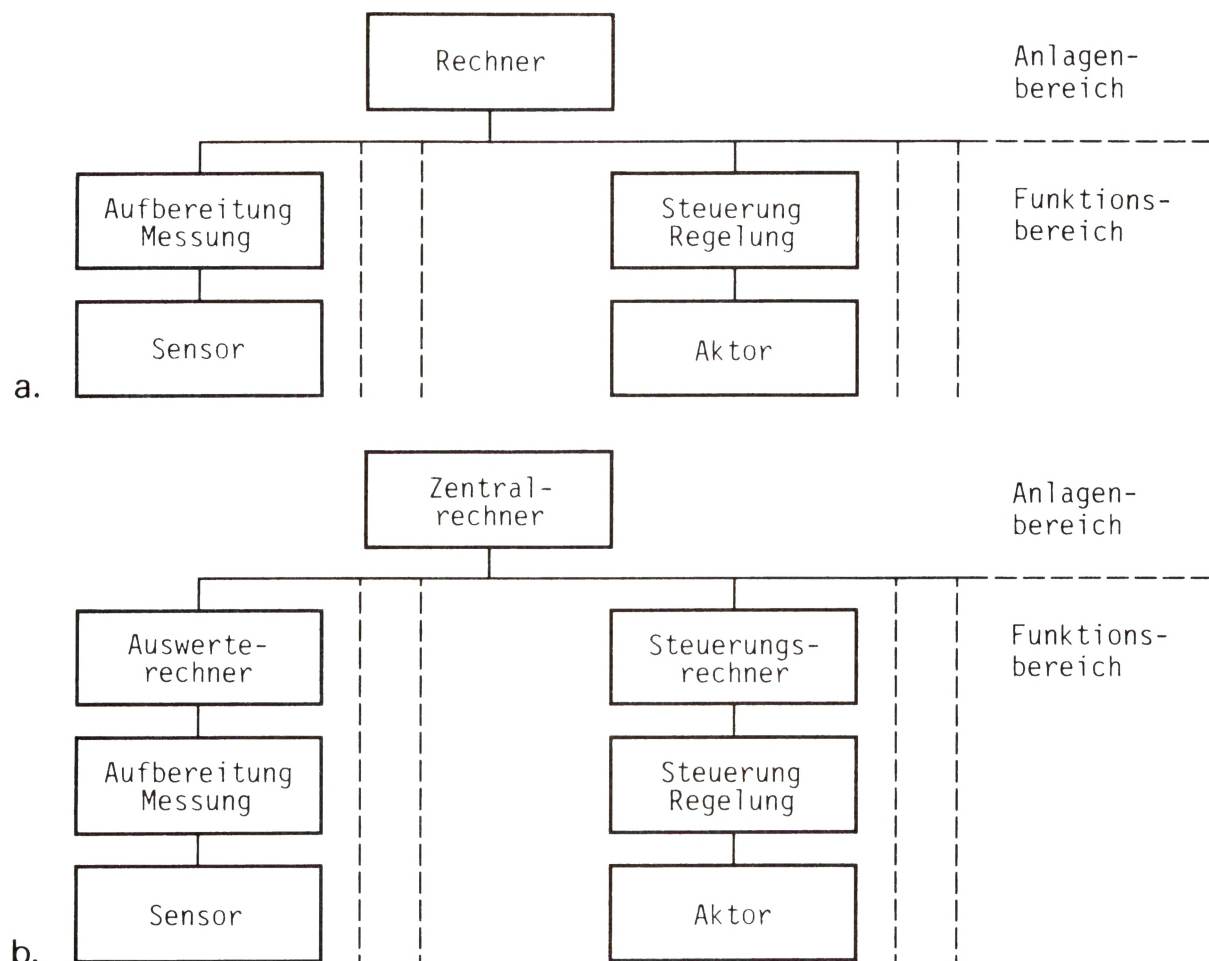


Fig. 6: Lösungsansätze bei vollautomatisierten Hochspannungsprüfsystemen

a. mit Zentralrechner

b. mit dezentralen Mikrorechnern

5. Automatisiertes Hochspannungsprüfsystem

Die digitale Meßwerterfassung ist die Voraussetzung für ein vollautomatisiertes Hochspannungsprüfsystem. Durch die Rückführung der Meßgrößen und Aktoren, die diese Information auf der Erzeugerseite umsetzen, entsteht ein geschlossener Regelkreis. Werden jetzt die Prüflingsaufnahme, der Prüflingsanschluß und die Entnahme des Prüflings aus dem Prüfkreis automatisiert, spricht man von einem automatisierten Hochspannungsprüfsystem. Für ein vollautomatisiertes Prüfsystem werden zwei Konzeptionen diskutiert (Fig. 6).

In Fig. 6a ist ein Lösungsansatz dargestellt, der sich vor allem für die Automatisierung einer bestimmten Aufgabe eignet, in Fig. 6b ist ein Lösungsansatz gezeigt, der bei sehr komplexen Prüfungsvorgängen angestrebt wird, vor allem, wenn die Auswerte-Algorithmen sehr komplex und zeitaufwendig sind.

Die Realisierung einer Automatisierung erfolgt in der Industrie nur, wenn der Nutzen insgesamt für die Automatisierung der Hochspannungsprüfung spricht. Bei dieser vergleichenden Abschätzung sind die technischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Vor- und Nachteile abzuwägen.

Da in der Regel eine Automatisierungsaufgabe schrittweise realisiert wird, ist es für einen Anwender wichtig, daß Geräte der alten Generation, z.B. analoge Geräte, mit Geräten der neuen Generation zusammenarbeiten können. Dies wird über entsprechende Schnittstellen, die auch den Anschluß von Geräten verschiedener Hersteller erlauben, realisiert.

Bei der Entscheidung für eine Automatisierung sind für den Anwender folgende Kriterien besonders zu beachten:

o das Systemkonzept

- leichte Datenänderung
- leichte Einbindung neuer Funktionen
- Notbetrieb (Handbetrieb)
- Mensch-Maschine-Kommunikationsmöglichkeiten

o die Art der Implementierung

- benutzerfreundliche Darstellung
- rechnergestützte Dateneingabe
- Informationsgehalt von Anzeigen

o die Wartungsfreundlichkeit

- höhere Programmiersprachen
- Selbstüberwachung und Fehlerdiagnose

Betrachten wir die heutige Situation, so müssen wir erkennen, daß die Automatisierung von Hochspannungsprüfungen in folgenden Bereichen eingesetzt wird:

- o bei der Routine-Prüfung von Produkten mit großer Stückzahl, z.B. ZnO-Ableiterscheiben, Vakuumschalter, Stützisolatoren für GIS-Anlagen, Stromwandler im Niederspannungsbereich, Verteiltransformatoren
- o bei der statistischen Untersuchung von selbstheilenden Isolationssystemen, z.B. Durchschlag in Gasen (Luft, SF₆)
- o bei sehr komplexen Prüfverfahren für relativ teure Prüfobjekte, z.B. Transformatoren, EMP-Prüfungen an Leitsystemen und Fahrzeugen

6. Besondere Aspekte beim Einsatz der Mikroelektronik in der Hochspannungsprüftechnik

Die bereits erwähnte Empfindlichkeit mikroelektronischer Produkte gegenüber Störgrößen (Spannungen, Ströme, elektromagnetische Felder), die im Hochspannungsprüffeld beim Durchzünden von Stoßgeneratoren, beim Abschneiden von Blitzstoßspannungen oder beim Durchschlag von Prüflingen betriebsmäßig auftreten, bedingen eine besondere Sorgfalt bei der Auswahl und dem Einsatz mikroelektronischer Meß- und Steuergeräte. Dabei sollte das Signal/Rauschverhältnis durch angepaßte Eingangsspannungen, sorgfältig aufgebaute Erdverbindungen, entsprechende Kabel- und Steckverbindungen besonders beachtet werden. Die Auswahl der Meß- und Steuergeräte bedingt die dann noch nötigen Schutz- und Abschirmmaßnahmen, die entscheidend vom Design des Meß- oder Steuergerätes abhängen. Eine vollständige Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit des Gesamtsystems ist oft erst im Hochspannungslabor nach der Installation möglich, aber eine entsprechende Vorprüfung der Teilsysteme mit den im Prüffeld auftretenden Störgrößen ist empfehlenswert.

7. Ausgeführte Beispiele

Bei Hochspannungsprüfungen wird erst in den letzten Jahren in größerem Umfang eine vollständige automatische Meßwerterfassung angestrebt. Dies hängt sicherlich einmal mit der besonderen Störproblematik im Hochspannungsprüffeld zusammen, so daß nicht beliebige Geräte eingesetzt werden können, zum anderen aber auch mit dem Personal, das sich erst mit den neuen Möglichkeiten vertraut machen muß, da fertige Lösungen für bestimmte Prüfaufgaben kaum am Markt angeboten werden, d.h. jedes Prüffeld hat bestimmte Teilaufgaben selbst zu lösen. Nach einer Umfrage bei den Unternehmen liegt der bis heute noch zögernde Einsatz mikroelektronischer Geräte an einem Mangel an qualifiziertem Personal mit mikroelektronischer Erfahrung. In wenigen Jahren wird dieses Manko sicherlich behoben sein, da die mikroelektronische Ausbildung seit 2 bis 3 Jahren an allen Universitäten und Fachhochschulen zum Pflichtteil des Studiums gehört.

An drei an der Universität Stuttgart realisierten Beispielen sollen die grundsätzlichen Möglichkeiten verdeutlicht werden.

In Fig. 7 ist der Meßaufbau für eine mehrkanalige Aufzeichnung und Auswertung von Signalen (Spannungen, Ströme, Temperaturen) während der Verschmutzungsprüfung an einem mehrteiligen ZnO-Ableiter dargestellt.

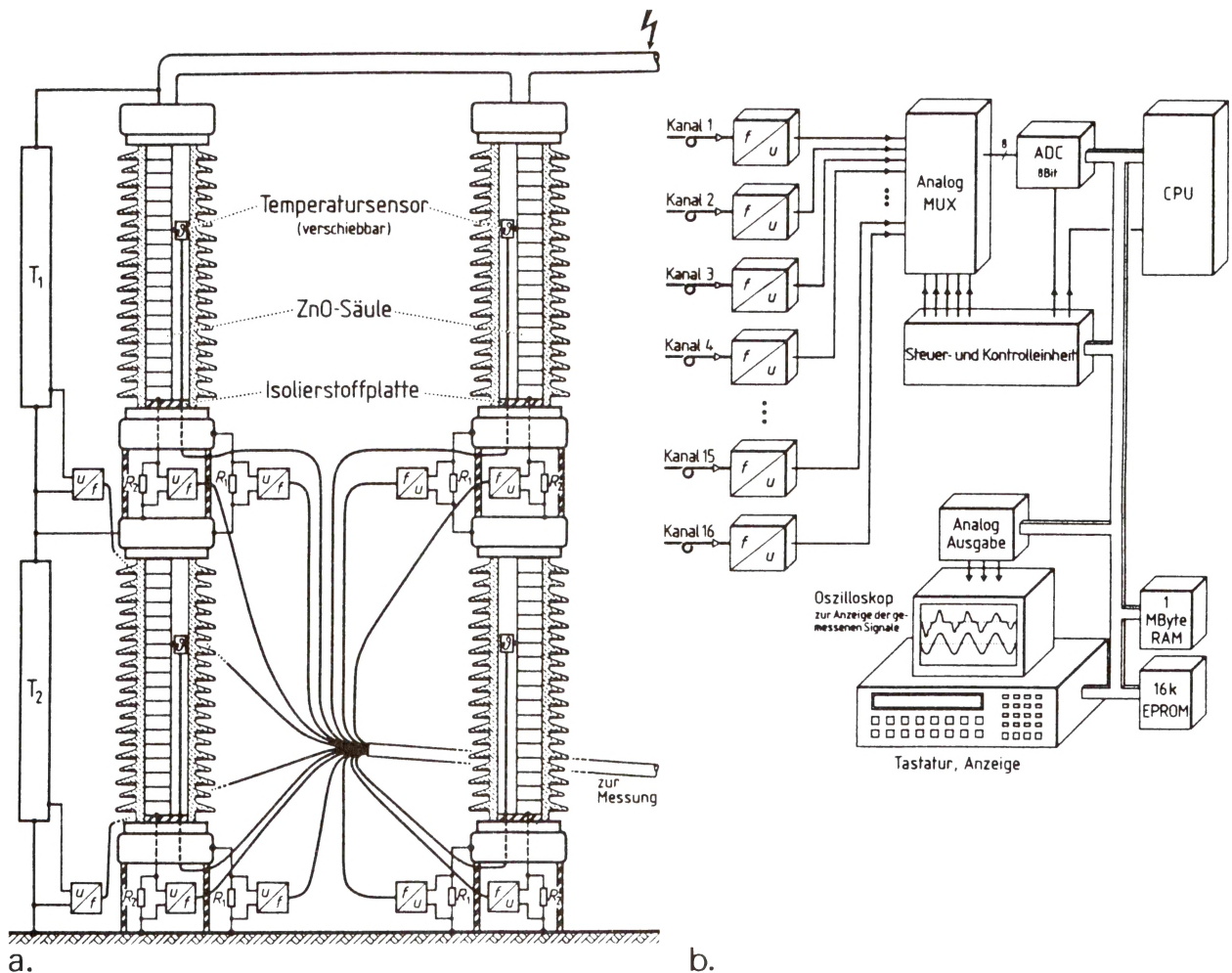


Fig. 7: Meßaufbau für mehrkanalige Aufzeichnung und Auswertung von Signalen während einer Verschmutzungsprüfung an ZnO-Ableitern

- Zinkoxyd-Ableiter mit Meßgliedern zur Strom-, Spannungs- und Temperaturmessung
- Blockschaltbild des 16-kanaligen Transientenrekorders

Das selbst entwickelte Aufzeichnungsgerät zeichnet sich durch einen großen Speicher und auf die Forschungsaufgabe zugeschnittene Softwareprogramme aus. Alle Signale werden von den Sensoren über Spannungs/Frequenzumsetzer optoelektronisch zum Auswertegerät übertragen, da die Sensoren von verschiedenen Spannungspotentialen übertragen.

Das Blockschaltbild einer vollständig automatisierten Impulsprüfung wird in Fig. 8 gezeigt.

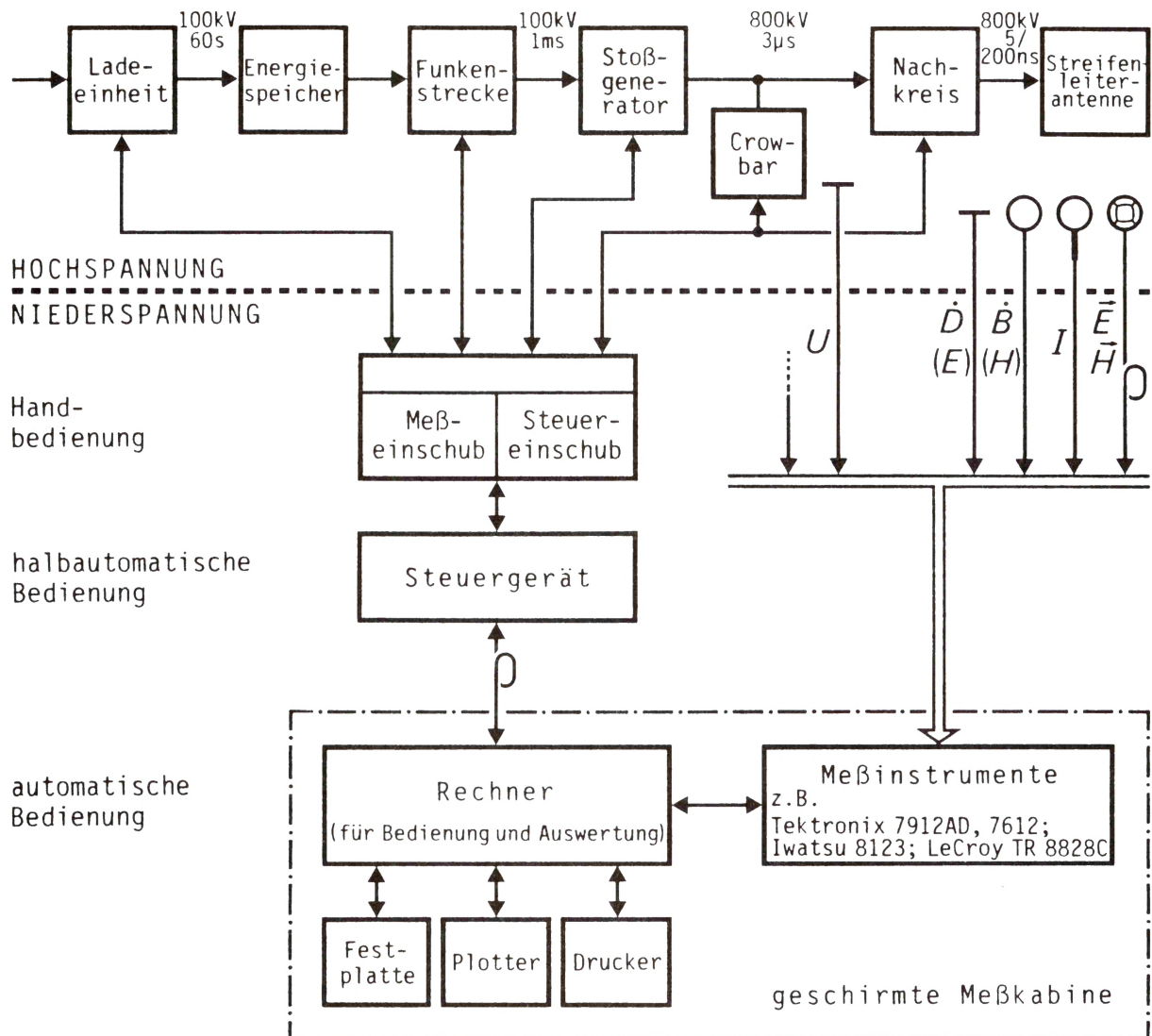


Fig. 8: Blockschaltbild einer vollständig automatisierten Impulsprüfung /6/

Die Steuerung und Meßwertaufbereitung, realisiert an der EMP-Anlage MIGUS /6/, wird von einem übergeordneten Rechner (HP 9817) überwacht. Verschiedene Programme erleichtern dem Prüfsingenieur den Betrieb der doch recht komplexen Anlage, so daß er sich voll der Beurteilung des Prüfergebnisses zuwenden kann. Die Sensoren messen teilweise abgeleitete physikalische Größen (z.B. dE/dt), die im Rechner integriert und auf einem Sichtgerät für die Bearbeitung dargestellt werden. Vor dem Prüfvorgang müssen bestimmte Daten (Datum, Sensoren) eingegeben werden. Alle wichtigen Einstellparameter werden dann protokolliert.

Ein weiteres Beispiel einer Auswertung mit einem PC von einer automatisierten Stoßprüfung mit einem 2 MV-Stoßgenerator zeigt Fig. 9. Hier wird die Durchschlagswahrscheinlichkeit einer Stab-Platte-Funkenstrecke in einer Klimakammer gemessen. Gerade für diese Art von Messungen bietet sich die Automatisierung

Durchschlagsversuche mit Stossspannungen

J. Schmid, IEH, Uni Stuttgart

Freitag, den 12.03.88

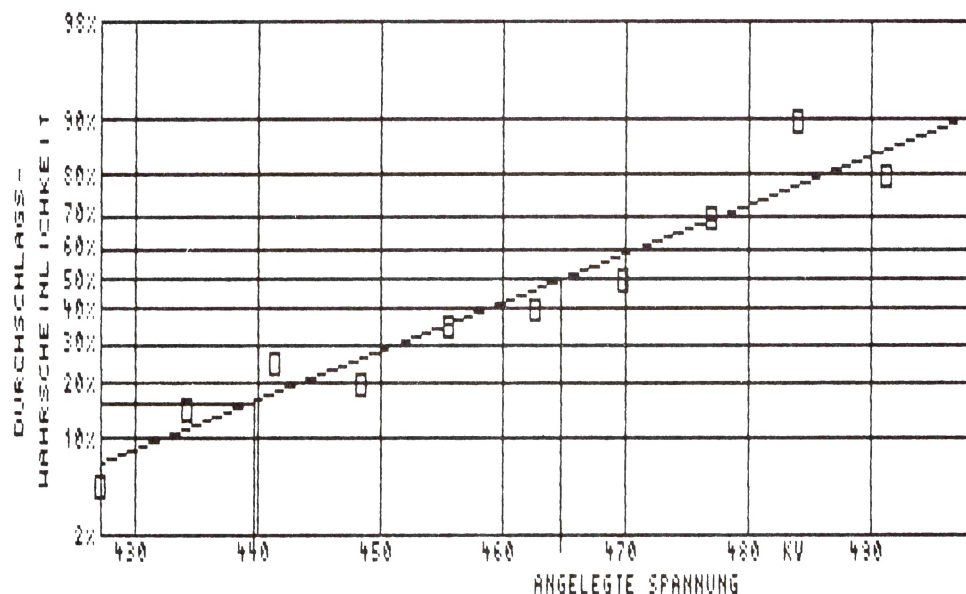
Parameter:

Spannungsform: 1.2/50 μ sec positiv
 Klimaparameter: 960 mbar, 20 Grad C, 10 g/m³.
 Anordnung: Spitze-Platte-Funkenstrecke 100 cm
 Bemerkung:

Ausgeführte Versuche:

Ladespannung	Impulsmaximum	Stöße Anzahl	Durchschläge Anzahl	Bemerkungen
60 kV	427 kV	20	1	
61 kV	434 kV	20	3	
62 kV	441 kV	20	5	
63 kV	449 kV	20	4	
64 kV	456 kV	20	7	
65 kV	463 kV	20	8	
66 kV	470 kV	20	10	
67 kV	477 kV	20	14	
68 kV	484 kV	20	18	
69 kV	491 kV	20	16	
70 kV	498 kV	20	18	

Auswertung:



bei Gauss-Verteilung: $U_{d50\%} = 464.8 \text{ kV}$, $\text{Sigma} = 25.1 \text{ kV} = 5.4\%$

Fig. 9: Automatisch erstelltes Protokoll einer Versuchsreihe an einer Stab-Platte-Funkenstrecke

an. Die handelsüblichen Steuer- und Meßgeräte wurden in diesem Fall über selbstgebaute Interface-Karten mit einem Personal Computer verbunden, der die Aufbereitung der Meßdaten und die Steuerung des Stoßgenerators nach einem gewählten Programm übernimmt.

8. Ausblick

Die gezeigten Beispiele zeigen den momentanen Stand der Automatisierung in der Hochspannungsprüftechnik. Bei weiter sinkenden Kosten für mikroelektronische Produkte, bei zunehmender Ausbildung in Mikroelektronik und Informatik und bei den zunehmenden Qualitätsanforderungen für alle Produkte ist in den kommenden Jahren mit einer steten Zunahme automatisierter Prüf- und Meßaufgaben zu rechnen. Für ein hochentwickeltes Industrieland ist dies auch die einzige Möglichkeit, Produktionen im Inland im internationalen Wettbewerb bei möglichst geringen Produktkosten aufrecht zu erhalten.

9. Literatur

- /1/ K. Feser, W. Pfaff: A Potential Free Spherical Sensor for the Measurement of Transient Electric Fields. IEEE PAS-103, No. 10, 1984, pp. 2904-2911
- /2/ K. Feser, W. Pfaff, G. Weyreter, E. Gockenbach: Distortion-Free Measurement of High Impulse Voltages. IEEE Transactions on Power Delivery, No. 3, July 1988, pp. 857-863
- /3/ R. Malewski, B. Poulin: Digital Monitoring Technique for HV Impulse Tests. IEEE PAS-104, No. 11, 1985, pp. 3108-3116
- /4/ G. Szaloky, E. Gockenbach, H.P. Häusler, A.J. Kachler, H. Kleine: High Voltage Impulse Tests on Power Transformers Using a Digital Measuring System. 5. Int. Symp. on High Voltage Engineering, Braunschweig, 1987, Paper No. 72.05
- /5/ K. Feser, G. König, J. Ott, P. Seitz: An Adaptive Filter Algorithm for On-Site Partial Discharge Measurements. Conf. Record of the IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Boston, 1988, S. 242-245
- /6/ K. Feser: MIGUS - EMP-Simulator für die Überprüfung der EMV. etz Bd 108, H. 10, 1987, S. 420-423
- /7/ K. Feser: High Voltage Test Equipment and Procedures. 6. Int. Symp. on High Voltage Engineering, New Orleans, 1989, Paper No. 20.01