

# **Überwachung und Diagnose von Schaltern und Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur**

genehmigte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Ing. Karsten Straßburg**

geboren am 4. März 1958 in Binnen

**2000**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach  
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Rüdiger Oswald  
  
Tag der Promotion: 7. April 2000

**Schlagworte:**

Schaltanlage - Mittelspannung - Überwachung

**Keywords:**

switchgear - medium voltage - monitoring

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 1993 bis 1999 während und auch nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen - Schering Institut - der Universität Hannover.

Mein Dank gilt allen Kollegen, Studierenden und den Angehörigen des Schering-Instituts, die sich an meinen Forschungsarbeiten mitwirkten, sich durch rege konstruktive Diskussionen an der Klärung von Problemen beteiligten, mir bei der Konstruktion und Montage von Versuchseinrichtungen halfen und mich bei der Durchführung von Versuchen unterstützten. Besonders möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Werkstatt des Instituts bedanken; ohne deren geduldige, flexible und tatkräftige Mithilfe hätte ich diese Dissertation nicht realisieren können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach, dem Leiter des Schering-Instituts, danke ich für das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat, als er mir diese anspruchsvolle Aufgabe übertrug. Er hat mir, nicht nur bei der Bearbeitung des Themas, mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Ohne Herrn Prof. Gockenbach hätte ich nie die internationale Gemeinschaft der Hochspannungstechniker kennengelernt, in der ich viele interessante Bekanntschaften gemacht und Freundschaften gefunden habe.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Rüdiger Oswald, dem Leiter des Instituts für Elektrische Energieversorgung, danke ich für die Übernahme des Korreferats und für das Interesse, das er meiner Arbeit entgegenbrachte.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner lieben Frau Bärbel für ihre Geduld, ihr großes Verständnis und ihre selbstlose Unterstützung während des Entstehens dieser Arbeit bedanken. Unsere Kinder Lisa, Alexander und Clara haben mir immer sehr deutlich gemacht, welch interessantes Leben es jenseits der Hochspannungstechnik gibt. Dafür liebe ich sie ganz besonders.

Meine Großmutter Else Ohlmeyer ist mir in meinem ganzen Leben mit ihrer offenen und positiven Freundlichkeit ein Vorbild und eine große Stütze gewesen. Sie durfte die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr erleben. Ich bin sicher, dass sie sich sehr gefreut hätte. Meine Dissertation widme ich ihrem Andenken.

## **Kurzfassung**

STRASSBURG, KARSTEN

### **Überwachung und Diagnose von Schaltern und Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich**

Die Geschichte der Mittelspannungs-Schaltanlagentechnik ist so alt wie die Wechselstrom-Elektrifizierung. Obwohl das Leistungsvermögen und die Verfügbarkeit der Schaltanlagen ständig verbessert werden, lassen sich Betriebsstörungen nicht vermeiden. Einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Zuverlässigkeit kann die technische Diagnostik für Mittelspannungs-Schaltanlagen bieten. Durch eine Überwachung der Schaltanlagen im Betrieb läßt sich eine bedarfsgerechte Wartung und Instandhaltung der Schaltanlagen realisieren. Damit wird der Einsatz von robusten und preisgünstigen Komponenten zur technischen Diagnostik von Mittelspannungs-Schaltanlagen zukünftig auch ökonomisch sinnvoll.

Am Beispiel eines Vakuum-Leistungsschalters wird ein Meßsystem entwickelt, das einen inkrementalen Drehgeber zur Messung des Winkelverlaufs der Antriebswelle nutzt. Aus dem Verlauf des Drehwinkels und der berechneten Winkelgeschwindigkeit lassen sich Veränderungen in der Antriebscharakteristik sicher erkennen. Das Meßsystem läßt sich, nach einer entsprechenden Anpassung, auch für andere Schalter verwenden.

Feuchte kann bei gekapselten SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen besonders dann zu einem Problem werden, wenn diese in feucht-heißen subtropischen Regionen eingesetzt werden. Die Permeation von Wasserdampf in die Anlagen durch gummielastische Dichtungen kann zum Anstieg der Isoliergasfeuchte und zu einer Verschlechterung der Isolationseigenschaften führen.

Die Teilentladungsmessung in Mittelspannungs-Schaltanlagen unter Betriebsbedingungen ist das wichtigste Hilfsmittel bei der Beurteilung des Zustandes der Isolierung. Eine effektive Unterdrückung externer Störer ist die Hauptforderung bei der elektrischen Messung von Teilentladungen (TE). Zur Lösung dieses Problems dienen, neben den hier nicht behandelten Möglichkeiten einer digitalen Bearbeitung der aufgezeichneten Meßsignale, die TE-Messungen mit einem Differenzverstärker und mit der UHF-Methode. Mit der differentiellen breitbandigen TE-Messung lassen sich schon Impulse kleiner scheinbarer Ladung in der Nähe der Sensoren messen und lokalisieren. Das Verhalten einer Schaltanlage im Bereich hoher Frequenzen beim Auftreten von Teilentladungen wird simuliert. Messungen bestätigen die Gültigkeit des Modells, das den Berechnungen zugrunde liegt.

Moderne Mittelspannungs-Schaltanlagen sind als modulare Felder konstruiert, die durch silikonkautschukisolierte Sammelschienen miteinander verbunden werden. Da die Sammelschienen auf der Baustelle installiert werden, ist es sinnvoll, die Montagequalität durch eine TE-Messung bei der Inbetriebnahme zu prüfen. Dazu kann das Meßsystem nach dem Differenzverfahren ebenfalls sinnvoll eingesetzt werden.

## **Abstract**

STRASSBURG, KARSTEN

### **Monitoring and Diagnosis of Circuit-Breakers and Switchgears in the Medium Voltage Range**

The history of medium voltage switchgear technology is lasting as long as there is alternating current electrification. Although the performance and the availability have always been strengthened, operation-trouble is not avoidable. The technical diagnosis of medium voltage switchgear is an important contribution to the improvement of their reliability. A condition-based maintenance and servicing can be realised by monitoring the switchgear. The application of robust and moderate priced components for the technical diagnosis of medium voltage switchgear is economically efficient.

For a vacuum circuit-breaker as a reference a measuring device has been developed which uses a shaft position digitalizer for the measurement of the angular movement of the drive shaft. Variations of the circuit-breaker mechanism can be detected from the angular movement and the calculated angular velocity. After some suitable modifications the measuring system is also adaptable to different circuit-breakers.

Moisture can be a problem when encapsulated SF<sub>6</sub>-insulated switchgears are used in moist and hot subtropical regions. The permeation of water vapour into the switchgears through rubber gaskets is a source of insulation gas humidity and deterioration of the insulation conditions.

Partial discharge measurements in medium voltage switchgear during operation are the most important aids for the estimation of the insulation quality. An effective suppression of external noise is the main demand in case of partial discharge (PD) measurements. The solutions of this problem are, amongst the possibility of digital aftertreatment of recorded measuring signals which is not discussed here, the PD-measurement with a differential amplifier and the UHF-method. With the differential broadband PD-measurement pulses with low apparent charge can be measured and localized in the vicinity of the sensors. The high-frequency response of a switchgear in case of PD-inception has been simulated. Measurements confirm the validity of the computing model.

Modern medium voltage switchgears consist of switching modules which are connected by silicon rubber insulated busbars. Because the busbars are installed on site, the mounting quality should be checked by PD-measurement during the switchgear's putting into service. Therefore a measuring system using the differential method can be applied meaningfully.

# Inhaltsverzeichnis

Übersicht.....	1
Einleitung.....	2
1 Betriebserfahrungen mit Mittelspannungs-Schaltanlagen.....	5
1.1 Geschichte der Schaltanlagentechnik.....	5
1.2 Heutige Bauformen von Mittelspannungs-Schaltanlagen.....	20
1.3 Störungsanalyse von Mittelspannungs-Schaltanlagen.....	22
2 Überwachung von Schaltgeräten.....	27
2.1 Funktionsweise eines Überwachungssystems.....	28
2.2 Überwachung der Antriebsmechanik.....	28
2.3 Anforderungen an den Drehgeber.....	29
2.3.1 Potentiometrische Drehgeber.....	29
2.3.2 Kapazitive Drehgeber.....	30
2.3.3 Induktive Drehgeber.....	31
2.3.4 Digitale Drehgeber.....	32
2.4 Auswahl des Drehgebertyps.....	34
2.5 Meßsystem und Auswertung der Meßwerte.....	37
2.6 Bewertung von Fehlereinflüssen.....	43
2.6.1 Auswertung des Ausbaus einer Kontaktdruckstange.....	43
2.6.2 Auswirkungen der Ausschaldämpfer-Veränderungen.....	45
2.7 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Diagnose des Schalterantriebs.....	48
3 Überwachung der Isoliergasfeuchte in Schaltanlagen.....	50
3.1 Adsorptionseigenschaften der Isolatorgrenzschicht.....	50
3.2 Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen in luftisolierten Schaltanlagen.....	51
3.3 Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen in gekapselten SF <sub>6</sub> -gasisolierten Schaltanlagen.....	52
3.4 Feuchte in gekapselten SF <sub>6</sub> -gasisolierten Schaltanlagen.....	53
3.5 Ursachen für die Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes in gekapselten Schaltanlagen.....	53
3.5.1 Eingebaute Feuchte.....	53
3.5.2 Permeation bei gekapselten Schaltanlagen.....	55
3.5.3 Berechnung der Permeation für feuchtgemäßigtes Klima in Mitteleuropa.....	56
3.5.4 Berechnung der Permeation für tropisches Regenwaldklima.....	58
3.5.5 Messungen der Isoliergasfeuchte in gekapselten Anlagen in verschiedenen Klimazonen.....	60

3.6	Auswirkungen erhöhter Isoliergasfeuchte in gekapselten Schaltanlagen	62
3.6.1	Aufbau der Mittelspannungs-Schaltanlage	62
3.6.2	Messung der Isoliergasfeuchte	63
3.6.3	Bestimmung der Teilentladungseinsetzspannung	63
3.6.4	Bestimmung der Überschlagspannung	64
3.6.5	Überschlagspannung in Abhängigkeit von der Teilentladungseinsetzspannung	65
3.7	Diskussion der Meßergebnisse bezüglich der Feuchte in gekapselten SF <sub>6</sub> -gasisolierten Schaltanlagen	66
3.8	Zusammenfassung der Untersuchungen zum Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen	68
4	Teilentladungsmessung zur Diagnose von Mittelspannungs-Schaltanlagen	70
4.1	Teilentladungsmeßverfahren	70
4.1.1	Konventionelle Teilentladungsmessung	70
4.1.2	Akustische, optische und chemische Teilentladungsmeßverfahren	73
4.1.3	TE-Messung mit Sonden im VHF und UHF-Bereich	74
4.2	Ziel der Untersuchungen zur Teilentladungsmessung	75
4.3	Konventionelle Teilentladungsmessung an gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen	76
4.3.1	Modellrohranordnung als Nachbildung eines koaxialen Leitersystems	76
4.3.2	SF <sub>6</sub> -gasisolierte Schaltanlage	79
4.3.3	Kapazitive Sonde in Form eines Sensor-Stützers	82
4.3.4	Kapazitive Sonde in Form eines Deckels	84
4.3.5	Auslegung der Ankopplungsvierpole	87
4.3.6	Auslegung des Differenzverstärkers	90
4.3.7	Übertragungsverhalten des TE-Meßkreises	92
4.3.8	Meßergebnisse	94
4.3.9	Zeitliche Verläufe der Teilentladungssignale	98
4.3.10	Zusammenfassung der Untersuchungen zur konventionellen TE-Messung an gekapselten Schaltanlagen	104

4.4 UHF-Teilentladungsmessung und -simulation an gekapselten SF <sub>6</sub> -isolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen .....	105
4.4.1 Ausführung der Sonde .....	105
4.4.2 Erfassung und Identifizierung der TE-Signale .....	108
4.4.3 Lokalisierung der TE-Quelle .....	110
4.4.4 Kalibrierung der Meßanordnung .....	110
4.4.5 Beschreibung der Versuchsanlage zur Simulation der TE-Signale .....	112
4.4.6 Berechnung der Ersatzschaltbildelemente .....	114
4.4.7 Simulation mit dem Netzwerkanalyseprogramm PSpice .....	119
4.4.8 Versuchsaufbau .....	121
4.4.9 Versuchsdurchführung und Ergebnisse .....	123
4.4.10 Zusammenfassung der Untersuchungen zur UHF-Teilentladungsmessung ..	127
4.5 Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene .....	129
4.5.1 Beschreibung der Meßgeräte zur differentiellen TE-Messung .....	129
4.5.2 Versuchsaufbau und Durchführung der Messung .....	135
4.5.3 Durchführung der TE-Messung .....	138
4.5.4 Meßergebnisse bei Auskopplung von Teilentladungen über die Durchführung .....	139
4.5.5 Meßergebnisse bei Auskopplung von Teilentladungen über die Schraubeinsätze .....	150
4.5.6 Bewertung der Meßergebnisse der TE-Einsatzspannung .....	158
4.5.7 Bewertung der Meßergebnisse der TE-Intensität bei TE-Einsatz .....	160
4.5.8 Bewertung der Meßergebnisse bei verschiedenen Prüfspannungen .....	161
4.5.9 Bewertung der Meßsystems für vor Ort Prüfungen .....	162
4.5.10 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Teilentladungsmessung an einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene .....	162
5 Ausblick .....	164
6 Zusammenfassung .....	167
7 Literaturverzeichnis .....	171

## Übersicht

Die vorliegende Arbeit berichtet über die Möglichkeiten zur technischen Diagnostik und Überwachung von Mittelspannungs-Schaltanlagen. Ausgehend von einer Auswertung von Schadensstatistiken werden die wichtigsten Problemfelder ermittelt und an realitätsnahen Versuchsaufbauten praxisrelevante Parameter für die technische Diagnostik gewonnen. Es werden geeignete Sensoren entwickelt oder ausgewählt und in die Versuchsaufbauten implementiert. Dabei ist die Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Lösungen von großer Bedeutung.

Ein Rückblick auf die Entwicklung der Schaltanlagentechnik seit 1884 zeigt die Vielfältigkeit der möglichen technischen Lösungen und die enormen Fortschritte auf diesem Fachgebiet der Elektrotechnik. Das Ergebnis dieser Entwicklung dokumentiert sich in den Bauformen heutiger Mittelspannungs-Schaltanlagen. Deren Zuverlässigkeit wird durch die Auswertung der VDEW Störungs- und Schadensstatistik ermittelt. Es zeigt sich, daß die Zuverlässigkeit noch erhöht werden kann.

Für die Überwachung der Schalter wird ein preisgünstiges Überwachungssystem entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, durch eine rechnergestützte Auswertung die Veränderungen in der Antriebscharakteristik eines Mittelspannungs-Leistungsschalters zu erfassen. Damit wird eine bedarfsgerechte Wartung des Schaltgerätes möglich.

Ein weiteres wichtiges Gebiet in der Schaltanlagentechnik stellen die Auswirkungen von Feuchte auf das Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen dar. Der Betrieb bewährter Anlagen kann im feucht-heißen Klima subtropischer Regionen unter diesen Bedingungen zu Schwierigkeiten führen. Untersuchungen an einer mit SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlage zeigen Maßnahmen auf, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen.

Das wichtigste, aber bisher noch kaum eingesetzte Mittel für eine Diagnostik des Isolationszustandes von Mittelspannungs-Schaltanlagen stellt die Teilentladungsmessung dar. Bereits mit der konventionellen schmal- und breitbandigen Teilentladungsmessung lassen sich unter Vor-Ort Bedingungen gute Ergebnisse erzielen. Voraussetzung ist eine wirkungsvolle Unterdrückung externer Störer. Als einfaches System bietet sich hierfür die Teilentladungsmessung nach der Differenzmethode an. Das dafür entwickelte Meßsystem wird für die Messungen an einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) und an einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene eingesetzt. Die Methode der Teilentladungsmessung bei ultrahohen Frequenzen (UHF) läßt sich auch im Bereich von Mittelspannungs-Schaltanlagen einsetzen. Mit einer Simulation lassen sich die Meßergebnisse nachvollziehen. Die Reaktion der bei den Versuchen eingesetzten Schaltanlage auf Teilentladungen läßt sich also auch im voraus berechnen.

## Einleitung

Die Zuverlässigkeit von Mittelspannungs-Schaltanlagen ist eine wichtige Voraussetzung für eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie. Neben einer großen Betriebs- und Personensicherheit legen die Betreiber Wert auf eine sehr hohe Verfügbarkeit und geringe Betriebskosten. Deshalb sollen die Schaltanlagen geringe Anforderungen an Inspektion und Wartung stellen, da sie verbrauchsnahe eingesetzt und damit sehr verstreut eingebaut werden.

In Deutschland existierten im Jahre 1993 im Mittelspannungsbereich mit Nennspannungen von 10, 20 und 30 kV 284.344 Netzstationen und Schaltanlagen mit 847.348 Schaltfeldern. Hier-von waren 239.190 luftisolierte und 45.154 gekapselte Anlagen. Luftisolierte Netzstationen und Schaltanlagen stellen 84,1 %, gekapselte 15,9 % aller installierten Anlagen dar, die überwiegend Innenraumanlagen sind. Luftisolierte, teilgeschottete Mittelspannungsschaltanlagen, die mit Lasttrennschaltern und einem Leistungsschalter in der Einspeisung ausgerüstet sind, dominieren dabei. In Deutschland gibt es einen jährlichen Neubedarf von über 30.000 luftisolierten Lasttrennschalterfeldern.

Anfang der 60er Jahre war es durch die Einführung der Gießharze als Isolierstoff möglich, kleinere Schaltanlagen zu bauen. Dadurch konnten in Industrieanlagen und in Innenstädten auf begrenztem und teurem Raum mehr Felder installiert werden. Diese Entwicklung stieß jedoch an ihre Grenzen, da in Schaltanlagen ungünstige klimatische Verhältnisse herrschen können. Beim Ansteigen der Feuchte entsteht eine Betauung der Isolierstoffoberflächen, die eine schnelle Alterung durch Teilentladungen, sowie Störlichtbögen und Brände in der Schaltanlage verursachen kann. Der Schaden durch Brände ist bei diesen Schaltanlagen durch die große Menge brennbarer Isolierstoffe sehr hoch. Deshalb werden luftisolierte Schaltanlagen seit 20 Jahren wieder mit möglichst wenig Feststoffisolation und damit größerem Volumen gebaut. Dort, wo der Raum für größere Anlagen nicht vorhanden war, mußte entweder durch Heizung und aufwendige Reinigungsarbeiten das Raumklima in der Schaltanlage verbessert, oder bei neu zu installierenden Anlagen eine neue Technologie eingesetzt werden.

Einen Innovationssprung im Bereich der Mittelspannungs-Schaltanlagen brachten Ende der 70er Jahre die gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Diese haben sich, seit 1965 die erste 110 kV GIS in Betrieb genommen wurde, im Hochspannungsbereich etabliert und bewährt. 1978 kam die erste hermetisch gekapselte Lasttrenn-Schaltanlage mit SF<sub>6</sub> als Isolier- und Löschmedium auf den deutschen Markt. 1981 folgte die erste Leistungsschalteranlage mit SF<sub>6</sub>-Isolation und Vakuum-Leistungsschaltern. Die hermetische Metallkapselung aller Anlagenteile auf Hochspannungspotential bewirkt einen vollständigen Berührungsschutz für das Bedienpersonal.

Nach der Montage können Staub und Tiere nicht mehr in die Anlage gelangen, klimatische Einflüsse sind weitgehend ausgeschlossen. Reparaturen an den gekapselten Teilen sind entweder sehr aufwendig oder ganz unmöglich. Deshalb müssen die Hersteller gasgekapselte Mittelspannungs-Schaltanlagen besonders sorgfältig entwickeln, fertigen und prüfen. Es dürfen nur wartungsfreie und besonders zuverlässige Komponenten eingebaut werden. Der Preis für mit SF<sub>6</sub> gasisierte Mittelspannungs-Schaltanlagen ist heute gleich dem für luftisolierte Bauformen. Ihr Marktanteil beträgt derzeit 20 % der produzierten Anlagen. Aufgrund ihrer sehr wartungsarmen Bauform, der schnellen Montage und ihres geringen Bauvolumens wird ihr Marktanteil weiter steigen.

Zur Beurteilung der Verfügbarkeit der Komponenten einer Netzstation oder Schaltanlage dient die Störungsanalyse der Betriebsmittel von Schaltanlagen. Aus den Daten läßt sich die Störanfälligkeit der verschiedenen Betriebsmittel und Bauarten der Schaltanlagen ermitteln. Die Reihenfolge der Ausfallhäufigkeit und die Ausfallursachen der Betriebsmittel geben nicht nur die Entscheidungsgrundlage für einen Austausch dieser Komponente oder die Erneuerung einer ganzen Anlage, sie liefert auch Hinweise für den sinnvollen Einsatz von technischen Diagnoseeinrichtungen.

Die Möglichkeiten für technische Diagnostik an Mittelspannungs-Anlagen sind heute größer als der Bedarf der Betreiber. Dies ist in der geringen Anzahl der Schäden in den Schaltanlagen und Netzstationen begründet, die für die 10 kV- und 20 kV-Ebene zusammen nur 23,3 % der Schäden der 380 kV Hochspannungs-Schaltanlagen ausmachen. Diese Einschätzung wird sich aber durch neue Überlegungen im Bezug auf eine bedarfsgerechte Wartung und Instandhaltung ändern.

Eine dielektrische Prüfung zur Qualitätskontrolle nach der Endmontage vor Ort findet im Gegensatz zu Hochspannungs-Schaltanlagen, wo eine Gefahr durch dielektrische Fehler durch eine umfangreiche Hochspannungsprüfung der Hauptstromkreise ausgeschlossen werden soll, bei Mittelspannungs-Schaltanlagen in der Regel nicht mehr statt. In VDE 670, Teil 6 Anhang DD, wird lediglich eine Wechselspannungsprüfung mit 80 % der Nenn-Steh-Wechselspannung für Teile, die vor Ort montiert werden, und für gasgefüllte Schotträume, die vor Ort gefüllt werden, empfohlen. Im Falle von Hochspannungs-Schaltanlagen wird bei entsprechender Spannungshöhe von einer Formierung oder Konditionierung mit Wechselspannung und nicht von einer Prüfung gesprochen. Nur wenn die Prüfung vor Ort die Stückprüfung im Werk des Herstellers ersetzt, dann ist die volle Prüfwechselspannung anzulegen. Eine Messung von Teilentladungen (TE) findet sowohl bei der Stückprüfung als auch bei einer vor Ort Prüfung nur statt, wenn sie zwischen Hersteller und Betreiber gesondert vereinbart wird. Auch die höchstzulässige scheinbare Ladung von Teilentladungen ist zwischen Hersteller und Betreiber zu vereinbaren.

Auf diese Weise lassen sich nicht alle Fehler aufdecken, die später zu Betriebsstörungen und Schäden an der Schaltanlage führen können.

Eine visuelle Inspektion der aktiven Teile einer Mittelspannungs-Schaltanlage ist nicht nur äußerst arbeitsintensiv und damit teuer, im Falle der gekapselten Schaltanlagen ist sie sogar unmöglich. Um den Aufwand für Wartung und Instandhaltung weiter zu senken und um mögliche zusätzliche Fehler durch Wartungsarbeiten zu vermeiden, wird eine Reduzierung auf die tatsächlich erforderlichen Maßnahmen angestrebt. Voraussetzung für diese bedarfsgerechte Instandhaltungsstrategie ist eine zuverlässige technische Diagnostik, die dem Betreiber Daten über den aktuellen Zustand seiner Schaltanlagen liefert. Zur Beurteilung muß eine Diagnoseauswertung durchgeführt werden, indem die durch die technische Diagnostik gewonnen Daten mit den Betriebserfahrungen der Betreiber und den Informationen der Hersteller aus der Entwicklungsprüfung und der Qualitätssicherung verglichen werden.

Für ein System zur kontinuierlichen Überwachung von Mittelspannungs-Schaltanlagen gibt es bisher nur wenige Vorschläge, wie eine „Online-Diagnose“ und ein „Condition Monitoring“ verwirklicht und mit der Stationsleittechnik verknüpft werden kann. Ähnlich wie bei der Isolationsstechnik findet die Innovation zuerst bei den Hochspannungs-Schaltanlagen statt, wo Komponenten für entsprechende Systeme gerade von den Herstellern entwickelt und installiert wurden. Bei dem engen finanziellen Rahmen für eine zusätzliche Diagnose und Monitoring-Technik in Mittelspannungs-Anlagen muß es sich dabei um preisgünstige und robuste Systeme handeln, die die möglicherweise kritischen Punkte der Schaltfelder überwachen.

Es ist deshalb das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Möglichkeiten einer Überwachung und der technischen Diagnose von Mittelspannungs-Schaltanlagen zu untersuchen. Es wird angestrebt, sich dabei auf die wichtigsten Meßgrößen zu beschränken. Dafür notwendige Meßverfahren und Sensoren werden ausgewählt oder entwickelt. Die Adaption an serienmäßige Schaltanlagenkomponenten und die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind für die praktische Anwendung von besonderem Interesse. Die Ergebnisse dieser Arbeit können einen wichtigen Beitrag für die zustandsorientierte Instandhaltung und damit einen wirtschaftlicheren Betrieb von Mittelspannungs-Schaltanlagen leisten.

# 1 Betriebserfahrungen mit Mittelspannungs-Schaltanlagen

## 1.1 Geschichte der Schaltanlagentechnik

Mittelspannungs-Schaltanlagen haben eine etwa 110-jährige Geschichte. Sie ist so alt wie die Geschichte der Wechselstrom-Elektrifizierung. Die Schaltanlagen-Entwicklung vollzog sich über eine große Anzahl von Entwicklungsstufen und verlief nicht geradlinig. Viele grundlegende Ideen wurden von den Entwicklungs-Ingenieuren schon sehr früh formuliert und veröffentlicht. Manche führten sehr schnell zu verbesserten Schaltanlagen, bei anderen dauerte es jedoch oft sehr lange, bis Materialien und Technologien die technische Umsetzung ermöglichen.

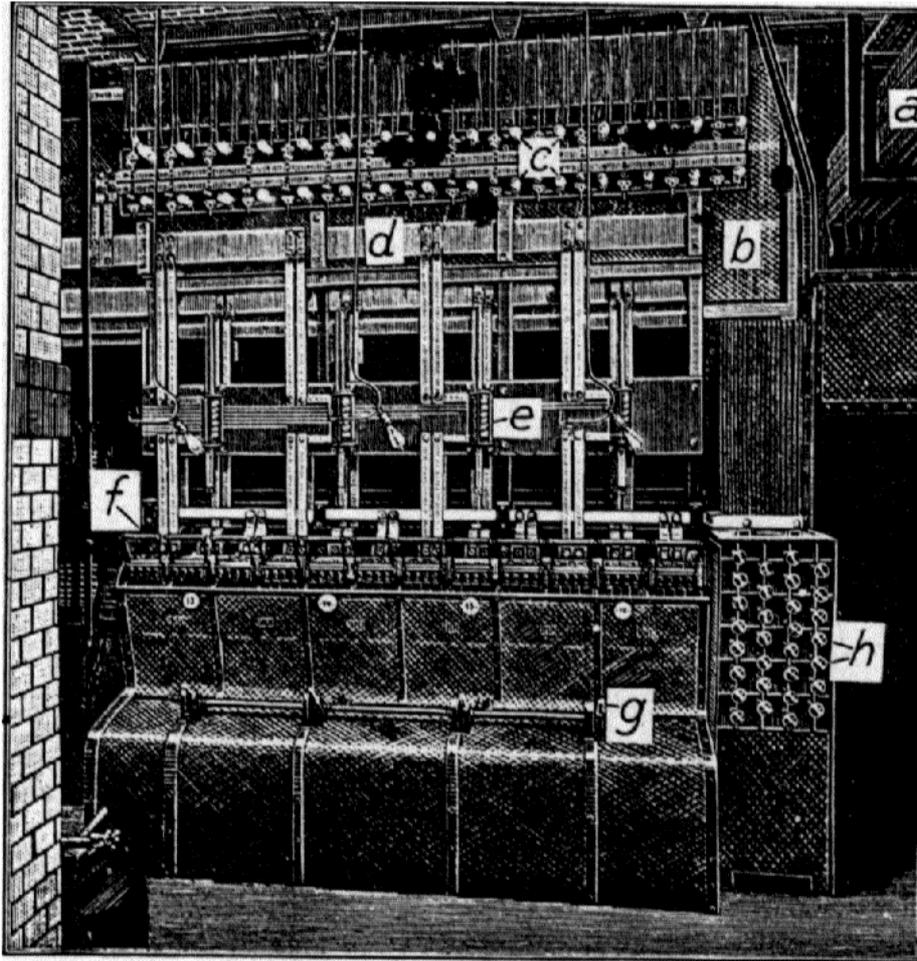
Das erste Elektrizitätswerk der Welt war die Edisonzentrale „Pearl Street Station“ in New York. Es wurde 1884 in Betrieb genommen, arbeitete mit 100 V Gleichspannung und erzeugte eine maximale Leistung von 500 kW [Imhof 81]. Bei den frühen Kraftwerken handelte es sich um eine reine Niederspannungs-Gleichstromversorgung. Die Energie wurde über Kabel an die Verbraucher im Umkreis von wenigen hundert Metern verteilt. Die Schalttafel war irgendwo an einem zufällig freien Platz im Maschinenhaus untergebracht. Auf einem Holzbrett, das an einem Eisengestell oder reich verzierten Hartholzgerüst befestigt war, waren oben die Meßinstrumente und darunter in Griffhöhe die ungekapselten Schalt- und Regelapparate und offenen Schmelzstreifen als Sicherung befestigt.

*Derartige feuer- und lebensgefährliche Meisterwerke der Holzzierkunst und Parketterie gingen hier und dort beim Durchschmelzen der ungeschützten Sicherungen oder infolge des Stehenbleibens des Öffnungslichtbogens von Schaltern oder auch infolge von Isolationsfehlern und Kurzschlüssen in Flammen auf [Niethammer 20].*

Die Elektrotechniker arbeiteten mit sehr viel geringeren Sicherheitsgraden als die Maschinenbauer. Die Elektrizitätswerke erwarteten beim Kauf einer Dynamomaschine die Schaltanlagen als kostenlose Beigabe. Ein Beispiel für solche Schaltanlagen findet sich im ältesten öffentlichen Kraftwerk Europas in der Markgrafenstraße 44 in Berlin, das von von der BEWAG 1885 mit 6 Maschinensätzen in Betrieb genommen und 1888 um 4 Dynamomaschinen erweitert wurde [Krohne 35].

Wichtigste Voraussetzung für eine Wechselstrom-Energieübertragung mit Hochspannung und Verteilung mit Niederspannung waren die Erfindungen der drei Ingenieure Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy und Miksa Déri im März 1885 bei der ungarischen Firma Ganz in Budapest:

- Die Entwicklung von Transformatoren mit geschlossenem Eisenkern, geringer Streuung und geringen Verlusten,



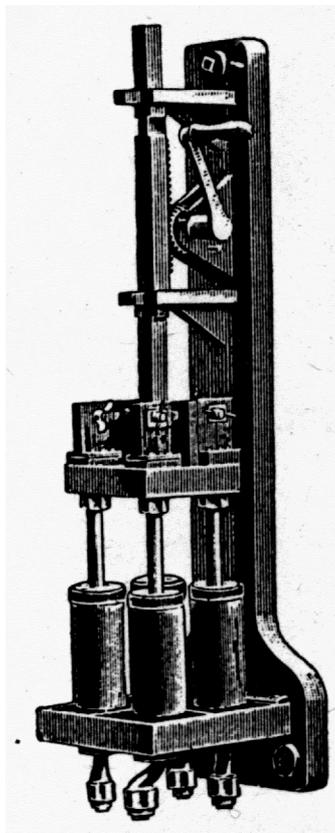
- |   |  |   |                                |
|---|--|---|--------------------------------|
| a | blanke Kupferleitungen<br>von den Maschinen  | d | Sammelschienen                 |
| b | Widerstände                                  | e | Strommesser                    |
| c | Lampen parallel zu den<br>Widerstandsgruppen | f | Schalthebel                    |
|   |  | g | Hebel für Nebenschlußregler    |
|   |  | h | Zugknöpfe für Registerschalter |

**Bild 1.1:** Schaltanlage im Kraftwerk Markgrafenstraße, Berlin, 1888 [Wilke 90]

- die Verwendung von Transformatoren mit hohem Übersetzungsverhältnis, die das Hochspannungs-Übertragungs-Netz (1400-2000 V) vom Niederspannungs-Verteilungsnetz galvanisch entkoppeln,
- paralleler Anschluß der Verbrauchergruppen an die Versorgungsleitungen über Transformatoren statt einer Reihenschaltung [Jeszenszky 96].

Die ersten Wechselstromanlagen Europas nach diesem System kamen 1886 in Rom, Mailand und Thorenberg (Schweiz) zum Einsatz.

Für die erste große Zentrale Ai Cerchi in Rom entwickelte Bláthy eine Schaltmaschine, die eine beliebige Verschaltung der vier Maschinensätze mit einer Gesamtleistung von 1500 kW bei 2000 V Betriebsspannung mit den drei Netzsträngen gestattete. Als Schalter wurden zweipolige Quecksilberschalter für 250 A eingesetzt. Jeder Schalter hatte für jeden Pol einen isolierten Quecksilbertopf, in den im eingeschalteten Zustand zwei 20 mm starke Kupferstifte hineintraten. Durch die Quecksilberschalter gab es ohne Krafteinsatz einen guten Kontakt. Größtes Problem waren die beim Schalten entstehenden Quecksilberdämpfe. Dieses Problem wurde durch das Abdecken der Quecksilberoberfläche mit einer Schicht Glycerin oder Petroleum gelöst [Vogelsang 29].



**Bild 1.2:** Quecksilberschalter, Köln, 1891

In Deutschland war die Firma Helios, Köln, Lizenznehmerin der Ganz-Patente. Sie installierte 1889 eine Wechselstromanlage in Amsterdam und 1891 in Köln das erste Wechselstrom-Elektrizitätswerk in Deutschland. Dieses Kraftwerk hatte eine Leistung von 1350 kW und war mit einem separaten Schalterraum für die Quecksilberschalter und die Regeleinrichtungen ausgestattet. Die Energieübertragung erfolgte über drei Kabel. Diese führten zu zwölf Schaltanlagen, die mit Quecksilberschaltern und Sicherungen für die abgehenden Kabel ausgestattet waren. Alle Abnehmer waren direkt an das 2 kV-Netz angeschlossen und hatten einen eigenen 1,25-25 kW Transformator mit eigenen Sicherungen. Die Ausführung der Schaltanlagen wurde für übertrieben sicher gehalten und konnte sich deshalb nicht durchsetzen.

Es wurden wieder Schalttafeln nach dem Vorbild der Gleichstromanlagen gebaut. Die Quecksilberschalter wurden bis zu 10 kV/200 A Drehstrom mit zwölf Unterbrechereinheiten weiterentwickelt. Da die Konstruktion sehr unhandlich und teuer, die Anwendung von Quecksilber nicht ungefährlich war, wurde die Produktion dieser Quecksilberschalter nach wenigen Jahren aufgegeben.

Einen ersten großen Fortschritt im Schaltanlagenbau brachte die Einführung des 3-Phasen Hochspannungssystems. Es mußten vollkommen neue Wege beschritten werden, da jetzt die aus der Fernmeldetechnik übernommenen Isolatoren, Leitungen und Schaltanlagen den schnell wachsenden Spannungen und Leistungen nicht mehr gewachsen waren und typische hochspannungs- und starkstromspezifische Lösungen gefunden werden mußten:

*Die steigende Ausbreitung der Hochspannungs-Ueberlandcentralen, deren Leitungsnetze sich bei manchen Anlagen schon über 100 km erstreckt, stellt an die Schalt- und Sicherheitsapparate sowohl in der Centrale, als auch in den Vertheilungs- und Transformatorstationen höchste Anforderungen hinsichtlich der Betriebssicherheit und der Gefahrlosigkeit für die Bedienung.*

...  
*Bei Verwendung sehr hoher Spannungen zeigen sich ausserdem noch Vorgänge statischer Natur, denen der Konstrukteur durch geeignete Wahl der Isolations- und Metallverhältnisse abhelfen muss. Ebenso ist auf entsprechende Anordnung der Konstruktionstheile hinsichtlich der Feuersicherheit, reichlicher Dimensionirung gegen Ueberhitzung, gute Anschlussvorrichtungen und Verlegung der Funken an besonders dazu ausgebildete und leicht ersetzbare Kontakte ein Hauptaugenmerk zu richten. Namentlich letzter Punkt ist von nicht zu unterschätzender Wichtigkeit. Man muss dem Lichtbogen einen ganz bestimmten Weg, den er gern geht, vorschreiben, um zu verhindern, dass er an anderen Stellen z. B. auf das Gestell und benachbarte Apparate überschlägt und so zu manchmal echt unliebsamen Betriebsstörungen Veranlassung giebt.*

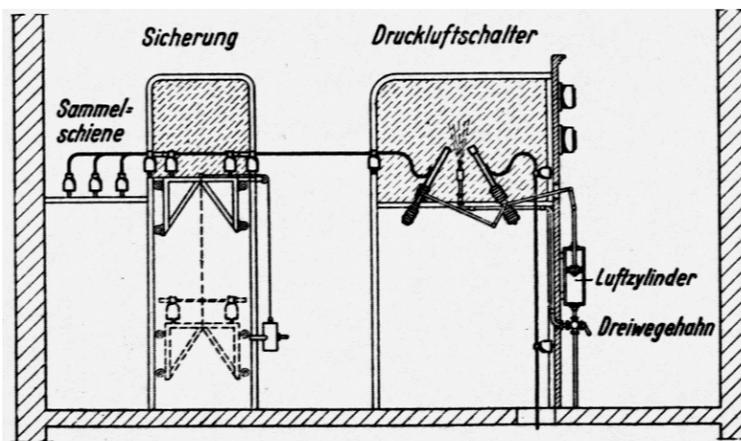
...  
*Ferner ist als Haupterforderniss möglichst grosser Raum für die Unterbringung der Apparate zu nennen. Viele ausgeführte Schaltanlagen kranken unter dem Umstande, dass man den Erbauern eine unverhältnissmässig kleinen Platz zur Verfügung gestellt hatte.*

*Es kann nicht genug betont werden, dass ein so wichtiger Theil wie die Schalttafel einer Centralanlage mindestens das gleiche Recht auf luftige helle und ausgedehnte Raumverhältnisse hat, als eine Maschine. Während man bei letzterer den Raum für dieselbe nach einer vorher erhaltenen Fundamentzeichnung festsetzt, muss sich der Schalttafelerbauer in den meisten Fällen mit kleinen, dunklen, übriggebliebenen Plätzen behelfen [Bertram 00].*

Auch auf die Sicherheit und den Ausbildungsstand des Bedienungs- und Wartungspersonals wurde nun größerer Wert gelegt:

Das Betriebspersonal hatte damals noch so wenig Achtung vor der Hochspannung, daß es z.B. einen in der Schaltanlage entstandenen Lichtbogen mit der Mütze auszuschlagen versuchte [Probst 31].

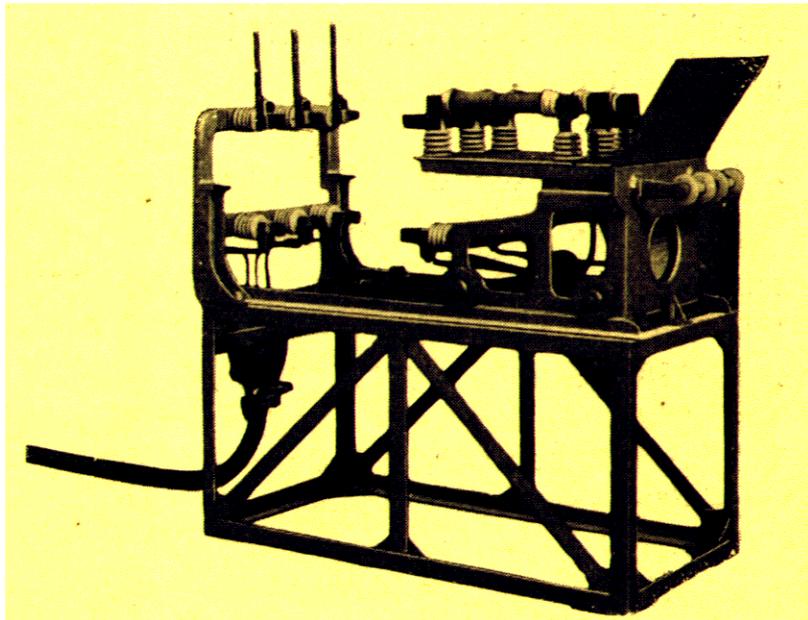
Jedenfalls ist die Kontrolle der Apparate mit gewissen Umständlichkeiten verknüpft und bei nicht ganz sorgfältig handelndem Betriebspersonal wird sich in dieser Beziehung bald eine gewisse Nachlässigkeit einbürgern, die schwere Folgen haben kann. Meistens behelfen sich dann die Leute mit Gummihandschuhen und Gummischuhen, die aber nur einen trügerischen Schutz gewähren, denn die kleinste defekte Stelle an denselben, welche auch schon durch längeren Nichtgebrauch entstanden sein kann, ist unter Umständen genügend, den Tod des damit Arbeitenden herbeizuführen [Bertram 00].



**Bild 1.3:** 6 kV-Schaltanlage, Kraftwerk Oberspree, Berlin, 1897

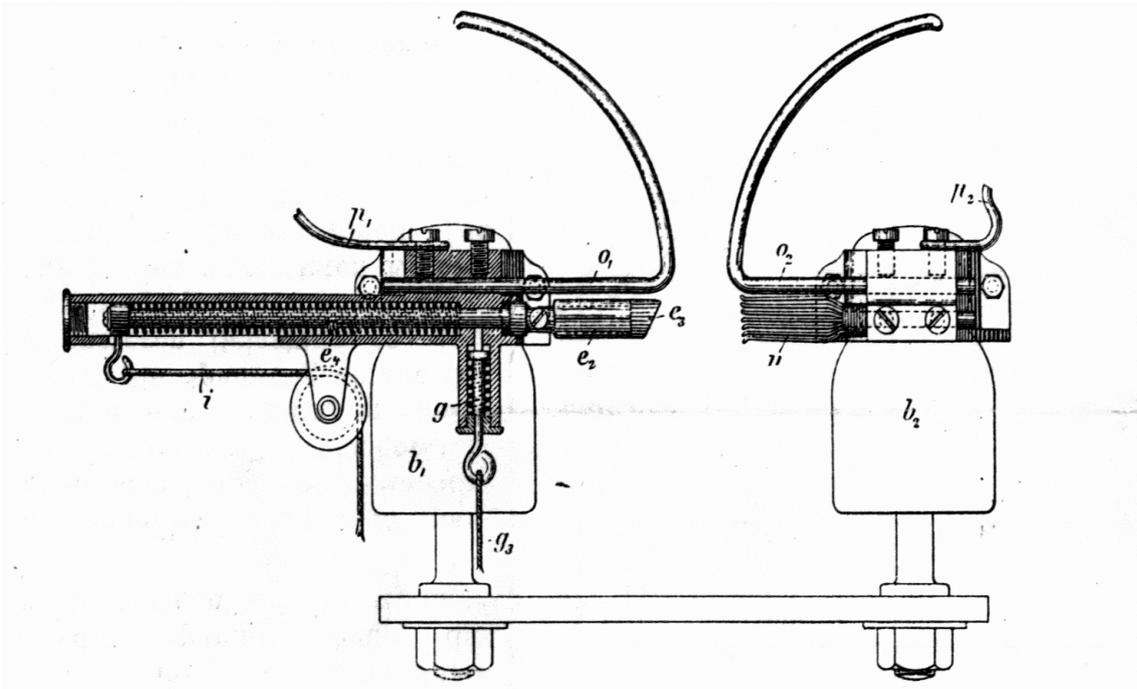
Als Beispiel für den Schaltanlagenbau in der Pionierzeit soll das Werk Oberspree in Berlin dienen, das erste Drehstromkraftwerk in Europa, welches 1895 mit einer Leistung von 2800 kW von der AEG gebaut und 1899 von den BEW übernommen wurde. Die Spannung von 6 kV wurde direkt von den Generatoren erzeugt und über Generator-Sicherungen, Luftschalter und Sicherungen, die über ein senkrecht bewegliches Fahrgestell ausschaltbar waren, in die abgehende Freileitung eingespeist.

Die Schalter in dieser ersten Mittelspannungs-Schaltanlagen wurden als Hebelschalter nach dem Vorbild der Niederspannungsschalter mit entsprechend vergrößerten Abmessungen gebaut. Sie konnten pneumatisch und mechanisch betätigt werden. Die Druckluft wurde gleichzeitig zur Löschung des Lichtbogens verwendet, womit der erste Druckluftschalter erfunden war. Die Luftschalter dienten zum lastfreien Zu- und Abschalten, waren im heutigen Sinne also Trennschalter. Schaltungen unter Last und das Abschalten von Kurzschlüssen erfolgten über die ausfahrbaren Schmelzsicherungen [Probst 31, Krohne 35].



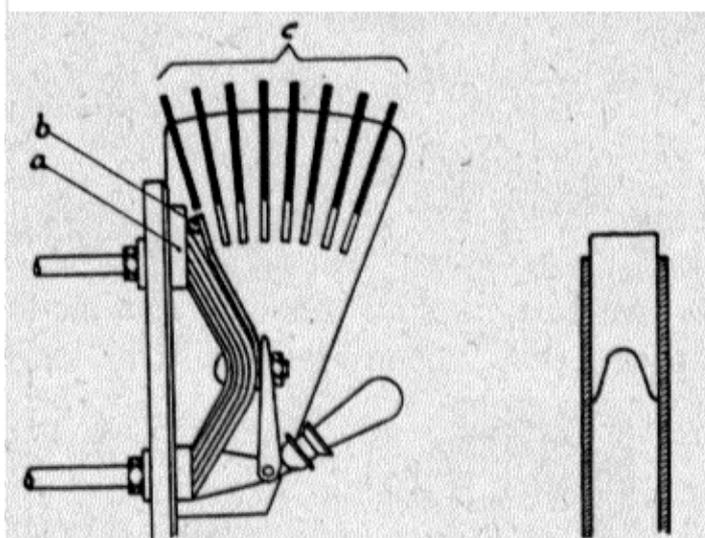
**Bild 1.4:** Ausfahrbare dreipolige Hochspannungs-Sicherung

In den Unterstationen, in denen die Grundfläche nicht so beschränkt war, wurde ein mit einem Amperemeter ausgerüsteter Sicherungswagen zum dreipoligen Ausfahren verwendet. Auch diese Konstruktion wurde gleichzeitig als Hochspannungsschalter verwendet und ist damit der Vorläufer der Schaltwagenanlagen.



**Bild 1.5:** Hochspannungs-Unterbrecher von Sprecher, Aarburg, 1900

Die Luftschalterkonstruktionen wurden weiter verbessert. Es wurden Ströme von 200 A bei Spannungen von mehr als 10 kV erreicht. Diese Konstruktionen arbeiteten mit Hörnerblitzableitern, die zur Verbesserung der Löschwirkung mit „Kaminen“ umgeben werden konnten. Gute Ergebnisse brachten auch Versuche mit einer Hörnerblitzschutzvorrichtung mit magnetischer Funkenlöschung, bei der der Lichtbogen durch die Wirkung des magnetischen Gebläses mit einem Luftschalter gelöscht werden konnte. Diese Erkenntnisse führten 1914 zur Entwicklung der Vielfachfunkenkammer mit Magnetblaseeinrichtung durch Dolivio-Dobrowolski, dessen Patent 1928 in den USA von Slepian aufgegriffen wurde und zur Entwicklung der Deion-Schalter der Firma Westinghouse führte [Cohn 30].

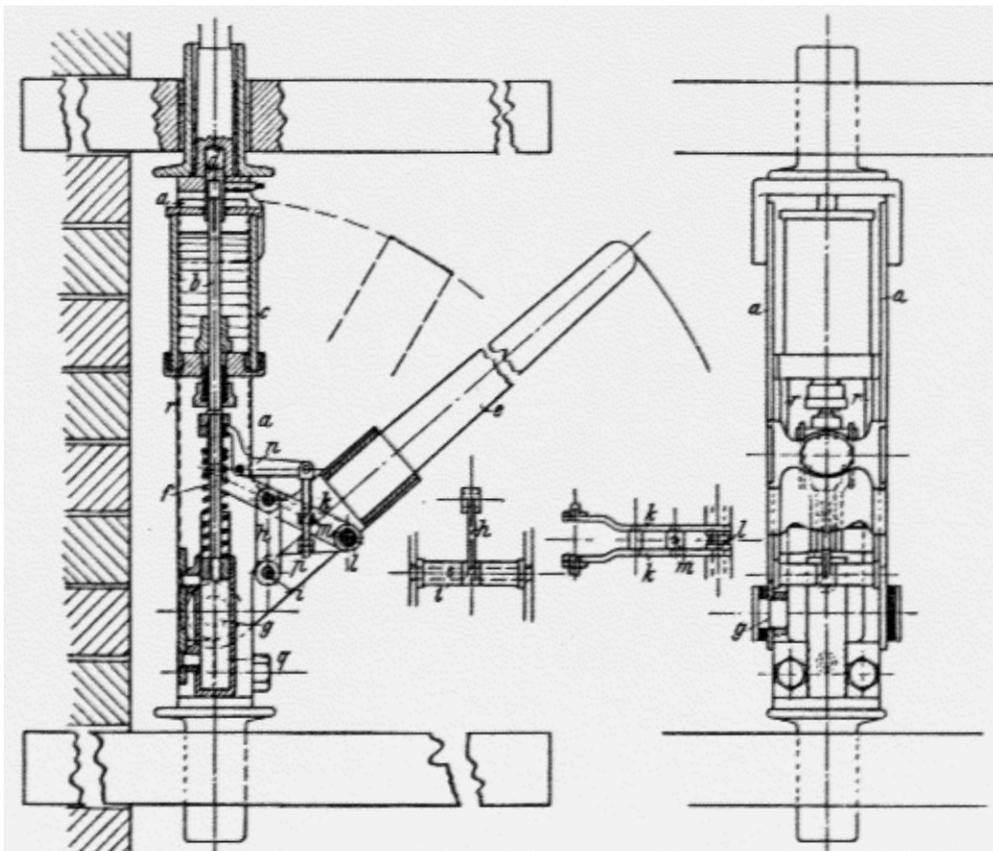


**Bild 1.6:** Vielfachfunkenkammer nach Dolivio-Dobrowolski

Den immer größer werdenden Schaltbeanspruchungen waren die Luftschalter nicht immer gewachsen. Es entstanden Schaltlichtbögen, die auch durch die Beblasung mit Druckluft nicht immer gelöscht werden konnten. Deshalb wurden schon vor der Jahrhundertwende erfolgreiche Versuche unternommen, den Lichtbogen unter Öl zu löschen. Die kurz darauf entwickelten Druckgas- und Wasserschalter konnten sich zu diesem Zeitpunkt gegen die technisch und wirtschaftlich überlegenen Ölschalter nicht mehr durchsetzen und wurden erst 25 Jahre später wieder aufgegriffen. Auch das Prinzip des Vakuumschalters war schon bekannt:

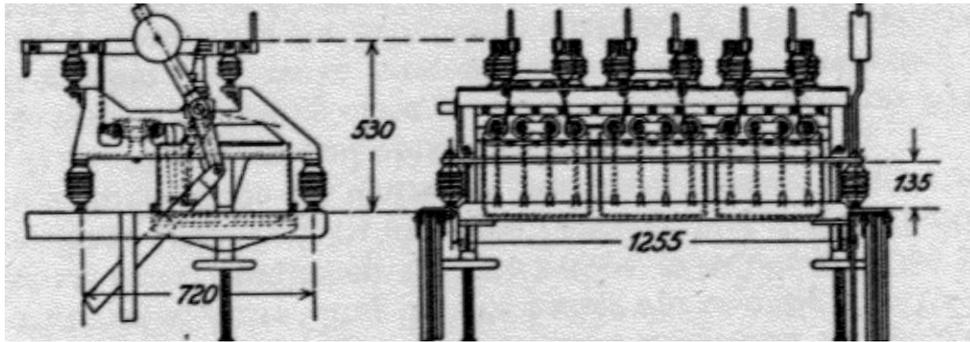
*Generatorausshalter werden allerdings nur im Nothfalle bei Vollbelastung in Funktion gebracht. Tritt aber eine solche Nothwendigkeit ein, so geschieht es auf Kosten der Maschinen- und Apparatewicklungen, die infolge der auftretenden hohen Spannungen durchschlagen können (speziell bei Gleichstrommaschinen), und zwar um so sicherer, je rascher die Unterbrechung erfolgt. Eine solche plötzliche Unterbrechung führen nun aber alle diejenigen Ausschalter (Vakuumschalter und Oelschalter u.s.w.) herbei, die zwecks Schonung der Kontakte und, um überhaupt den entstehenden Funken am Ausdehnen zu verhindern, denselben sofort zu ersticken suchen [Schuh 02]. Bis die Vakuumschaltröhren zu ihrer heutigen technischen Reife gelangten, dauerte es noch 60 Jahre.*

Die ersten Schalter, die den Ausschaltlichtbogen in einem Ölbehälter löschten, wurden 1895 von Ferranti in England gebaut. Der Schalter bestand aus einem Luftschalter mit zwei Hauptkontakten und einem nacheilenden Stiftkontakt in einem Ölbehälter. Der Stiftkontakt befand sich im eingeschalteten Zustand oberhalb des Öltopfes und wurde beim Ausschalten von einer gespannten Feder schnell in das Öl gezogen. Der Lichtbogen entstand also in Luft und wurde dann unter Öl gelöscht. Der Schalter war eine Spezialkonstruktion für ein Einphasensystem mit coaxialen Kabeln [Vogelsang 29].

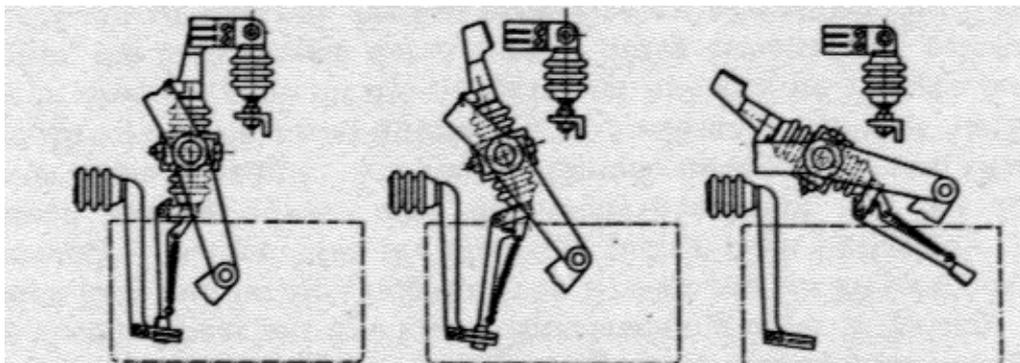


**Bild 1.7:** Ölschalter nach Ferranti, Patentzeichnung 1895

Auf Vorschlag von C.E.L. Brown wurde von der Firma Brown, Boveri & Cie. ein Ölschalter mit geschlossenem Ölbehälter, zwei Hauptunterbrecherkontakten, vier nacheilenden Lichtbogenlöschkontakten unter Öl und Durchführungen an der Oberseite des Behälters entwickelt, die in der 1897 zur Versorgung Mailands in Betrieb genommenen Schaltanlage Paderno d'Adda installiert wurden. Diese Konstruktion wurde zum Vorbild für alle Ölschalterkonstruktionen, die aufgrund ihrer technischen und wirtschaftlichen Überlegenheit den Markt über 30 Jahre lang unangefochten beherrschten [Rung 03, Vogelsang 29].



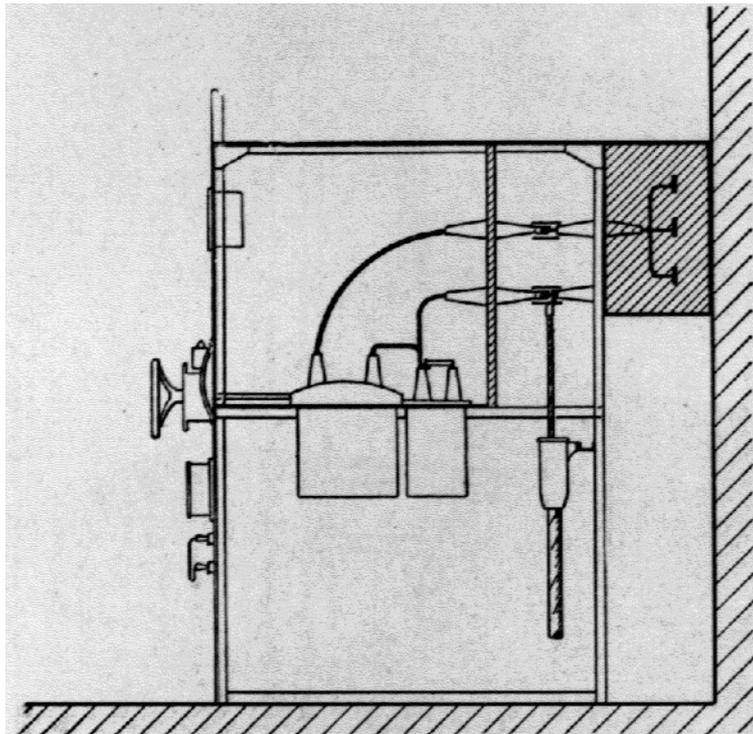
**Bild 1.8 a:** Padernoschalter von BBC



**Bild 1.8 b:** Padernoschalter von BBC, Schaltvorgang

Für die Schaltanlagen konnte ein sehr kompakter Aufbau entwickelt werden. Der dreipolige Ölschalter ersetzte die Hochspannungssicherungen und die Luftschalter wurden zusammen mit allen notwendigen Schalt- und Meßapparaten auf einem ausfahrbaren Gestell montiert. Die erste Schaltwagenanlage wurde 1903 nach Buenos Aires geliefert. Dieser Anlagentyp wurde laufend verbessert, um einen größeren Abstand der Trennkontakte und eine verbesserte Leitungsführung zu erzielen. Die Meßinstrumente, Schalter und Relais wurden auf einer Blechplatte montiert, die den Schaltwagen zur Bedienseite hin abschloß. Um jede Gefahr für das Bedienpersonal auszuschließen, wurden 1905 die Sammelschienen in einem geschlossenen Blechkasten untergebracht, der mit Isolierflüssigkeit gefüllt werden konnte. Eine solche gekapselte Schaltanlage wurde im Elektrizitätswerk in Haag, Niederlande, installiert [Probst 28/31].

Gekapselte, mit Öl isolierte Schaltfelder fanden bei den deutschen Energieversorgern keinen Anklang, es wurden gemauerte Zellensysteme favorisiert. Aus Sicherheitsgründen führte man die Anlagen mehrgeschossig aus. Die Ölkesselschalter wurden aufgrund der Gefahr von Explosionen und Bränden in einem separaten Geschoß mit nach außen offenen Zellen untergebracht. In England hingegen wurde die gekapselte Bauform zu gußeisengekapselten, ölisolierten Schaltanlagen weiterentwickelt. In Deutschland kamen solche Anlagen nur im Bergbau und in Innenstädten mit beengten Platzverhältnissen und hohen Grundstückspreisen zur Anwendung [Probst 28, Krohne 35].



**Bild 1.9:** Schaltwagen mit gekapselten, ölisolierten Sammelschienen

Schaltanlagen wurden bis in die 20er Jahre in Europa fast ausschließlich in Schalthäuser eingebaut, während in den USA schon 1905 preisgünstigere Freiluftanlagen ausgeführt wurden. Der Aufbau von Hochspannungs-Schaltanlagen wurde bereits 1926 im Rahmen einer Dissertation am Beispiel von 24 verschiedenen Ausführungsarten untersucht [Bewerungen 26]. Diese waren weder bezüglich der elektrischen Ausstattung noch im Verwendungszweck gleichwertig. Eine Schottung der Anlagenteile untereinander wurde durch einen Aufbau in Schalthäusern realisiert. Die Schaltanlagen waren mit Ölkesselschaltern ausgerüstet. Bauformen waren:

1. *Ein dreistöckiges Schalthaus mit Oelschaltern im Mittelstock,*
2. *ein zweistöckiges Schalthaus mit Oelschaltern im Oberstock,*
3. *ein einstöckiges Schalthaus mit versenkt eingebauten Oelschaltern.*

*Es ergab sich:*

*Bei 1) Unübersichtlichkeit; weite Wege des Bedienpersonals; daher Gefahr der Fehlschaltungen und leichte Gefährdung von Personen; Möglichkeit der Entzündung von Oelschaltergasen; Gefährdung durch Oelschalterexplosionen.*

*Bei 2) Bessere Uebersicht; Wege verkürzt; Gefahr der Fehlschaltungen und Gefährdung von Personen vermindert; Möglichkeit der Entzündung von Oelschaltergasen und Gefährdung durch Oelschalterexplosionen bleiben bestehen; Verminderung der Erstellungskosten.*

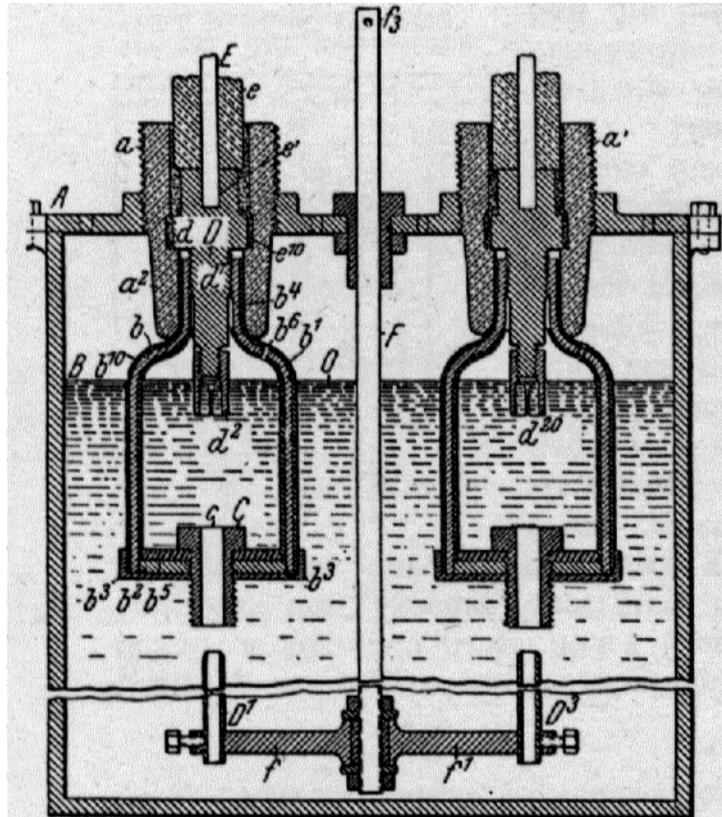
*Bei 3) Vollkommene Uebersicht; Bedienung von einer Stelle aus; Fehlschaltungen und Gefährdung von Personen so gut wie ausgeschlossen; Gase von der Anlage ferngehalten, daher keine Entzündungsmöglichkeit; die Wirkung einer etwa doch auftretenden Explosion wird durch Oeffnungen ins Freie geleitet und ist daher unschädlich; weitere Verminderung der Erstellungskosten.*

Als die Übertragungsspannungen auf 200 kV gesteigert wurden, stieß die Verwendung von Ölschaltern an ihre physikalischen und wirtschaftlichen Grenzen. Es wurden Ölschalter mit 8...9 m Höhe, 30 t Gesamtgewicht und 20 t Ölfüllung je Pol, die fast ausschließlich zur Isolation und nicht zur Lichtbogenlöschung dienen, gebaut [Kesselring 33]. Beim Bau der Schaltanlage mußten für diese „Dinosaurier“ ausgelegte Montagetürme, Kranablagen und Ölreinigungsanlagen vorgesehen werden. Aus dieser Situation ergab sich die dringende Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Hochspannungsschalter.



**Bild 1.10:** Größenvergleich von 750 V, 110 kV und 220 kV-Innenraum-Schalter, 1926

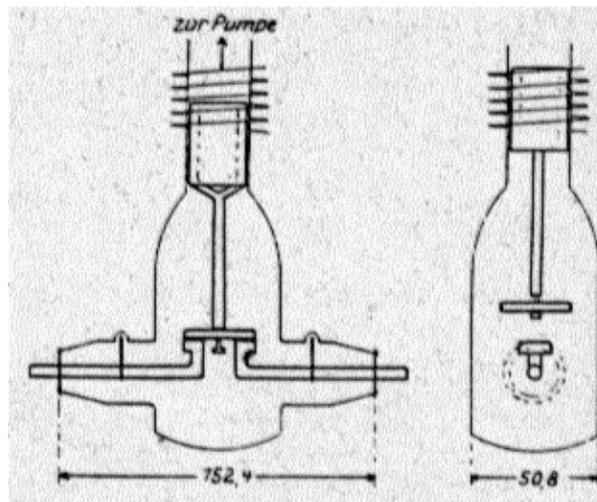
Die Entwicklung ölarmen und ölloser Schalter setzte in den 20er Jahren ein. Man hatte erkannt, daß zur Lichtbogenlöschung auch bei 200 kV einige Kubikzentimeter Öl ausreichen, wenn eine geeignete Schaltkammer eingesetzt wird. Das erste Patent für eine Löschkammer wurde 1908 von Hilliard und Parson (GEC) angemeldet [Hilliard 08].



**Bild 1.11:** Ölschalter mit Löschkammern, Patent von Hilliard und Parson, 1908

Die Aufgabe bestand darin, einen Schalter zu bauen, bei dem die Flüssigkeit nur zur Lichtbogenlöschung verwendet wurde und die Isolation mit Hilfe fester Isolatoren und Luft erfolgte. Es wurden verschiedene ölarme Schalter mit selbsterzeugter und fremderzeugter Ölströmung entwickelt, die als Expansionsschalter (Siemens), Druckausgleichsschalter (Asea, Voigt & Haeffner), Konvektorschalter (BBC), Strömungsschalter (Sachsenwerk), und Ölstrahlschalter bezeichnet sind [Schwenk 36].

Der erste brauchbare öllose Hochleistungsschalter ist der bereits erwähnte Luft-Deion-Schalter nach Slepian in den USA aus dem Jahre 1928 [Slepian 28]. Er wurde von Westinghouse zunächst bis zu Spannungen von 15 kV in Hochspannungs-Luftschützen angewendet. Fast gleichzeitig wurden 1926 die ersten Berichte über drei verschiedene Vakuum-Schaltröhren von Sorensen und Mendenhall in den USA publiziert. Es gelang bereits erfolgreich, Ströme von 926 A bei 41,5 kV zu unterbrechen [Sorensen 26].



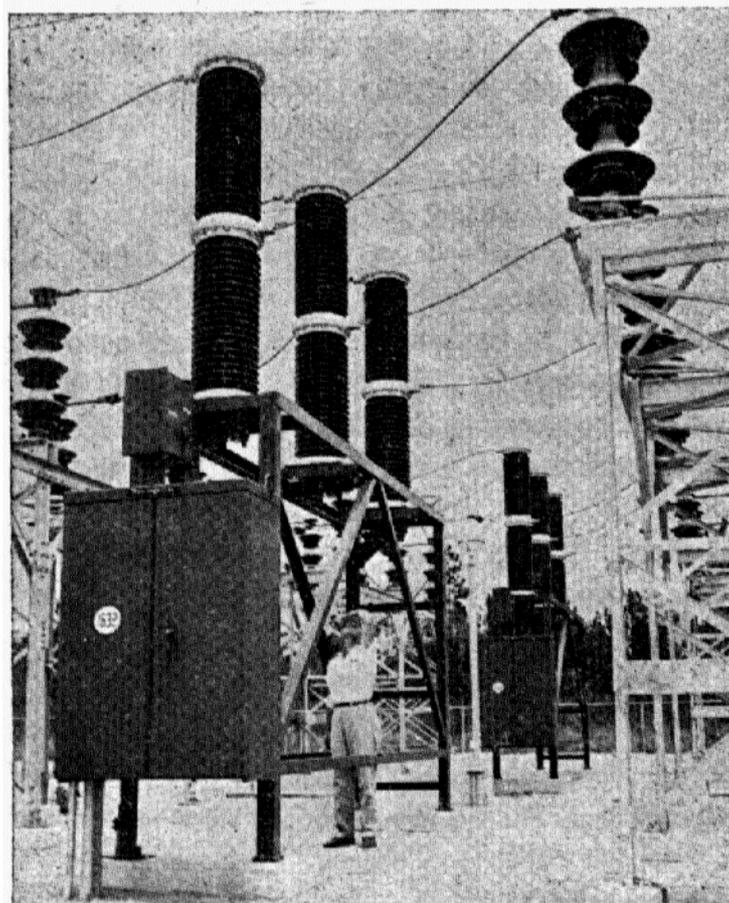
**Bild 1.12:** Einfacher Vakuumschalter von Sorensen und Mendenhall, 1926

Es wurden aber auch alte Entwicklungslinien wieder aufgenommen. Beim Wasserschalter, der schon 1900 in den USA und in England gelegentlich zur Anwendung kam, wurde Wasser zur Lichtbogenlöschung verwendet. Er ist eine Parallelentwicklung zum Öl-Expansionsschalter. Eine Sonderrichtung stellt der Hartgasschalter der AEG dar, bei dem der Schaltstift als Rohr ausgeführt ist, das innen und außen von gasabgebendem Isoliermaterial umgeben ist. Das benötigte Löschgas wird bei jedem Ausschaltvorgang durch die Hitze des Lichtbogens freigesetzt.

Die Druckluft- oder Druckgasschalter mit einem Düsensystem, bereits 1901 von Read erfunden [Read 01], kamen erst jetzt wegen ihrer großen Vorteile zur Anwendung. Ihre Leistungsfähigkeit wurde durch die Erfindung der Ruppel-Düse von AEG stark verbessert [Ruppel 27], das Geräusch wurde durch einen Schalldämpfer vermindert. Druckgasschalter konnten bereits 1929 für Spannungen bis zu 110 kV angeboten werden. Für große Ausschaltleistungen wurden die Freistrahlschalter für Spannungen von 110 bis 765 kV gebaut, die den Markt für Höchstspannungs-Schalter bis in die 70er Jahre unangefochten beherrschten. Einziger Nachteil der Freistrahlschalter ist das hohe Schaltgeräusch, das durch bessere Gestaltung im Düsenbereich und die Entwicklung eines stromstärkeabhängigen Düsendrucks zwar deutlich vermindert, aber nicht beseitigt werden konnte [Leber 67, Kaehne 67].

Durch die Entwicklung ölarmer und öllöser Schalter konnte der Aufbau der Schaltanlagen neu überdacht werden. Vor 1930 mußten nämlich die Auswirkungen von Ölschalterexplosionen unbedingt beachtet werden. Die Ölschalter wurden deshalb in Zellen gestellt, die nach außen hin offen oder nur durch leichte Türen, die sich bei Überdruck öffneten, verschlossen waren. Teilweise wurden die Ölschalter auch versenkt eingebaut. Unter den Schaltern waren Ölauffangwannen angeordnet. Sammelschienen und Trennschalter waren in darüberliegenden Stockwerken untergebracht. Jetzt hatte man durch die neuen Schalter die Möglichkeit, wieder zu den eingeschossigen Bauformen zurückzugehen [Kesselring 39].

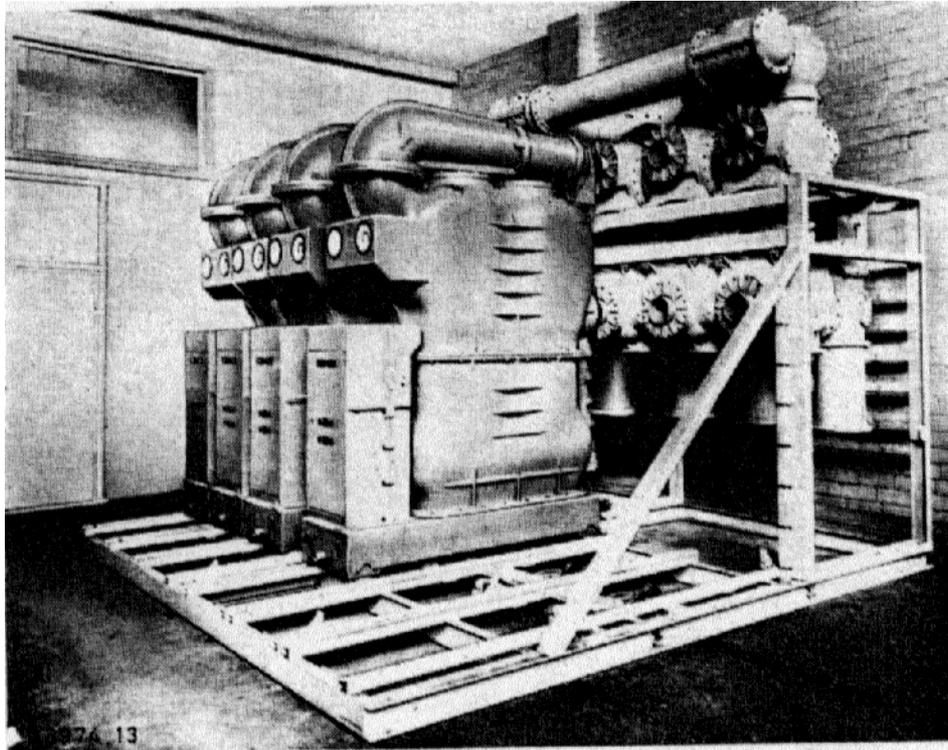
Von den Schaltanlagenherstellern wurde schon sehr früh nach einer Alternative zu den Löschmitteln Öl und Luft gesucht. Dieses Löschmittel sollte bessere Isoliereigenschaften als Luft besitzen und unbrennbar sein. 1910 wird eine Sicherung mit Tetrachlorkohlenstoff konstruiert, die sich jedoch als völlig unbrauchbar erweist. Auch die nicht brennbaren Schalteröle wie Pentachlorethan hatten wesentlich schlechtere Eigenschaften als normale Öle [Stern 16]. Es wurde mit vielen Isoliergasen experimentiert, bis man auf das Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) stieß, das 1938 als elektrisches Isoliermittel und Lichtbogenlöschmittel für elektrische Apparate patentiert wurde [Cooper 38, Grosse 38]. Die Einführung der  $\text{SF}_6$ -Technologie erfolgte in den USA. Ein erstes Patent für einen  $\text{SF}_6$ -Schalter wurde 1951 vergeben [Lingal 51]. Der erste Lastschalter mit  $\text{SF}_6$  als Löschmittel für Spannungen von 15 bis 161 kV und Ströme von 600 A wurde 1953 [Lingal 53], der erste Leistungsschalter für 115 kV und 5 kA 1956 von Westinghouse installiert [Henry 58].



**Bild 1.13:** Erster  $\text{SF}_6$ -Leistungsschalter für 115 kV, Westinghouse, 1956

In Deutschland wurden  $\text{SF}_6$ -Schalter seit 1964 auf den Markt gebracht, und verdrängen seitdem die Freistrahlschalter [Einsele 64]. Die erste metallgekapselte, mit  $\text{SF}_6$  isolierte Hochspannungsschaltanlage wurde 1965 in Deutschland von Calor-Emag vorgestellt [Brückner 65]. In diese Anlage waren noch ölarme Schalter eingebaut.

1960 arbeiteten im deutschen 220 kV-Netz noch 96 % aller Hochspannungs-Schalter nach dem Druckgas-Prinzip, 1993 waren 53 % SF<sub>6</sub>-Schalter, 35 % Druckgas-Schalter und 12 % ölarmer Schalter. Noch deutlicher ist heute die Dominanz der SF<sub>6</sub>-Schalter im 380 kV-Netz mit 72 % SF<sub>6</sub>-, 18 % Druckgas- und 10 % ölarmer Schaltern.



**Bild 1.14:** Erste SF<sub>6</sub>-gasisolierte Schaltanlage, Calor-Emag, 1965

SF<sub>6</sub>-Schalter konnten sich in der Mittelspannungsebene nicht so durchsetzen wie im Hochspannungsbereich. Hier etablierte sich neben den weitverbreiteten, aber heute nicht mehr produzierten, ölarmer Schaltern seit 1963 die Vakuum-Schalttechnik [Shores 75]. Der erste 15,5 kV Vakuum-Leistungsschalter von GEC beherrschte Ausschaltströme bis 12 kA. In Deutschland ersetzte das Hochspannungs-Vakuumschütz seit 1972 die konventionellen Luftschütze [Frewe 72], 1977 folgte der erste Vakuum-Leistungsschalter [Janker 77]. Heute werden bei luftisolierten und gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen von fast allen deutschen Herstellern Vakuum-Leistungsschalter angeboten. Auf dem Weltmarkt für Mittelspannungsanlagen sind SF<sub>6</sub>- und Vakuum-Leistungsschalter derzeit etwa gleich stark vertreten, in Europa überwiegt außerhalb Deutschlands die SF<sub>6</sub>-Schalttechnik [Brüggemann 97].

## 1.2 Heutige Bauformen von Mittelspannungs-Schaltanlagen

Mittelspannungs-Schaltanlagen werden heute in Deutschland nach zwei Normen gefertigt:

- nicht typgeprüfte Schaltanlagen nach DIN VDE 0101,
- typgeprüfte fabrikfertige Schaltanlagen nach DIN VDE 670/ IEC 298.

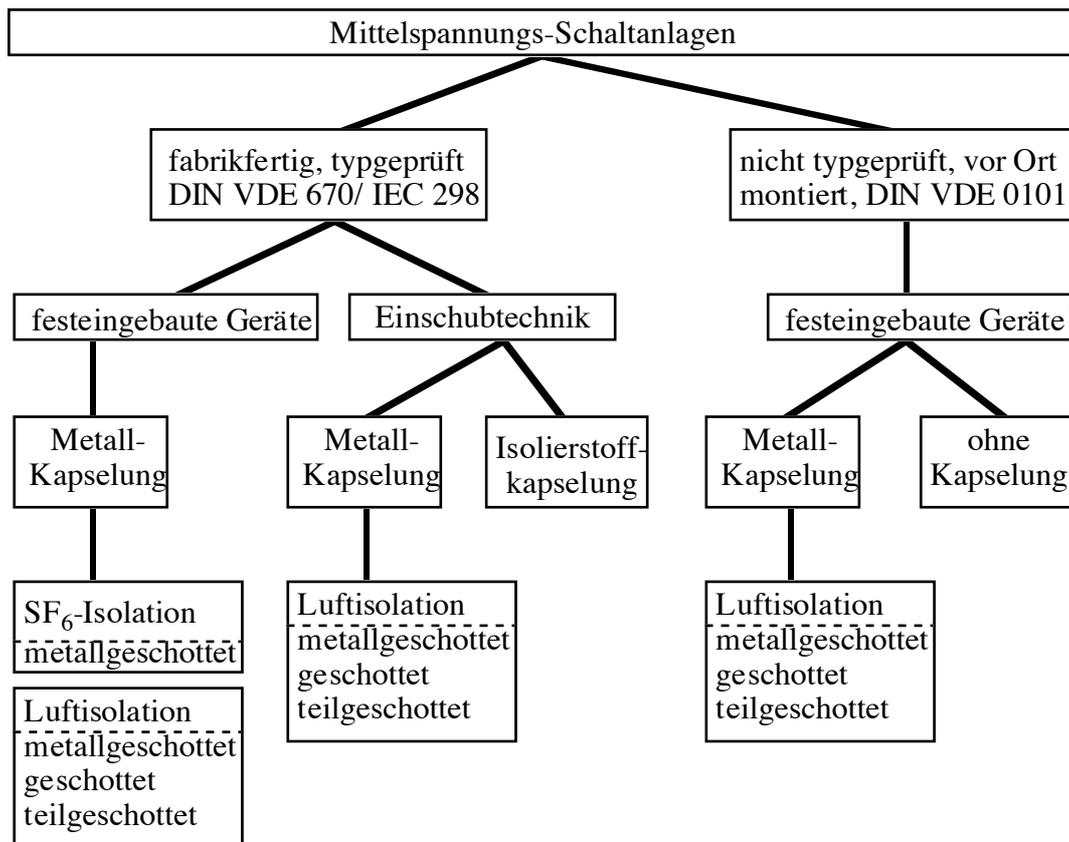
Schaltanlagen nach VDE 0101 sind nicht typgeprüft, werden aber mit typgeprüften Betriebsmitteln (Leistungsschaltern, Trennern, Wandler etc.) gebaut. Die Sicherheit wird durch festgelegte Mindestabstände hergestellt, die auf Erfahrungswerten beruhen. Diese Schaltanlagen sind deutlich größer als entsprechende typgeprüfte Anlagen. Deshalb muß weniger Isolierstoff eingesetzt werden, wodurch die Brandlast sinkt und die Anlagen unempfindlicher gegen Feuchte und Verschmutzung sind. Konventionelle Schaltanlagen nach VDE 0101 werden zwar immer mehr durch typgeprüfte Anlagen verdrängt, doch stellten sie 1993 noch mehr als 86 % des Anlagenbestandes.

Typgeprüfte Schaltanlagen nach VDE 670/ IEC 298 werden nach internationaler Norm gefertigt und können deshalb gut exportiert werden. Die Anlagen müssen als Typprüfung umfangreiche Isolationsprüfungen, Stromtragfähigkeitsprüfungen, die Prüfung des Ein- und Ausschaltvermögens im Kurzschlußfall und eine mechanische Funktionsprüfung erfolgreich absolvieren. Die Fertigungsqualität wird durch Stückprüfungen überwacht. Die Abstände dieser Schaltanlagen werden nach elektrischen Bemessungsgrößen dimensioniert. Die Nennstehblitzstoßspannung ist dabei maßgeblich für die Gestaltung der Elektroden und deren Abstände verantwortlich. Dadurch konnte das benötigte Volumen der Schaltanlagen erheblich reduziert werden.

Mittelspannungs-Schaltanlagen werden fast ausschließlich als Innenraumanlagen ausgeführt. In ganz Deutschland waren 1993 nur 352 (5,6 %) der 10 kV-Anlagen (West: 8, Ost: 344), 46 (1,0 %) der 20 kV-Anlagen (West: 8, Ost: 38) und 170 (16,4 %) der 30 kV-Anlagen (West: 104, Ost: 66) als Freiluft-Schaltanlagen ausgeführt.

**Offene Schaltanlagen** bieten keinerlei Schutz gegen äußere Einwirkungen. Deshalb können sie nur in sauberen, trockenen, beheizten oder klimatisierten Räumen eingebaut werden. Die offene Bauform ist noch zulässig, wird aber heute nicht mehr neu errichtet.

**Schaltanlagen mit festeingebauten Geräten** bieten für den Betreiber eine große Flexibilität. Die Anlage kann in eigener Regie geändert und erweitert werden. Nach Störungen können die Schäden schnell behoben werden, so daß die Verfügbarkeit ist dadurch sehr hoch ist. Allerdings wird der Austausch und die Wartung der Geräte durch den Festeinbau erschwert, da die Anschluß- und Halteschrauben gelöst und die schweren Geräte bewegt werden müssen.



**Bild 1.15:** Bauformen von Mittelspannungs-Schaltanlagen

**Schaltanlagen mit Einschubtechnik** sind besser zugänglich und leichter zu warten. Trenner werden durch die Einfahrkontakte ersetzt. Dadurch entfällt eine zusätzliche Fehlerquelle und der Wartungsaufwand verringert sich.

**Teil- und nichtgeschottete Schaltanlagen** bieten nur eine geringe Begrenzung der Störungsauswirkungen. Arbeiten in den Feldern können erst durchgeführt werden, wenn benachbarte, unter Spannung stehende Anlagenteile abgedeckt oder abgeschränkt sind. Der Vorteil dieser Anlagen ist die kurze Zeit für Wiederinstandsetzung nach Schäden in der Anlage.

**Geschotte Schaltanlagen** haben eine innere Unterteilung in verschiedene Funktionsräume. Dadurch werden Störungsauswirkungen auf einen Funktionsraum begrenzt. Es besteht automatisch ein Berührungsschutz bei Arbeiten an einzelnen Geräten der Anlage, wenn benachbarte Anlagenteile unter Spannung bleiben.

**Gas- und luftisolierte metallgekapselte Schaltanlagen** sind von äußeren Störeinflüssen (Feuchte, Fremdschichten, Korrosion) weitestgehend unabhängig. Dadurch besteht eine sehr geringe Störungswahrscheinlichkeit durch äußere Einflüsse. Fehlbedienungen werden durch Verriegelungen verhindert. Bei einpoliger Kapselung wird die Störungsauswirkung noch weiter begrenzt. Es sind Erdschlüsse, aber keine Kurzschlüsse möglich.

### 1.3 Störungsanalyse von Mittelspannungs-Schaltanlagen

Eine Störungsanalyse ist die Voraussetzung für die Planung einer technischen Diagnostik von Schaltanlagen, und gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit der Betriebsmittel. Dabei kann eine generelle Analyse der Betriebsmittel einer Spannungsebene bei der großen Vielfalt der ausgeführten Konstruktionen nur einen Anhaltspunkt geben.

Vorbild für eine aussagefähige Fehlerstatistik sind zwei internationale Fehlerumfragen zur Zuverlässigkeit von Leistungsschaltern für Betriebsspannungen  $\geq 63$  kV, die von der Cigré-Arbeitsgruppe 13.06 in den Jahren 1974-77 und 1988-91 durchgeführt wurden. Die beiden Umfragen unterscheiden sich insofern, als bei der ersten Untersuchung alle Schalterarten, die nach dem 1. Januar 1964 installiert wurden, bei der zweiten nur moderne SF<sub>6</sub>-Eindruck-Leistungsschalter untersucht wurden, die nach dem 1. Januar 1978 in Betrieb genommen wurden. Die wichtigsten Ergebnisse zeigt **Tabelle 1.1**:

	1974-77	1988-91
teilnehmende Länder	22	22
teilnehmende Energieversorger	102	132
untersuchter Spannungsbereich	63 kV bis $\geq 500$ kV	63 kV bis $\geq 500$ kV
betrachtete Schalterjahre	77 892	70 708
mittlere Störungsrate	0,016	0,007
mittlerer MTBF	63,3 a	148,8 a
Störungsursache		
– Konstruktion und Fertigung	45,3 %	54,1 %
– Transport, Lager, Montage	11,2 %	15,3 %
– Wartung	8,1 %	2,8 %
– Überbeanspruchung	4,8 %	3,4 %
– sonstige, unbekannt	30,6 %	24,4 %
Störungsarten		
– mechanisch	70,3 %	61,6 %
– elektrisch (Hauptstromkreis)	10,6 %	13,9 %
– elektrisch (Kontroll-, Hilfsstromkreis)	19,1 %	24,5 %

**Tabelle 1.1:** Zuverlässigkeit von Hochspannungs-Leistungsschaltern  
MTBF: Mean Time Between Failure

Eine solch umfangreiche Untersuchung existiert weder für Mittelspannungs-Leistungsschalter noch für komplette Mittelspannungs-Schaltanlagen. Es gibt für Deutschland allerdings die Möglichkeit einer Auswertung der VDEW Störungs- und Schadensstatistik, die seit 1951 jährlich veröffentlicht wird. Im Jahre 1993 wurden die Daten von 84 Energieversorgungsunternehmen und 439580 km Stromkreislänge in sieben Spannungsgruppen von 6 bis 380 kV erfaßt.

Die Auswertung der Statistik ist jedoch mit einigen Unsicherheiten verknüpft, da diese VDEW-Statistik keine Betriebsmittelstatistik ist. Eine Zuordnung der Betriebsmittel zu den Ortsnetzstationen und Schaltanlagen wird nicht vorgenommen. Bei Schäden an Schaltern wird nach Hauptstrombahn und Sekundäreinrichtungen unterschieden. Diese beiden Hauptgruppen sind noch einmal in die Schadensursachen Bemessung (mech./el.), Herstellung und Werkstoff, Montage, Betrieb und Unterhaltung, Überbeanspruchung (mech./el.), Minderung der Eigenschaften (mech./el.), Fremde Einwirkungen, Lichtbogeneinwirkungen und keine erkannte Schadensursache unterteilt. Dadurch ist ein Erkennen gehäuft auftretender Schadensursachen möglich. Die meisten Fehler treten jedoch sporadisch auf, so daß sich keine gesicherten Aussagen ableiten lassen. Eine grobe Einteilung nach Fehlerorten in der Schaltanlage ist durch die Daten für die Lage der Fehlerorte in der Schaltanlage gegeben:

Betriebsmittel \ U <sub>n</sub>	10 kV		20 kV	
	1992/ %	1993/ %	1992/ %	1993/ %
Sammelschiene	16,1	21,0	19,9	14,1
Feld	57,5	40,7	48,8	41,8
Transformator	24,1	33,3	21,7	29,9

**Tabelle 1.2:** Anteil der Störungen nach Fehlerorten an den Gesamtstörungen in den untersuchten Schaltanlagen der Jahre 1992 und 1993

Aus der Fülle des Datenmaterials der Jahre 1980 bis 1993 versuchte Balzer eine generelle Aussage über die Verfügbarkeit der Betriebsmittel abzuleiten [Balzer 97]:

Anlagen	U <sub>n</sub>			
	10 kV		20 kV	
	Anzahl (1993)	Schäden/ 100·a	Anzahl (1993)	Schäden/ 100·a
Innenanlagen	4 770	1,099	3 112	2,742
gekapselte Anlagen	518	5,641	659	8,276
<b>Anlagen*</b>	<b>5296</b>	<b>1,746</b>	<b>3779</b>	<b>4,977</b>

**Tabelle 1.3:** Anzahl der Schaltanlagen 1993 und störungsbedingte Schäden an 100 Anlagen je Jahr für den Zeitraum 1980 bis 1993 in den Spannungsebenen 10 und 20 kV  
\* einschließlich nicht aufgeführter Freiluftanlagen

Werden die Jahre 1992 und 1993 getrennt ausgewertet, ergeben sich folgende Werte für die verschiedenen Anlagentypen:

Anlage	U <sub>n</sub>			
	10 kV		20 kV	
	Schäden 1992/ 100·a	Schäden 1993/ 100·a	Schäden1992/ 100·a	Schäden1993/ 100·a
Innenanlagen	0,894	0,839	2,480	2,057
gekapselte Anlagen	5,400	3,668	7,529	7,587
<b>Anlagen</b>	<b>1,637</b>	<b>1,529</b>	<b>4,707</b>	<b>4,869</b>

**Tabelle 1.4:** Störungsbedingte Schäden an 100 Anlagen je Jahr für 1992 und 1993 in den Spannungsebenen 10 und 20 kV

Die Daten in Tabelle 1.4 zeigen, daß Mittelspannungs-Schaltanlagen weniger störanfällig geworden sind. Auch die Störanfälligkeit gekapselter Schaltanlagen hat abgenommen. Sie ist aber immer noch drei bis vier mal so hoch wie für die offenen konventionellen Innenanlagen. Für die verschiedenen Komponenten der Schaltanlagen errechnete Balzer nach einem hypothetischen Verteilungsschlüssel die folgenden Daten:

U Betriebsmittel	10 kV		20 kV	
	Betriebsmittel je Anlage	Anteil der Störungen/ %	Betriebsmittel je Anlage	Anteil der Störungen/ %
Leistungsschalter	6,63	15,6	8,20	16,0
Trennschalter	10,08	23,1	14,00	16,6
Erdungsschalter	0,77	0,3	0,91	0,1
Transformatoren	0,87	4,1	0,96	3,4
Spannungswandler	11,43	12,4	15,74	23,1
Stromwandler	22,08	12,6	25,77	21,2
Ableiter	–	–	1,04	4,5
sonstiges	–	31,9	–	15,1

**Tabelle 1.5:** Durchschnittliche Anzahl der Betriebsmittel je Anlagen 1993 und Anteil des Betriebsmittels an den Gesamtstörungen für die Jahre 1980 bis 1993

Aus dieser Auswertung läßt sich schließen, daß in der 10 kV-Ebene Leistungs-, Trenn- und Erdungsschalter für 39 % und Wandler für 25 % aller Schäden verantwortlich sind. Die Anteile in der 20 kV-Ebene betragen 44 % für Wandler und 33 % für die Schaltgeräte. Im untersuchten Zeitraum fanden jedoch große Veränderungen in der Konstruktion von Schaltanlagen statt. Deshalb wurden die Werte für den Anteil der einzelnen Betriebsmittel an den Gesamtstörungen der Jahre 1992 und 1993 gesondert ermittelt und in **Tabelle 1.6** dargestellt.

Betriebsmittel	10 kV		20 kV	
	1992/ %	1993/ %	1992/ %	1993/ %
Leistungsschalter	5,4	9,7	12,7	10,6
Trennschalter	34,6	31,4	20,0	13,9
Erdungsschalter	1,1	2,2	0,3	0,7
Transformatoren	34,6	21,6	25,1	21,9
Spannungswandler	5,4	4,3	7,9	9,5
Stromwandler	6,5	8,7	6,7	12,4
Ableiter	–	–	27,3	31,0
sonstiges	12,4	22,2	–	–

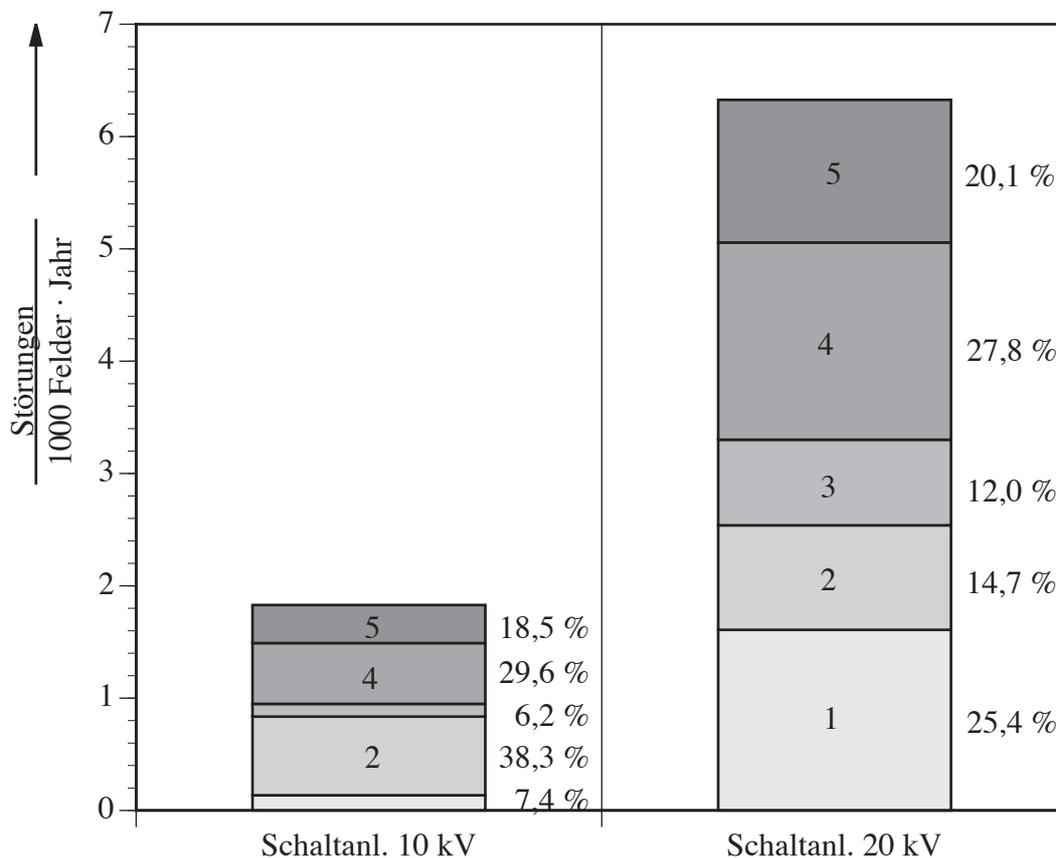
**Tabelle 1.6:** Anteil der Betriebsmittel an den Gesamtstörungen der Jahre 1992 und 1993

Die Daten zeigen, wie sich der Anteil der Betriebsmittel an den Gesamtschäden gegenüber dem langjährigen Mittelwert verschoben hat. Leistungsschalter sind sehr viel sicherer geworden. Diese Verbesserung kann auf den Einbau von Vakuumschaltern zurückgeführt werden, die heute in der Mittelspannungsebene einen Anteil von 11,6 % der installierten Leistungsschalter haben. Fehler in der Hauptstrombahn von Leistungsschaltern treten fast ausschließlich bei den ölarmen Schaltern auf, die mit einem Anteil von 74,4 % den größten Anteil bei den Leistungsschaltern haben. Häufigste Fehlerursache ist mechanische Überbeanspruchung. Der Anteil der durch Trennschalter, Transformatoren und Ableiter verursachten Störungen ist dagegen deutlich gestiegen. Dieses Ergebnis wird durch die Daten aus Tabelle 1.2 bestätigt. Fehler an Strom- und Spannungswandlern treten fast ausschließlich bei den feststoffisolierten Ausführungen auf.

Die hohe Störanfälligkeit von gekapselten Schaltanlagen ist unbefriedigend. Häufigste Störungsursachen sind Feuchtigkeit in der Schaltanlage und im Kabelkanal und Verschmutzungen in der Schaltanlage [Heiß 90]. Eine deutliche Verbesserung läßt sich durch den Einsatz von gekapselten, gasisolierten Schaltanlagen erzielen. Die hochspannungsführenden Teile sind dann nicht mehr der freien Atmosphäre und damit unterschiedlichen, sich ändernden Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dadurch läßt sich das Anlagenvolumen und der Einsatz fester Isolierstoffe auf ein Minimum reduzieren. Andererseits werden auch Fehler durch Witterung und fremde Einwirkung verhindert und dadurch die Fehleranfälligkeit um mehr als 40 % reduziert (**Bild 1.16**).

Für die technische Diagnostik von Mittelspannungs-Schaltanlagen lassen sich daher folgende Schlüsse ziehen:

- Die meisten Störungen entstehen im Schaltfeld. Deshalb ist hier der Einsatz von Überwachungseinrichtungen am sinnvollsten. Häufigste Störungsquellen sind Trennschalter und Wandler. Bei Leistungsschaltern ist die Mechanik am anfälligsten.
- Transformatoren sind heute sehr viel häufiger als im langjährigen Mittel von Störungen betroffen. Der Einsatz einer Diagnosetechnik für Transformatoren kann die Betriebssicherheit der Schaltanlagen deutlich verbessern.
- Durch die Einbeziehung der Sammelschienen in die Überwachung werden mehr als 85 % aller möglichen Störungsquellen innerhalb der Schaltanlage eingeschlossen.



**Bild 1.16:** Störungen und Anteil der Störungsursachen an Schaltanlagen für 10 kV und 20 kV im Jahre 1993 in Deutschland

- mit
- 1 Witterung (Sturm, Feuchtigkeit, Kälte, Fremdschichten)
  - 2 Fremde Einwirkungen (Tiere, Bagger, usw.)
  - 3 Gewitter
  - 4 kein erkennbarer Anlaß
  - 5 andere Störungen (Rückwirkungen, Fehlbedienungen)

## 2 Überwachung von Schaltgeräten

Moderne Schaltfelder werden mit digitalen Feldgeräten ausgestattet und sind an die digitale Stationsleittechnik angebunden [Ziegler 95]. Diese Systeme sind in Deutschland seit 1985 erfolgreich in Betrieb und werden ständig weiterentwickelt [Mainka 85]. Die vorhandenen Systeme lassen sich sinnvoll um Komponenten zur Überwachung und Diagnose von Schaltanlagen und Schaltgeräten erweitern.

Im Rahmen der Entwicklung und der Qualitätssicherung gewonnene Daten können zur Realisierung eines Diagnosesystems für Leistungsschalter verwendet werden. Leistungsschalter werden vor der Auslieferung im Werk einer Stückprüfung unterzogen. Dabei sollen Material- und Fertigungsfehler aufgedeckt werden. Besonders qualitätsbewußte Hersteller lassen die Schalter während der Stückprüfung die komplette statistische Einlaufphase absolvieren [Luxa 92]. Die Schalterkennwerte werden während der Einlaufphase ständig aufgezeichnet und können mit den Daten aus der Schalterentwicklung und den statistischen Daten aus der Stückprüfung verglichen werden. Dadurch sind Fehlerfrüherkennung und Prognosen zur Lebensdauer und Betriebssicherheit möglich.

Die Aussagefähigkeit der Diagnose hängt von der Auswahl der Meßgrößen und den Auswerteverfahren ab. Da der Meß- und Rechenaufwand mit steigender Zahl der Parameter steigt, ist je nach Schaltertyp und zu erwartenden Fehlerquellen eine sinnvolle Auswahl der Meßgrößen zu treffen.

Die zu überwachenden Größen sind beispielsweise:

- Kenngrößen der Mechanik (Winkel, Weg, Druck in den Antriebszylindern),
- Strom,
- Spannung,
- Gasdruck und Gaszustand in gasisolierten Anlagen,
- klimatische Daten (Temperatur, Luftdruck, relative Feuchte),
- Isolationszustand und Teilentladungen.

Ein Diagnosesystem registriert bei jeder Schaltung die Kenngrößen und vergleicht sie mit den während der Entwicklung und der Stückprüfung ermittelten Werten. Wenn vorgegebene Grenzwerte überschritten werden, wird eine Fehlermeldung ausgelöst. Das Bedienpersonal kann anhand der aufgezeichneten Daten den Zustand des Schaltgerätes analysieren und bedarfsgerecht Reparatur- oder Wartungsarbeiten veranlassen.

## **2.1 Funktionsweise eines Überwachungssystem**

Beim Einsatz eines Systems zur Betriebsüberwachung von Schalterantrieben vor Ort werden die Meßgrößen kontinuierlich aufgezeichnet und automatisch ausgewertet [Landry 93, Groth 93]. Durch einen Vergleich mit vorgegebenen Grenzwerten lassen sich kritische Veränderungen frühzeitig erkennen. Bei Grenzwertüberschreitungen werden Warnmeldungen ausgegeben. Es ist auch möglich, ein Schaltgerät bei schwerwiegenden Veränderungen in einen definierten Zustand zu versetzen, so daß keine Folgeschäden entstehen. Durch den Einsatz der Betriebsüberwachung ist eine automatische Eingrenzung der Fehlerquelle und eine gezielte Instandsetzung des Schaltgerätes möglich.

Die während des Schaltvorgangs aufgezeichneten Meßwerte müssen möglichst schnell ausgewertet werden, um kritische Veränderungen frühzeitig zu erkennen und Warn- und Schutzmechanismen zu aktivieren. Die Diagnose ist einfach, wenn es Kennwerte gibt, die im Fehlerfall unabhängig von den anderen Parametern deutlich abweichende Werte annehmen. Eine genauere Diagnose ist unter Einbeziehung verschiedener Kennwerte möglich, z.B. durch regelbasierte Systeme [Jeanjean 88], Klassifizierungsverfahren [Noack 88], Trendanalysen [Barkan 89], Fuzzy-Logic-Verfahren [Kaminaris 93] oder Korrelationsanalyse [Nel 93]. Es lassen sich beispielsweise Temperaturkorrekturen der Meßwerte realisieren. Durch eine Plausibilitätskontrolle ist eine Eigendiagnose des Meßsystems möglich.

## **2.2 Überwachung der Antriebsmechanik**

Häufigste Ursache von Schalterstörungen sind Fehler in der Antriebsmechanik (Tabelle 1.1). Meßgrößen, die eine Aussage über den Zustand der Antriebsmechanik erlauben sind:

- der Weg-Verlauf ausgewählter Bauteile (Antriebswelle, Schaltkontakte),
- der Motorstromverlauf beim Spannen der Antriebsfedern bei Federspeicherantrieben,
- die Federspannzeit bei Federspeicherantrieben,
- die Druckverläufe bei Schaltgeräten mit Druckluftantrieb,
- die Schaltereigenzeiten.

Für die Überwachung von Schraubenfedern und Schaltstangen in Schaltern auf Schäden im ruhenden Zustand wurde ein Diagnoseverfahren entwickelt [Lorenz 94, Baltzer 94]. Dabei wird ein elektrisches Überwachungssignal oder ein Ultraschallsignal am Anfang in das Bauteil eingespeist und über das Material zum Ende geleitet, um dort entweder ausgekoppelt oder reflektiert und am Anfang ausgekoppelt zu werden. Das empfangene Signal wird mit einem Referenzsignal verglichen, das dem im schadensfreien Zustand zu erwartenden Signal entspricht. Sind die Signale nicht gleich, wird ein Feder- oder Schaltstangenschaden angezeigt.

Für die Entwicklung und Erprobung eines Überwachungssystems für Schalterantriebe wurde im Rahmen dieser Arbeit ein vorhandener Vakuum-Leistungsschalter eingesetzt. Dieser Schalter hat starre Kontaktdruckstangen. Deshalb besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen Kontakthub der beweglichen Schaltkontakte und der Drehung der Schaltwelle. Solange die Schaltkontakte sich nicht in ihrer Endstellung befinden, ist der Kontakthub proportional zum Drehwinkel und kann eindeutig aus dem Drehwinkel bestimmt werden. Die Überwachung des Schalterantriebs erfolgt deshalb über die Messung der Drehbewegung der Antriebswelle. Aus dem aufgezeichneten Winkelverlauf kann durch Differentiation der Winkelgeschwindigkeitsverlauf bestimmt werden. Diese Verläufe, die durch Änderungen der Dämpfungseigenschaften, der Lagerreibung und der Federcharakteristik beeinflusst werden, bilden die Grundlage für die Antriebsdiagnose, die Rückschlüsse auf den Zustand der Antriebsmechanik ermöglicht.

## **2.3 Anforderungen an den Drehgeber**

Sensoren zur Betriebsüberwachung müssen sehr zuverlässig, langlebig und wartungsfrei sein. Sie sind extremen Umgebungseinflüssen ausgesetzt. Deshalb muß der Drehgeber unempfindlich gegenüber Luftverschmutzung, schwankenden Temperaturen, Feuchtigkeit, aggressiver Atmosphäre, Erschütterungen und elektromagnetischen Beeinflussungen sein. Eine hinreichende elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der weiterverarbeitenden Mikroelektronik kann durch räumliche Trennung und gute Abschirmung erreicht werden, so daß auch während des Schaltvorgangs zuverlässige Meßwerte geliefert werden. Eine Nachjustierung während des Betriebes ist nicht möglich.

Für die Betriebsüberwachung von Schalterantrieben kommen verschiedene Sensoren zur Drehwinkelmessung für industrielle Anwendungen in Frage:

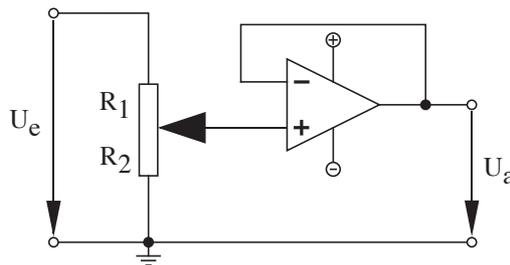
- potentiometrische Drehgeber,
- kapazitive Drehgeber,
- induktive Drehgeber,
- inkrementale und digitale Drehgeber.

### **2.3.1 Potentiometrische Drehgeber**

Potentiometrische Drehgeber sind an die speziellen Aufgaben der Winkelmessung angepaßte Drehpotentiometer. Die Widerstandsbahn besteht aus einer gewickelten Drahtwendel, einer Kohleschicht, einer Leitplastikschiicht oder einer Kombination aus Widerstandsdraht mit übergezogener Leitplastikschiicht. Bei gewickelten Drahtbahnen springt der Schleifer von einer Wendel auf die nächste, so daß sich die Widerstandswerte sprunghaft ändern. Mit dieser Technologie sind Auflösungen im Bereich von  $0,2^\circ$  möglich.

Bei Drehgebern mit Kohleschicht oder Leitplastikschiicht ergibt sich ein kontinuierlicher Widerstandsverlauf. Drehgeber mit Kohleschicht oder Leitplastik besitzen aber schlechtere Linearitätseigenschaften als Drahtwendel-Drehgeber. Um die Vorteile beider Technologien auszunutzen, wird die Drahtwendel mit einer Leitplastikschiicht überzogen. Die Positionen zwischen den Drahtwendeln kann so kontinuierlich abgetastet werden und die Linearität bleibt über den gesamten Bereich erhalten. Der Schleifer liegt direkt auf der Widerstandsbahn auf. Der Drehgeber ist daher empfindlich gegen Stöße und Vibrationen. Bei der Auswahl und der Montage des Drehgebers ist deshalb genau auf die mechanische Belastbarkeit zu achten: Kräfte auf die Achsen, Beschleunigen bei Vibration und Stößen, maximale Winkelgeschwindigkeit.

Bei der Auswertung sollte das Teilungsverhältnis  $t=R_1/R_2$  und nicht der variable Einzelwiderstand  $R_1$  bzw.  $R_2$  gemessen werden, da sich die Einzelwiderstände bei Temperaturschwankungen stark ändern können, das Teilungsverhältnis jedoch temperaturunabhängig ist. Hohe Schleiferströme verkürzen die Lebensdauer des Drehgebers und führen zu einer Verfälschung des Meßergebnisses (belasteter Stromteiler). Zur Messung sollte daher eine Spannungsfolgeschaltung mit einem Operationsverstärker benutzt werden (**Bild 2.1**). Die Meßschaltung ist so auszulegen, daß Temperaturschwankungen das Meßergebnis nicht verfälschen.



**Bild 2.1:** Meßschaltung für potentiometrische Drehgeber [Schanz 88]

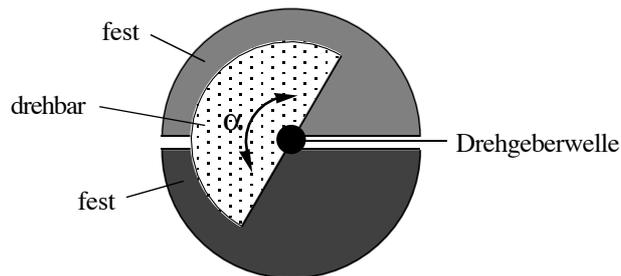
Die Auswertungs-elektronik stellt ein analoges Signal bereit, so daß der Winkel direkt auf einer analogen Anzeige angezeigt werden kann. Das Ausgangssignal ist proportional zum absoluten Winkel. Für die Weiterverarbeitung mit einem Computer ist eine zusätzliche Analog-Digital-Umsetzung erforderlich.

### 2.3.2 Kapazitive Drehgeber

Kapazitive Drehgeber arbeiten nach dem Prinzip des Drehkondensators. Durch Ändern der Fläche  $A$  wird die Kapazität  $C$  geändert. Gerade bei dieser Kondensatoranwendung ist es jedoch wichtig, daß nur möglichst kleine Randverzerrungen auftreten. Diese Forderung ist am besten mit sogenannten Differentialkondensatoren erfüllbar. Sie bestehen aus einer Rotor- und zwei getrennten Statorplatten. Die Gesamtkapazität zwischen Rotor und Gesamtstator bleibt immer gleich, es ändert sich nur das Verhältnis der beiden Teilkapazitäten (**Bild 2.2**).

Durch die Form der drei Kondensatorplatten kann die Ausgangsfunktion in Abhängigkeit vom Winkel geformt werden, so daß das Verhältnis der beiden Teilkapazitäten eine Funktion des Winkels  $\alpha$  ist. Die beiden Teilkapazitäten werden mit einer Wechselspannung von 0,1...1 MHz ausgemessen.

Kapazitive Drehgeber arbeiten berührungslos. Mechanische Belastungen der Drehgeberwelle werden nicht direkt auf das Meßsystem übertragen. Der Verschleiß ist deshalb gering. Die Meßunsicherheit und die Temperaturabhängigkeit sind sehr gering. Die Kondensatoranordnung ist jedoch empfindlich gegen Änderungen des Mediums, z.B. durch Feuchtigkeit oder Staub.



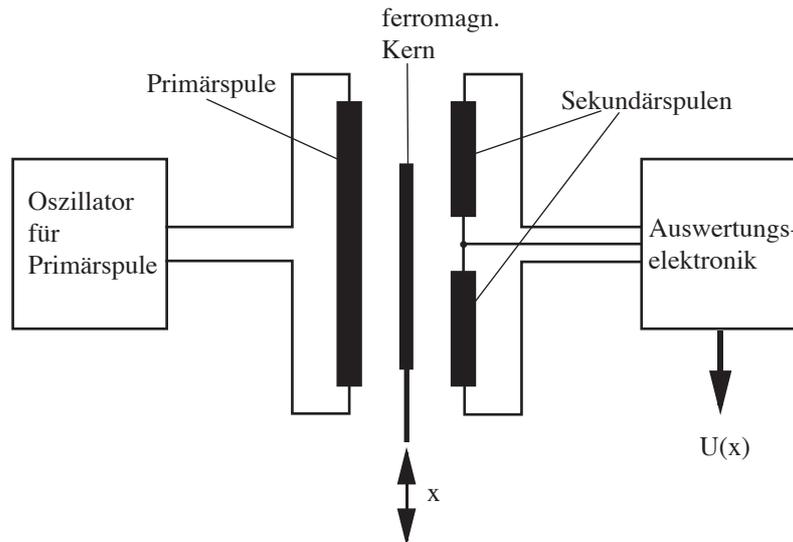
**Bild 2.2:** Prinzip des kapazitiven Drehgebers [Walcher 85]

### 2.3.3 Induktive Drehgeber

Bei den induktiven Drehgebern wird die Winkeländerung über eine Änderung der Meßinduktivität erfaßt. Diese Änderung erfolgt entweder über die Permeabilität, indem ein Eisenkern in der Spule in Abhängigkeit vom Weg bzw. Winkel verschoben wird, oder über die Windungszahl  $N$ , ähnlich wie bei den potentiometrischen Drehgebern mit einem Schleifkontakt. Bei beiden Verfahren wird der Winkel durch die Messung einer Einzelinduktivität ermittelt. Das Schleifkontaktverfahren ist nicht berührungslos.

Bei Anordnungen aus mehreren Spulen ändern sich die Gegeninduktivitäten entsprechend ihrer Lage zueinander. Diese Differentialmeßverfahren haben gegenüber der Messung einer Einzelinduktivität den Vorteil, daß sie unempfindlicher auf Temperatureinflüsse, magnetische Störfelder und Schwankungen der Meßspannung reagieren. Für induktive Längen- und Winkel-sensoren werden daher oft Differentialdrosseln und Differentialtransformatoren eingesetzt.

Das Prinzipschaltbild des Differentialtransformators ist in **Bild 2.3** dargestellt. Die Erläuterung erfolgt, der besseren Darstellbarkeit wegen, anhand eines Wegsensors. Differentialtransformatoren zur Winkelmessung funktionieren jedoch nach dem gleichen Prinzip.



**Bild 2.3:** Prinzipschaltbild eines Differentialtransformators [Walcher 85]

Der Differentialtransformator besteht aus drei feststehenden Spulen, einer Primärspule und zwei gegensinnig in Reihe geschalteten Sekundärspulen. In den Spulen befindet sich ein verschiebbarer Kern. Die Primärspule wird mit Wechselspannung gespeist. Durch den ferromagnetischen Kern wird die magnetische Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspulen verändert. Die Spannungen der beiden Sekundärspulen ändern sich gegenläufig in Abhängigkeit von der Stellung des Kernes. Die Spannungsdifferenz wird gemessen und ist das Maß für den Weg bzw. den Winkel.

Der bewegbare Kern kommt nicht mit den Meßspulen in Berührung. Dieses Verfahren ist berührungslos, so daß nur die Führung für den Kern mechanischem Verschleiß unterliegt. Für den Einsatz in staubiger Umgebung oder aggressiven Medien können die Meßspulen deshalb ohne Einfluß auf das Meßergebnis problemlos mit einer Kapselung versehen werden.

#### 2.3.4 Digitale Drehgeber

Die bisher vorgestellten Sensoren liefern ein analoges Ausgangssignal. Um diese Signale mit digitalen Rechenanlagen weiterverarbeiten zu können, ist eine Umsetzung der analogen Signale in digitale Signale erforderlich. Durch diese zusätzliche Einheit in der Verarbeitungskette erhöht sich die Ausfallwahrscheinlichkeit.

Digitale Drehgeber liefern dagegen digitale Ausgangssignale, die ohne zusätzliche Analog-Digital-Umsetzung direkt von Rechenanlagen verarbeitet werden können. Digitale Drehgeber kann man in zwei Gruppen einteilen:

- a) inkrementale Drehgeber,   b) absolute Drehgeber.

### a) Inkrementale Drehgeber

Inkrementale Drehgeber werden auch Winkelschrittgeber genannt, wobei für einen bestimmten zurückgelegten Winkel ein Impuls erzeugt wird. Diese Impulse werden mit einem Zähler summiert bzw. subtrahiert (inkrementiert). Der Zählerstand ist somit dem zurückgelegten Winkel proportional.

Zur Erzeugung der Impulse haben die inkrementalen Drehgeber eine mit der Drehgeberwelle verbundene Strichscheibe. Auf dieser Scheibe sind, gleichmäßig über den Umfang verteilt, Markierungen angebracht. Bewegen sich diese Markierungen an einer oder mehreren feststehenden Abtasteinheiten vorbei, werden Impulse erzeugt. Die Auflösung hängt von der Anzahl der Markierungen auf der Strichscheibe ab. Für Bewegungen mit einer Drehrichtung wird lediglich eine Abtasteinheit benötigt. Ändert sich die Drehbewegung jedoch, würden bei nur einer Abtasteinheit die Impulse unabhängig von der Drehrichtung immer weiter aufsummiert und der Winkel kann dann nicht mehr korrekt gemessen. Daher ist es erforderlich, die Drehrichtung, durch eine zweite, versetzt angebrachte Abtasteinheit zu erfassen. Durch den Vergleich des zeitlichen Ablaufes der Impulse an den beiden Abtasteinheiten erhält man die Drehrichtung. Je nach Drehrichtung werden die Impulse dann summiert oder subtrahiert.

Die Abtastung kann auf verschiedene Arten erfolgen.

Bei der direkten Abtastung sind im einfachsten Aufbau auf der Scheibe elektrisch leitende und nichtleitende Kontaktbahnen aufgebracht. Diese werden über Schleifer abgetastet. Eine andere Möglichkeit ist eine Nockenscheibe (Zahnradscheibe) als Maßstab zu verwenden. Sie wird mit Mikroschaltern abgetastet. Diese Ausführungen eignen sich daher für anspruchslöse Anwendungen mit kleiner Auflösung. Ein entscheidender Nachteil ist jedoch, daß sie nicht berührungslos arbeiten, so daß Stöße werden auf alle Bauteile übertragen und diese Systeme einem hohen Verschleiß unterliegen.

Bei den magnetischen Abtastverfahren ist die Strichscheibe (z.B. eine Zahnradscheibe) in magnetische und nichtmagnetische Zonen eingeteilt. Die Abtastung kann über Hallsensoren erfolgen. Für kleine Auflösungen (wenige Markierungen auf der Scheibe) ist diese Methode eine einfache und robuste Lösung. Sie ist wenig stöempfindlich, solange in der Meßumgebung keine magnetischen Störfelder auftreten. Die Abtastung erfolgt berührungslos, so daß Stöße auf die Drehgeberwelle nicht auf die Abtasteinheit übertragen werden. Schmutzablagerungen haben keinen wesentlichen Einfluß auf die Abtasteinheit, so daß eine Kapselung des Drehgebers nicht erforderlich ist [Flechtner 92].

Bei den optischen Abtastverfahren werden auf die Scheibe durchsichtige und undurchsichtige bzw. reflektierende und nicht reflektierende Zonen aufgebracht. Die Abtastung erfolgt im Durchlicht- oder Reflexionsverfahren. Durch Ätzen oder Aufdampfen auf eine Glas-, Kunststoff- oder Metallscheibe lassen sich sehr feine Strichstrukturen erzeugen. Mit dieser Technologie erzielt man deshalb sehr hohe Auflösungen.

Mit einem inkrementalen Drehgeber kann nur ein relativer Winkel gemessen werden. Um aus diesem relativen Winkel einen absoluten Winkel zu erhalten, muß der relative Winkel auf einen absoluten Referenzpunkt bezogen werden. Dafür besitzen die Drehgeber einen Referenzkanal, der einmal pro Umdrehung einen Impuls abgibt. Dieser Impuls kann dazu verwendet werden, den Zähler auf einen bestimmten Wert zu setzen. Nach Inbetriebnahme des Drehgebers entspricht der Zählerstand dem absoluten Winkel jedoch erst dann, wenn die Referenzmarke mindestens einmal durchlaufen wurde.

### **b) Absolute Drehgeber**

Bei absoluten Drehgebern ist jedem Winkelwert ein eindeutiger Binärcode zugeordnet. Der absolute Winkelwert steht also beim Einschalten sofort zur Verfügung. Für die Codierung sind auf der Codierscheibe mehrere Spuren aufgebracht. Die erzielbare Auflösung ist abhängig von der Anzahl der Codierspuren. Je nach der gewählten Codierungsart ist eine begrenzte Erkennung von Fehlern möglich (z.B. Gray-Code). Üblich sind Drehgeber mit 12 Bit (12 Spuren). Daraus ergibt sich eine Auflösung von  $360^\circ / 2^{12} = 360^\circ / 4096 = 0,088^\circ$ . Die Übertragung der Signale vom Drehgeber zur Auswertungs elektronik erfolgt seriell oder parallel. Bei serieller Übertragung sinkt die maximal zulässige Drehzahl mit zunehmender Auflösung (Spurzahl). Der Aufwand für die Übertragungsleitungen steigt bei der parallelen Übertragung mit zunehmender Bit-Zahl entsprechend.

## **2.4 Auswahl des Drehgebertyps**

Die wichtigsten Anforderungen an einen für die speziellen Anforderungen der Betriebsüberwachung von Hochspannungsschaltern geeigneter Drehgeber sind:

- möglichst universell in verschiedenen Schaltgeräten einsetzbar,
- robuster mechanischer Aufbau, unempfindlich gegen Stöße,
- Langzeitstabilität der Meßwerterfassung und der Übertragung,
- unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen.

Aufgrund der direkten Abtastung mit einem Schleifkontakt und dem damit verbundenen Verschleiß sind potentiometrische Drehgeber für die Betriebsüberwachung wenig geeignet.

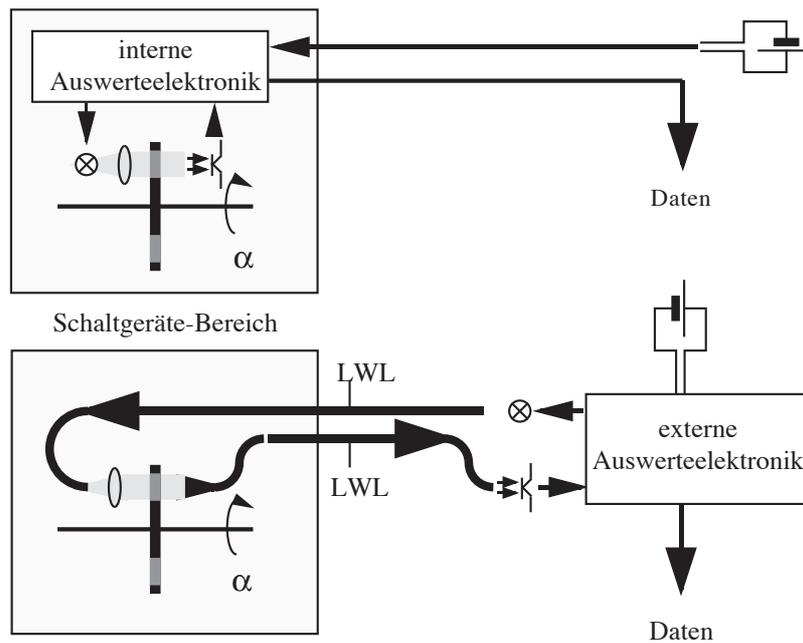
Ein sehr wichtiges Auswahlkriterium ist die Langzeitstabilität der Drehgeber und der Datenübertragung. Die Betriebsüberwachung ist nur dann sinnvoll, wenn das Überwachungssystem selbst wartungsfrei ist und nicht nachjustiert werden muß. Die Langzeitstabilität ist bei den aufgeführten analogen Drehgebern nicht gegeben. Temperaturänderungen, Umgebungsbedingungen und Langzeitänderungen der Bauteile haben einen Einfluß auf die Ausgangsfunktion  $f(\alpha)$ . Diese Einflüsse können mit vertretbarem Aufwand nicht korrigiert bzw. eliminiert werden. Die Ausgangskennlinie der digitalen Drehgeber ( sowohl inkremental als auch absolut) ist dagegen in hohem Maß unabhängig von diesen Einflüssen.

Bei analoger Übertragung können Veränderungen der Leitungsdämpfung das Meßergebnis verfälschen, während bei digitaler Übertragung die Dämpfung des Signals kaum Einfluß auf das Ergebnis hat. Eine digitale Datenübertragung ist deshalb von Vorteil.

Drehgeber mit analogen Meßprinzipien werden mittlerweile auch mit digitalen Datenausgängen angeboten (Digitaler kapazitiver Geber [Elsner 90], digitaler induktiver Geber [N.N. 93]. Hierzu ist im Drehgebergehäuse jedoch eine Umwandlung der analogen Signale in digitale Signale notwendig. Die Meßgenauigkeiten der analogen Verfahren werden damit nicht aufgehoben. Die Umwandlung der analogen Signale in digitale Signale direkt am Meßort bedeutet außerdem eine zusätzliche Fehlerquelle. Diese Verfahren sind daher nicht geeignet. Drehgeber mit einem digitalen Meßprinzip sind für die Betriebsüberwachung vorzuziehen.

Zur Auswertung des Winkelverlaufes der Schalterwelle ist es nicht nötig, sofort einen absoluten Winkel zu erhalten. Relative Winkel können nach der Messung auf einen Referenzpunkt bezogen werden. Dafür eignen sich inkrementale Drehgeber. Sie haben gegenüber absoluten Drehgebern den Vorteil, daß der Aufwand für die Datenübertragung unabhängig von der Auflösung des Drehgebers ist. Bei absoluten Drehgebern steigt mit höherer Auflösung der Aufwand für den Drehgeber und die Übertragung. Messungen mit inkrementalen Drehgeber erfordern unabhängig von der Auflösung immer nur drei Impulskanäle zur Ermittlung des Referenzpunktes, der Drehrichtung und des Winkels. Dies schlägt sich positiv bei den Kosten für den Drehgeber und die Datenübertragung nieder.

Drehgeber mit optischer Abtastung arbeitet berührungslos. Sie sind unempfindlich gegen Stöße und haben keinen mechanischen Verschleiß. Die Lichtquelle und die Fotoelemente werden außerhalb des Schaltgerätes plaziert. Am Meßort ist keine elektromagnetisch beeinflussbare Elektronik vorhanden. Die Ausleuchtung zur Abtastung erfolgt über Lichtwellenleiter. Diese Übertragung der Signale vom Drehgeber zur Weiterverarbeitung ist unempfindlich gegen elektromagnetische Beeinflussung. Durch die Lichtwellenleiterstrecke erfolgt eine wirkungsvolle Potentialtrennung zwischen der Meßvorrichtung und der weiterverarbeitenden Elektronik, so daß der Drehgeber problemlos auf Hochspannungspotential montiert werden kann. Eine Anpassung an verschiedene Schaltgerätetypen ist nicht mehr erforderlich (**Bild 2.4**)



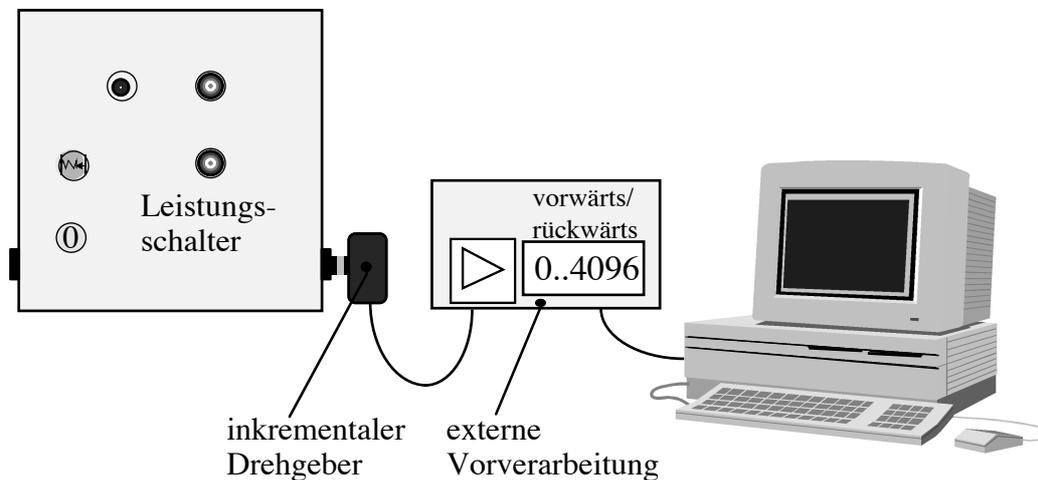
**Bild 2.4:** Vergleich elektrisch-optischer und faseroptischer Drehgeber

Faseroptische Drehgeber existieren bisher jedoch nur als Labormuster. Sie werden zur Überwachung von Schaltanlagen [Jones 89, Feld 93] und im Flugzeugbau erprobt. Durch den zunehmenden Einsatz nichtmetallischer Verbundwerkstoffe im Flugzeugbau entfällt die Abschirmung durch Metallkonstruktionen. Damit erhöht sich die Störempfindlichkeit elektronischer Geräte [Miller 87, Walter 90]. Deshalb ist zu erwarten, daß faseroptische Drehgeber wegen ihrer sehr guten EMV-Eigenschaften zukünftig als Serienprodukte verfügbar sein werden.

Derzeit war es jedoch noch nicht möglich, einen solchen inkrementalen faseroptischen Drehgeber zu erhalten. Da die einzelnen Drehgeberelemente sehr präzise hergestellt und positioniert werden müssen, ist die Eigenkonstruktion eines solchen faseroptischen Sensors mit vertretbarem Aufwand nicht zu verwirklichen. Für diese Arbeit wurde daher ein "konventioneller" inkrementaler optoelektronischer Drehgeber ausgesucht. Die weitere Auswertung der Drehgeberimpulse ist bei beiden Drehgeberarten jedoch gleich, so daß die Auswertemethoden später auch für einen faseroptischen Drehgeber verwendet werden können.

## 2.5 Meßsystem und Auswertung der Meßwerte

Das Meßsystem zur Ermittlung des Winkelverlaufes besteht aus dem am Leistungsschalter montierten Drehgeber, einer externen Vorverarbeitungseinheit und dem Rechner mit einer Ein/Ausgabe-Karte zur Meßwertverarbeitung (**Bild 2.5**)



**Bild 2.5:** Schema des Meßsystems zur Aufzeichnung des Drehwinkels

Zur Bewertung des Schalterzustandes werden aus den aufgezeichneten Winkeln und den berechneten Winkelgeschwindigkeiten Kennwerte bestimmt. Die Diagnose erfolgt durch den Vergleich mit vorher ermittelten Kennwerten für den Normalzustand und für Fehlerfälle. Die Diagnose über einen Vergleich von Kennwerten ist wesentlich einfacher und effektiver als ein Vergleich der aufgezeichneten Verläufe mit abgespeicherten Verläufen, da für letztere Methode komplizierte und rechenzeitintensive Verfahren der Mustererkennung nötig wären. Weiterhin wird für das Abspeichern der typischen Kennwerte wesentlich weniger Speicherplatz benötigt als für den vollständig aufgezeichneten Verlauf.

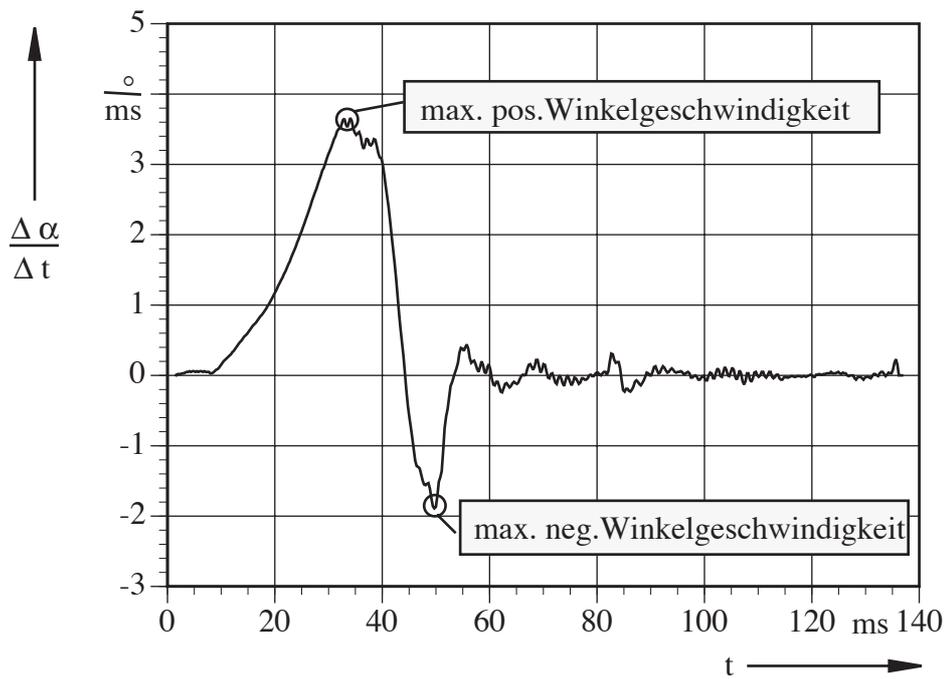
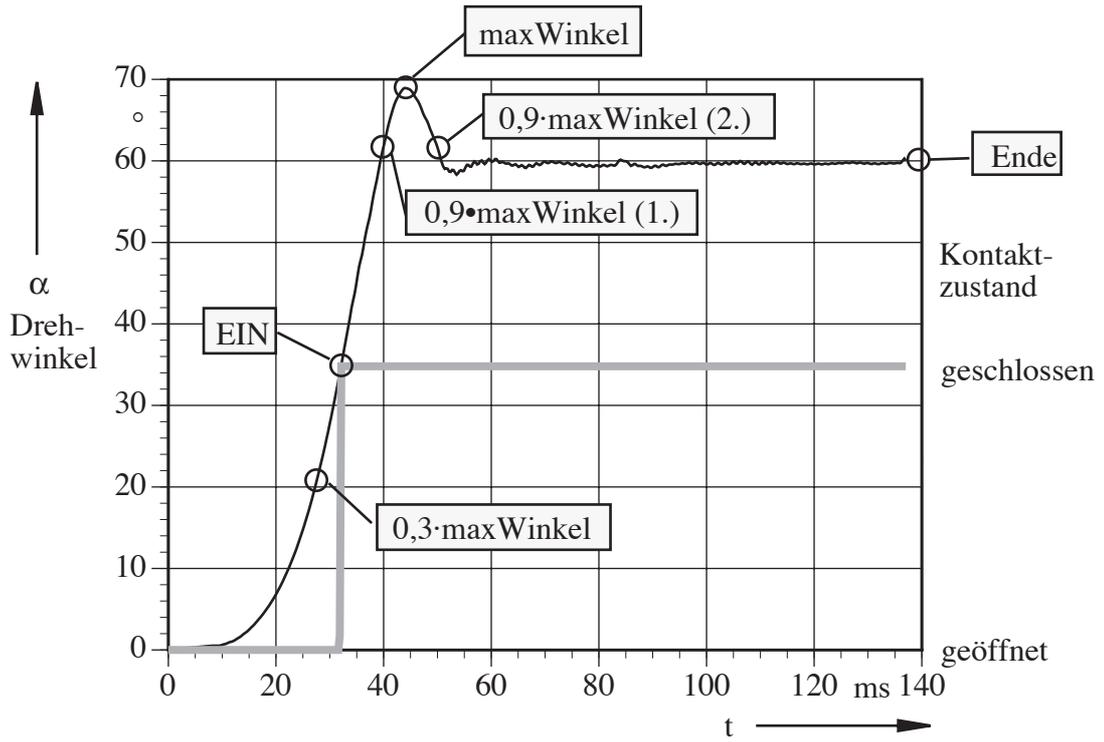
Die **Tabellen 2.1** und **2.2** geben einen Überblick über die Kennwerte. In den **Bildern 2.6** und **2.7** werden die Kennwerte anhand der grafischen Verläufe dargestellt.

erstmals Ein	Zeitpunkt, zu dem die beiden Kontakte der überwachten Schaltröhre zum ersten Mal geschlossen sind.
endgültig Ein	Zeitpunkt, ab dem die beiden Kontakte der überwachten Schaltröhre erstmals für eine vorgegebene Zahl von Abtastwerten dauernd geschlossen sind. Wenn beim Einschalten am überwachten Kontakt keine Prellvorgänge entstehen, ist dies der gleiche Zeitpunkt wie "erstmals Ein".
max. pos. Winkelgeschwindigkeit	größter positiver Wert der Winkelgeschwindigkeit
max. neg. Winkelgeschwindigkeit	größter negativer Wert der Winkelgeschwindigkeit
Ende	Winkelwert am Ende des aufgezeichneten Einschaltvorganges
maxWinkel	größter erreichter Winkel
0,3·maxWinkel	Zeitpunkt, zu dem der Winkel den 0,3-fachen Wert des Maximalwinkels hat
0,9·maxWinkel (1.)	Zeitpunkt, zu dem der Winkel zum ersten Mal den 0,9-fachen Wert des Maximalwinkels hat (vor Erreichen des maximalen Winkels)
0,9·maxWinkel (2.)	Zeitpunkt, zu dem der Winkel zum zweitenmal den 0,9-fachen Wert des Maximalwinkels hat (nach Erreichen des maximalen Winkels)

**Tabelle 2.1:** Kennwerte des Einschaltvorganges (jeweils Winkel, Winkelgeschwindigkeit und Zeitpunkt)

erstmals Aus	Zeitpunkt, zu dem die beiden Kontakte der überwachten Röhre zum ersten Mal getrennt sind.
endgültig Aus	Zeitpunkt, ab dem die beiden Kontakte der überwachten Schaltröhre erstmals für eine vorgegebene Zahl von Abtastwerten dauernd getrennt sind. Wenn beim Ausschalten am überwachten Kontakt keine Prellvorgänge entstehen, ist dies der gleiche Zeitpunkt wie "erstmals Aus".
max. pos. Winkelgeschwindigkeit	größter positiver Wert der Winkelgeschwindigkeit
max. neg. Winkelgeschwindigkeit	größter negativer Wert der Winkelgeschwindigkeit
Anfang	Winkelwert am Anfang des aufgezeichneten Ausschaltvorganges
erstes Winkelminimum	Zeitpunkt, zu dem das erste lokale Minimum im Winkelverlauf erreicht wird
Überschwinger	Zeitpunkt, zu dem das erste lokale Maximum nach dem ersten Winkelminimum erreicht wird
0,9·maxWinkel	Zeitpunkt, zu dem der Winkel den 0,9-fachen Wert des Maximalwinkels hat
0,3·maxWinkel	Zeitpunkt, zu dem der Winkel zum ersten Mal den 0,3-fachen Wert des Maximalwinkels hat (vor Erreichen des maximalen Winkels)

**Tabelle 2.2:** Kennwerte des Ausschaltvorganges (jeweils Winkel, Winkelgeschwindigkeit und Zeitpunkt)



**Bild 2.6:** Kennwerte des Einschaltvorgangs

**Bild 2.6** zeigt den Verlauf des Winkels, des galvanischen Kontaktzustandes und der Winkelgeschwindigkeit bei einem Einschaltvorgang. In der ersten Phase wird die Welle von der Auslösung bis ungefähr zur Kontaktberührung beschleunigt, wobei die Winkelgeschwindigkeit bis zu diesem Zeitpunkt ansteigt. In der darauffolgenden Phase wird die Rotationsenergie der Welle auf die Kontaktdruckfedern übertragen, so daß die Antriebswelle abgebremst wird und die Winkelgeschwindigkeit sinkt. Die Antriebswelle dreht sich, über den Endwinkel hinaus, bis zum Maximalwinkel weiter (Winkelgeschwindigkeit = 0) und schwingt dann bis zur endgültigen Einrastung zurück. Für den Einschaltvorgang läßt sich folgende vereinfachte Energiebilanz aufstellen :

$$E_{\text{Ein}} = \frac{1}{2} c_E x_E^2 = \frac{1}{2} c_K x_K^2 + \frac{1}{2} c_A x_E^2 + \frac{1}{2} m v^2 + E_R \quad (2.1)$$

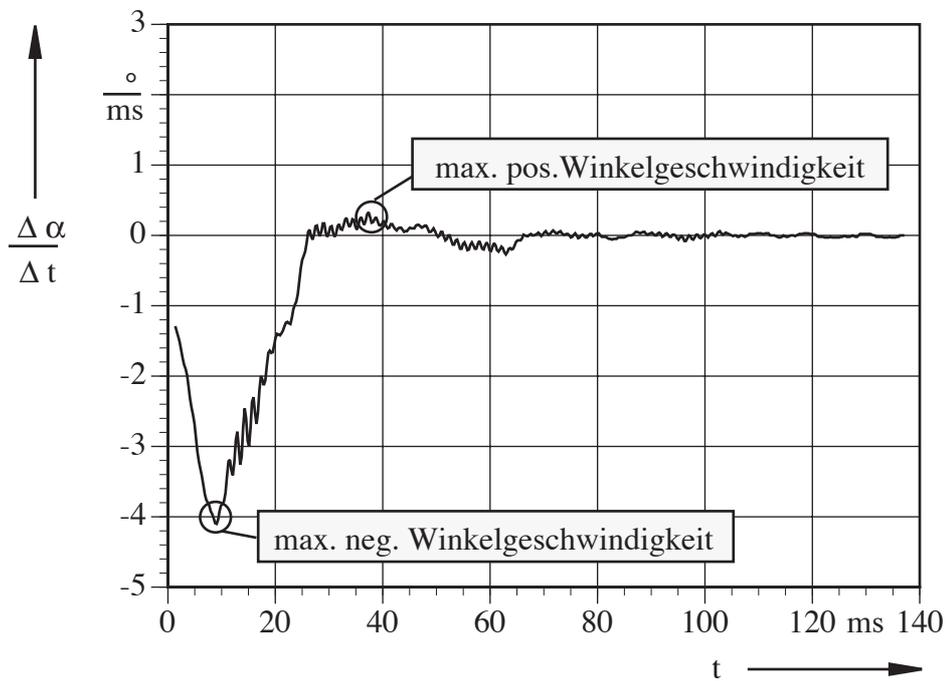
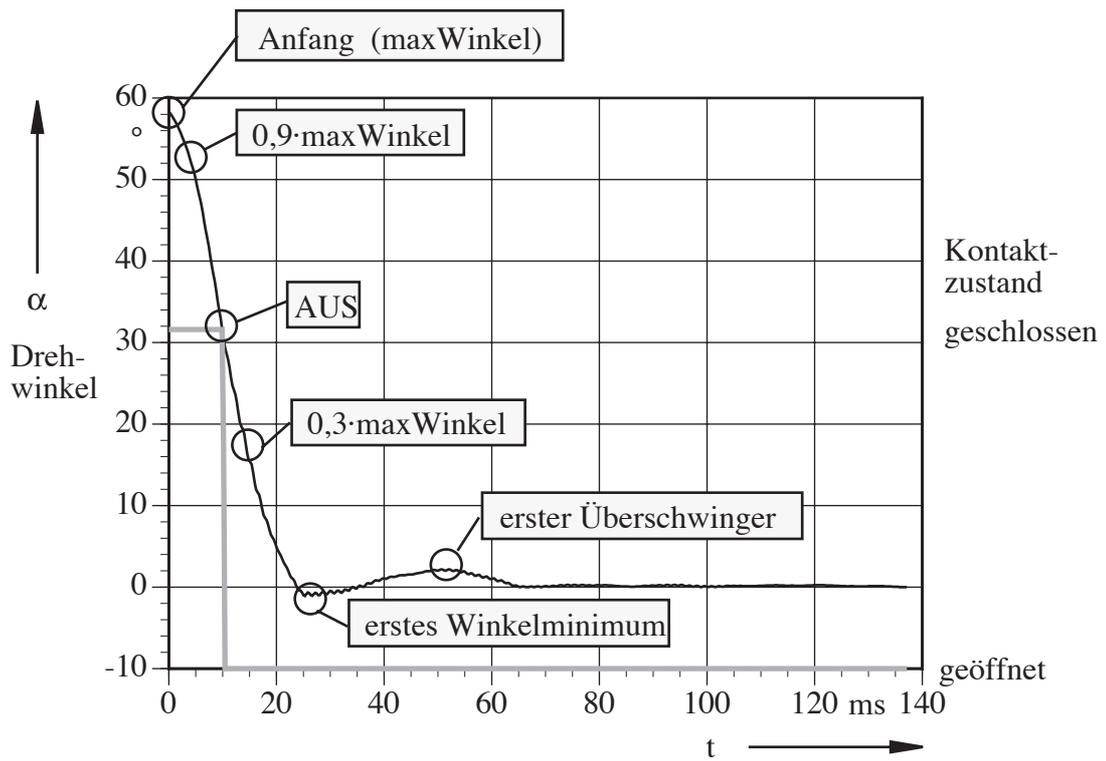
- mit  $E_{\text{Ein}}$  gesamte Energie des Einschaltvorganges  
 $c_E$  Federkonstante der Einschaltfeder  
 $c_K$  resultierende Federkonstante der Kontaktdruckfedern  
 $c_A$  Federkonstante der Ausschaltfeder  
 $m$  bewegte Masse  
 $v$  Geschwindigkeit  
 $E_R$  restliche Energie für Reibung und Dämpfung

Hieraus ist ersichtlich, daß sich bei Veränderungen an den Federn, der Reibung und der Dämpfung auch eine Veränderung der Geschwindigkeit ergibt. Die Geschwindigkeitskennwerte sind daher wichtige Größen bei der Beurteilung des Schalterzustandes.

Im **Bild 2.7** sind die entsprechenden Verläufe für einen Ausschaltvorgang dargestellt. Beim Ausschalten wird die Antriebswelle durch die gespannte Ausschaltfeder beschleunigt. Bis zur Kontaktöffnung entspannen sich weiterhin die Kontaktdruckfedern, so daß die Antriebswelle bis zum Zeitpunkt der Kontaktöffnung beschleunigt wird und der Betrag der Winkelgeschwindigkeit steigt. Danach werden die Kontakte gegen das Vakuum in den Schaltröhren auseinandergezogen, wobei die Antriebswelle abgebremst wird und der Betrag der Winkelgeschwindigkeit sinkt. Am Schluß des Ausschaltvorganges wird die Antriebswelle durch den Ausschalt-dämpfer abgebremst, so daß sie in die Aus-Stellung einschwingt. Entsprechend sieht die vereinfachte Energiebilanz für den Ausschaltvorgang folgendermaßen aus :

$$E_{\text{Aus}} = \frac{1}{2} c_A x_A^2 + \frac{1}{2} c_K x_K^2 = \frac{1}{2} m v^2 + E_R \quad (2.2)$$

- mit  $E_{\text{Aus}}$  Gesamtenergie des Ausschaltvorganges  
 $c_A$  Federkonstante der Ausschaltfeder  
 $c_K$  resultierende Federkonstante der Kontaktdruckfedern  
 $m$  bezogene bewegte Masse  
 $v$  Geschwindigkeit  
 $E_R$  restliche Energie für Reibung und Dämpfung



**Bild 2.7:** Kennwerte des Ausschaltvorgangs

## 2.6 Bewertung von Fehlereinflüssen

Die Messungen dienten der Erprobung des Sensors und zur Demonstration der Möglichkeiten des entwickelten Auswerteprogrammes. Um vor allem bei den hier simulierten extremen Fehlerfällen die Belastung der Schaltermechanik auf ein Mindestmaß zu reduzieren, wurden für jede Meßreihe nur wenige (5-10) Schalthandlungen durchgeführt und aufgezeichnet. Anhand dieser Messungen können daher nur grobe Zusammenhänge und Trends aufgezeigt werden. Für gesicherte statistische Daten ist eine größere Anzahl von Messungen erforderlich.

Es wurden Messungen mit folgenden Konfigurationen durchgeführt (entsprechend **Bild 2.8**):  
Messungen mit eingebauter mittlerer Kontaktstange

- a) Dämpfer ohne Flüssigkeit
- b) Dämpfer mit 2/3 Flüssigkeit
- c) Dämpfer im Originalzustand
- d) neuer Dämpfer

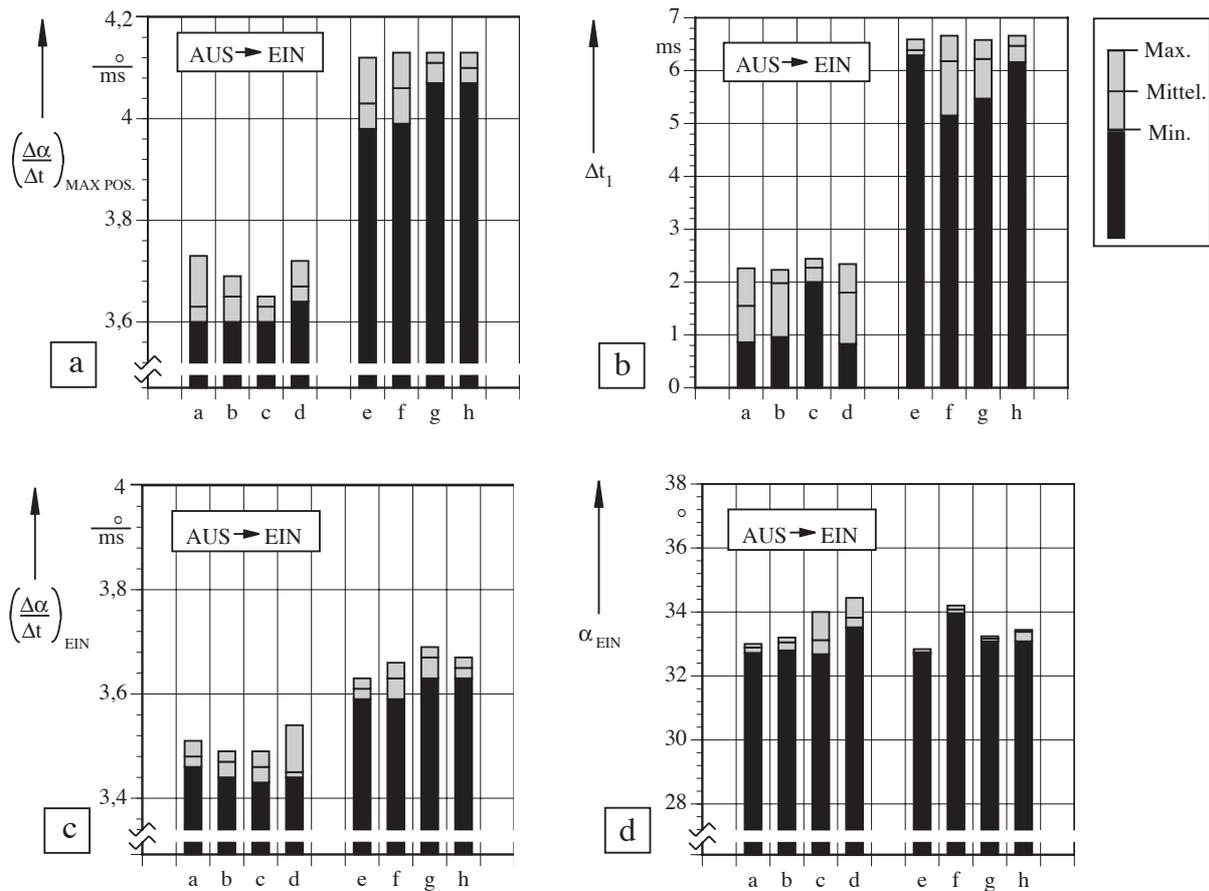
Messungen mit ausgebauter mittlerer Kontaktstange

- e) Dämpfer ohne Flüssigkeit
- f) Dämpfer mit 2/3 Flüssigkeit
- g) Dämpfer im Originalzustand
- h) neuer Dämpfer

### 2.6.1 Auswirkungen des Ausbaus einer Kontaktstange

Durch den Ausbau der mittleren Kontaktstange wird der Einfluß des Bruchs dieses Bauteils auf die Kennwerte des Einschalt- und des Ausschaltvorgangs untersucht. Bild 2.8 zeigt die von dem Auswerteprogramm errechneten Werte für die maximale positive Winkelgeschwindigkeit sowie für die Zeit zwischen der Kontaktberührung und dem Zeitpunkt der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit beim Einschaltvorgang in Abhängigkeit von der jeweiligen Veränderung an der Schaltermechanik.

In den Diagrammen (Bild 2.8) sind die Ergebnisse aller acht Meßreihen a) bis h) dargestellt, um erkennen zu können, welche Veränderungen einen Einfluß auf den jeweiligen Kennwert haben. Für jede Meßreihe werden das Minimum, das Maximum und der arithmetische Mittelwert bestimmt und grafisch dargestellt. Anhand des Bildes 2.8 a) wird deutlich, daß kein Einfluß des Zustandes des Ausschaltstoßdämpfers erkennbar ist. Die maximale positive Winkelgeschwindigkeit bei einem Einschaltvorgang erhöht sich jedoch deutlich bei ausgebauter Kontaktstange.



**Bild 2.8:** Berechnete Kennwerte des Einschaltvorgangs in Abhängigkeit von Veränderungen an der Schaltermechanik

- a** maximale positive Winkelgeschwindigkeit
- b** Zeit zwischen der Kontaktberührung und der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit
- c** Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Kontaktberührung
- d** Einschaltwinkel

Die Kennwerte in Bild 2.8 b lassen eine Vergrößerung der Zeit zwischen der Kontaktberührung und dem Zeitpunkt der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit bei ausgebaute Kontakt-druckstange erkennen. Veränderungen am Ausschalt-dämpfer haben auch auf diesen Kennwert keinen erkennbaren Einfluß. Diese Werte streuen hier zwar mehr als die Werte für die maximale positive Winkelgeschwindigkeit, aber es ist auch hier deutlich zu erkennen, welche Meßreihen mit ausgebaute Kontakt-druckstange ermittelt wurden.

Bild 2.8 c zeigt, daß sich die Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Kontaktberührung durch den Ausbau der mittleren Kontakt-druckstange ebenfalls erhöht. Die Erhöhung ist jedoch nicht so stark wie bei der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit, so daß die Auswertung der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit für die Erkennung dieses Fehlerfalles besser geeignet ist. Der Ausbau der Kontakt-druckstange hat keinen Einfluß auf den Einschaltwinkel (Bild 2.8 d).

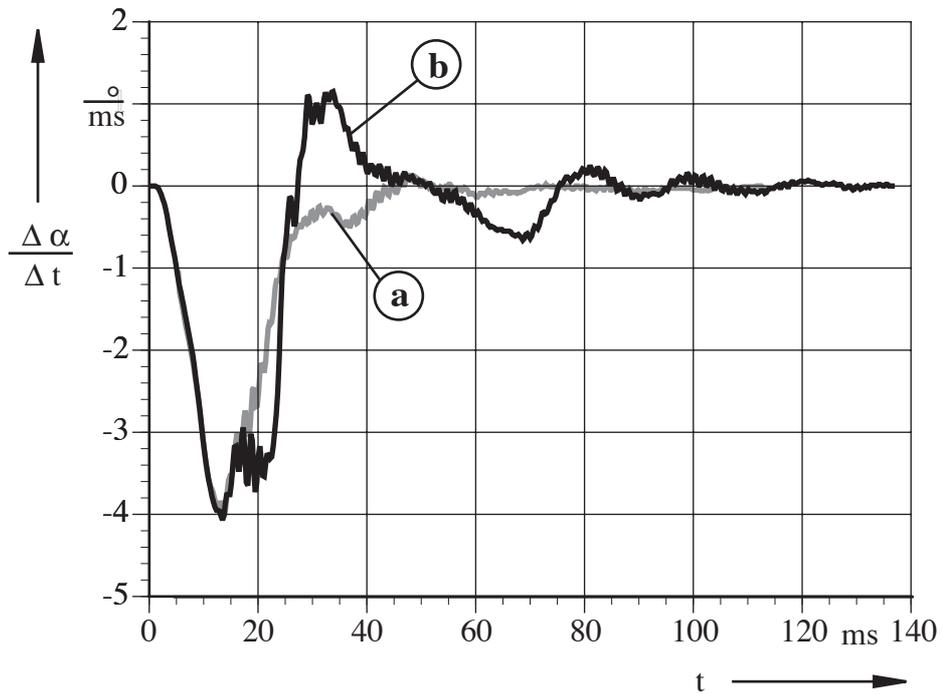
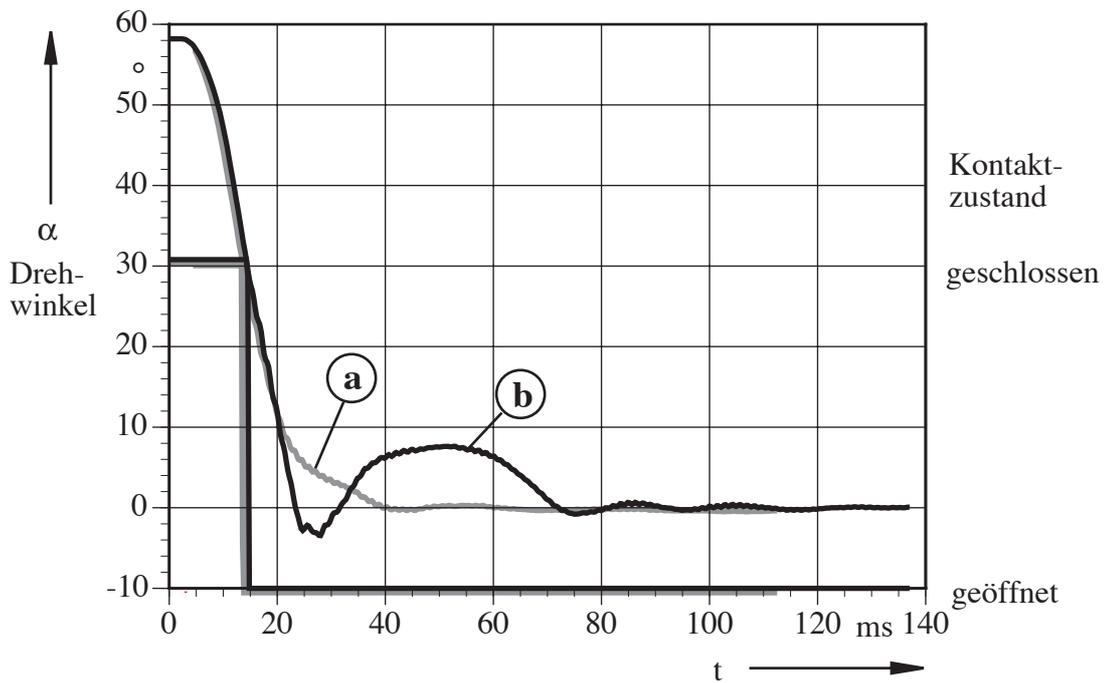
Folgende Kennwerte sind daher zur Erkennung der ausgebauten Kontaktdruckstange geeignet:

- die maximale positive Winkelgeschwindigkeit,
- im Bereich der positiven Winkel die Zeitspanne zwischen der Kontaktberührung und der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit,
- die Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Kontaktberührung, allerdings nur in beschränktem Maße.

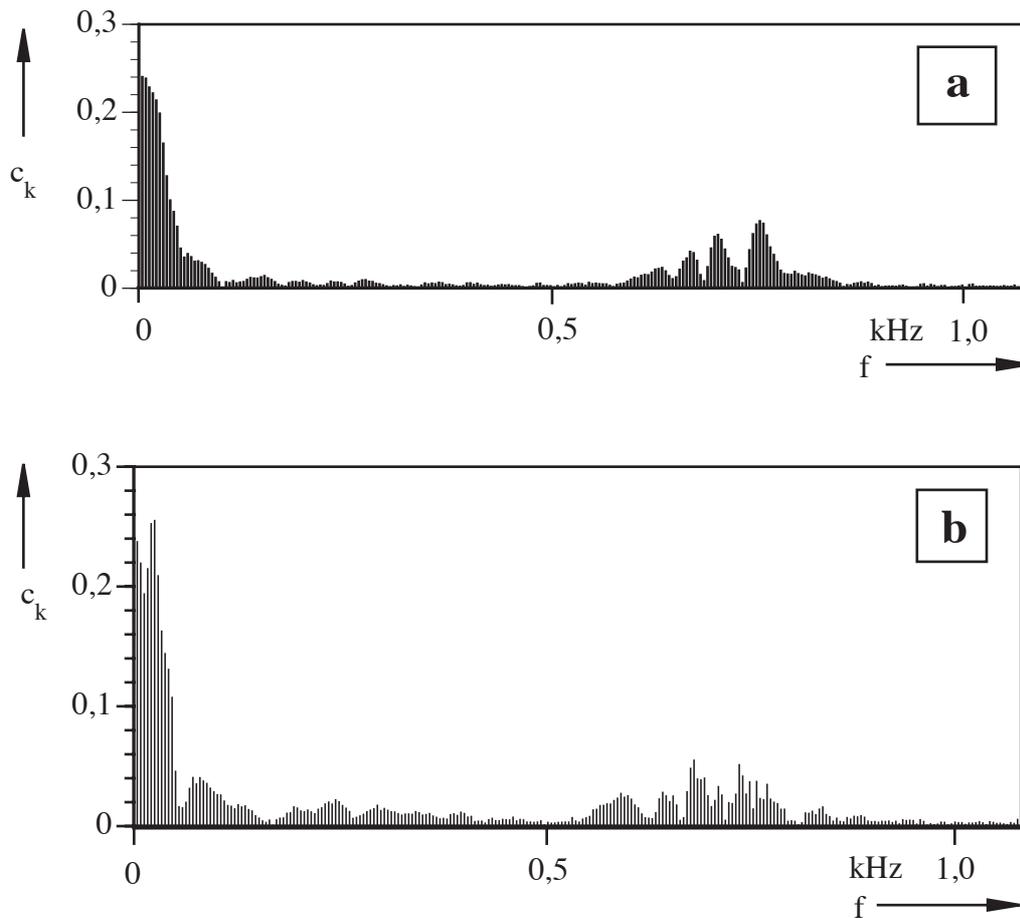
Die Einschaltfeder ist für das Einschalten von drei Schaltkontakten und das Spannen von drei Kontaktdruckfedern dimensioniert. Durch den Ausbau einer Kontaktdruckstange verringert sich die zu bewegende Gesamtmasse, so daß sich bei unveränderter Einschaltfeder die Einschaltgeschwindigkeit erhöht. Die Antriebswelle wird beim Einschaltvorgang abgebremst, wenn die Bewegungsenergie in die potentielle Energie der Kontaktdruckfedern übertragen wird. Da statt drei Kontaktdruckfedern jetzt nur noch zwei Kontaktdruckfedern gespannt werden müssen, verschieben sich Zeitpunkt und Betrag der maximalen Winkelgeschwindigkeit.

### **2.6.2 Auswirkungen der Ausschaldämpfer-Veränderungen**

Im Schalterbetrieb ist es möglich, daß der Dämpfer leckschlägt, Dämpferöl austritt und der Dämpfer damit seine Charakteristik verändert. In **Bild 2.9** sind die Verläufe des Winkels, des galvanischen Zustandes der überwachten Schaltröhre sowie der Winkelgeschwindigkeit bei einem Ausschaltvorgang mit einem flüssigkeitslosen Dämpfer dargestellt. Hier ist eine deutliche Veränderung des Winkelverlaufes zu erkennen. Im Gegensatz zu einem Ausschaltvorgang mit einem normalen Dämpfer ist die Amplitude der Schwingung, mit der die Antriebswelle in die Endstellung einschwingt, wesentlich höher. Damit verbunden ist eine Vergrößerung der maximalen positiven Winkelgeschwindigkeit im Bereich des Einschwingens in die Endstellung. Durch den flüssigkeitslosen Dämpfer entstehen höhere Werte für die Schwingungsamplitude und für die maximale positive Winkelgeschwindigkeit. Durch diese Kennwerte läßt sich ein flüssigkeitsloser Dämpfer sicher diagnostizieren.



**Bild 2.9:** Ausschaltvorgang  
a mit Originaldämpfer  
b mit flüssigkeitslosem Dämpfer



**Bild 2.10:** Fourier-Spektrum der Winkelgeschwindigkeit beim Ausschaltvorgang  
a mit Originaldämpfer  
b mit flüssigkeitslosem Dämpfer

Wie **Bild 2.10** zeigt, bewirkt der flüssigkeitslose Dämpfer ebenfalls eine Veränderung im diskreten Fourier-Spektrum der Winkelgeschwindigkeit. Im Bereich zwischen 20 und 30 Hz treten im Vergleich zum Spektrum für einen Ausschaltvorgang mit einem Originaldämpfer deutlich zusätzliche Spektrallinien auf. Der Verlauf der Winkelgeschwindigkeit (Bild 2.9) läßt sich im Bereich zwischen  $t=25$  ms und  $t=75$  ms durch eine Grundschwingung mit der Periodendauer  $T=50$  ms annähern. In diesem Bereich ergeben sich durch den flüssigkeitslosen Dämpfer auch höhere Spektralanteile. Die Veränderung im diskreten Fourierspektrum korrespondiert also mit der Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit. Bei entsprechender automatischer Auswertung des Spektrums kann die Veränderung im diskreten Fourierspektrum zur Beurteilung des Dämpferzustandes herangezogen werden.

Nach dem Vergleich der verschiedenen Kennwerte beim Ausschaltvorgang sind folgende Kennwerte zur Beurteilung des Dämpferzustandes geeignet:

- die maximale positive Winkelgeschwindigkeit,
- die Schwingungsamplitude,
- die Zeitspanne zwischen dem Erreichen des 90%-Wertes des Winkels und dem ersten Winkelminimum,
- das Spektrum der Winkelgeschwindigkeit.

## **2.7 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Diagnose des Schalterantriebs**

Es wurde ein Verfahren zur Erfassung und Auswertung der Antriebscharakteristik von Mittelspannungsleistungsschaltern entwickelt und anhand einiger Meßreihen erprobt. Dabei war das Ziel, die entwickelten Meß- und Auswerteverfahren in einem System zur automatischen Betriebsüberwachung einsetzen zu können. Durch entsprechende Anpassungen ist auch ein Einsatz zu Diagnosezwecken bei der Entwicklung von Schaltgeräten oder als Hilfsmittel bei Revisionsarbeiten möglich.

Die Messungen wurden an einem Vakuum-Leistungsschalter durchgeführt. Das Meßsystem ist jedoch so konzipiert, daß es nach entsprechender Anpassung auch für andere Leistungsschalter verwendet werden kann. Die Bewertung der Antriebscharakteristik erfolgt anhand des aufgezeichneten Winkelverlaufes der Antriebswelle. Hierfür wird ein inkrementaler Drehgeber eingesetzt, der nach einem Vergleich der verschiedenen Verfahren zur rechnergestützten Winkelmessung die hohen Anforderungen an Sensoren für die Betriebsüberwachung am besten erfüllt.

Die Meßsignale (Zählimpulse) des Drehgebers werden in einer externen Vorverarbeitungseinheit ausgewertet und gezählt und vom Computer periodisch abgefragt, so daß dieser nicht durch die Signalauswertung blockiert ist. Die Meßwertaufzeichnung kann somit gut in Systeme mit mehreren zu überwachenden Parametern eingepaßt werden.

Das entwickelte Auswerteprogramm stellt die Verläufe des aufgezeichneten Winkels und der daraus berechneten Winkelgeschwindigkeit grafisch dar und ermittelt aus diesen Verläufen signifikante Kennwerte. Zur Erprobung des Meßsystems und zur Demonstration der Möglichkeiten des Auswerteprogrammes wurden verschiedene Ein- und Ausschaltvorgänge aufgezeichnet und ausgewertet.

Durch den Ausbau einer Kontaktdruckstange sowie durch Veränderungen am Ausschaltstoßdämpfer wurden dabei Fehler simuliert. Die Änderungen an der Schaltermechanik verursachten typische Verläufe und Kennwerte, die zu einer späteren automatischen Beurteilung der Schaltermechanik herangezogen werden.

Durch den Ausbau der mittleren Kontaktdruckstange ergaben sich folgende Veränderungen:

- Die maximale Winkelgeschwindigkeit beim Einschaltvorgang erhöht sich deutlich.
- Die Einschaltgeschwindigkeit erhöht sich ebenfalls. Diese Erhöhung fällt weniger deutlich aus wie die der maximalen Winkelgeschwindigkeit. Die maximale Winkelgeschwindigkeit ist für diesen Fehlerfall zur Diagnose besser geeignet.
- Bei normalen Einschaltvorgängen wird die maximale Winkelgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Schließen der Schaltkontakte erreicht. Bei Einschaltvorgängen mit ausgebauter mittlerer Kontaktdruckstange ist eine Verlängerung der Zeit zwischen Kontaktschließen und maximaler Winkelgeschwindigkeit zu erkennen.
- Die hier definierten Kennwerte liegen unabhängig von den Veränderungen am Ausschaltstoßdämpfer in klar abgrenzbaren Bereichen. Mit diesen Kennwerten ist die Diagnose einer ausgebauten Kontaktdruckstange möglich.

Durch Änderungen am Ausschaltstoßdämpfer ergaben sich folgende Einflüsse:

- Der Originaldämpfer und der neue Austauschdämpfer weisen ein unterschiedliches Verhalten in den Verläufen des Winkels und der Winkelgeschwindigkeit auf. Die Unterschiede führen zu Differenzen bei dem Kennwert für die Zeit zwischen dem 90%-Winkelwert und dem ersten Winkelminimum.
- Die Veränderungen an der Flüssigkeitsmenge im Ausschaltstoßdämpfer können beim Ausschaltvorgang am besten anhand der Amplitude der Schwingung in die Endstellung und der maximalen Winkelgeschwindigkeit in diesem Bereich erfaßt werden.
- Bei flüssigkeitslosen Dämpfern erhöhen sich die Werte für die Schwingungsamplitude und die maximale Winkelgeschwindigkeit im Bereich der Schwingung erheblich, so daß bei Dauerbetrieb Schäden auftreten werden.
- Eine Abhängigkeit der Kennwerte für Veränderungen am Dämpfer von der ausgebauten Kontaktdruckstange ist nicht zu erkennen. Der Zustand des Ausschaltstoßdämpfers kann unabhängig von diesem Fehlerfall diagnostiziert werden.

### **3 Überwachung der Isoliergasfeuchte in Schaltanlagen**

Das Langzeitverhalten der Isolierung von Mittelspannungs-Schaltanlagen wird auch durch das Verhalten der Isolierstoffoberflächen bestimmt. Nicht hermetisch gekapselte Anlagen sind besonders durch Verschmutzung und Betauung der Isolierstoffoberflächen gefährdet, die das Isoliervermögen verringern und die Alterung durch Teilentladungen beschleunigen können. Das Reinigen von offenen und geschotteten Schaltanlagen ist deshalb zur vorbeugenden Wartung besonders wichtig [Kathrein 97]. Die Kosten für eine Reinigung lassen sich durch Absaugen der Verschmutzungen auf 20 - 25 % derjenigen Kosten reduzieren, die beim Reinigen einer freigeschalteten und zum Arbeiten freigegebenen Anlage entstehen. Für die bedarfsgerechte Planung der Reinigung einer Schaltanlage ist ein Diagnosesystem, das den Zustand der Grenzschichten von Epoxidharzteilen erfasst, von großem Nutzen.

#### **3.1 Adsorbtionseigenschaften der Isolatorgrenzschicht**

Die Feuchte im Isoliergas einer gasolierten Schaltanlage wird durch Wechselwirkungsenergien an die Elektroden und die Isolierstoffoberflächen angelagert. Bei diesen Energien handelt es sich im Fall der Moleküladsorbtion um Van-der Waals-Energie und im Fall der Ionenadsorbtion um Coulomb-Energie und Ionosorbtionsenergie [Giesenbauer 76]. An den Isolierstoffoberflächen kommt es aufgrund der Oberflächenstruktur und der Kristallbildung im Feststoff zu einer heterogenen Verteilung der Bindungskräfte. Dies führt, ausgehend von einzelnen Adsorbtionskeimen, zur Bildung von Feuchtigkeitsinseln. Dabei ist die Höhe der Bindungskräfte stark von der Zusammensetzung des Epoxidharzformstoffes abhängig.

Die Bindung der Gasteilchen an eine Festkörperoberfläche wird durch einen Gleichgewichtszustand zwischen auftretenden anziehenden- und abstoßenden Kräften bewirkt. Als anziehende Kräfte wirken:

- Elektrostatische Kräfte, wenn die Adsorbteilchen (Teilchen, die an der Oberfläche eines Festkörpers gebunden sind) in Form von Ionen vorliegen oder ein permanentes Dipolmoment besitzen oder wenn sie durch ein elektrisches Feld polarisiert wurden.
- Valenzkräfte, die beim gegenseitigen Durchdringen der Elektronenhüllen zustande kommen. Beide Teilchen besitzen dann gemeinsame Elektronen.
- Dispersionskräfte, die zwischen elektrisch neutralen Teilchen wirken (Van der Waals Kräfte).

Als Abstoßungskräfte wirken bei sehr starker Annäherung der Teilchen und Durchdringung der Elektronenhüllen:

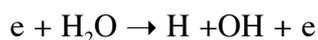
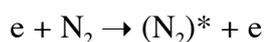
- Abstoßung nach dem Pauli-Prinzip für Elektronen beider Atome, die entgegengesetzten Spin haben.
- Kräfte, die nach dem Mechanismus der Coulomb-Abstoßung gleichnamiger Ladungen wirken.

Bis zu einer relativen Feuchte  $w_{\text{rel}} \leq 30 \%$  werden bei Normaldruck und Raumtemperatur nur Mono-Molekularlagen adsorbiert [Frazer 29]. Eine Steigerung der relativen Feuchte führt zur Anlagerung von mehreren Wasser-Molekularlagen. Bis zu einer Schichtdicke von vier Molekularlagen bleibt die elektrische Leitfähigkeit gering, da sie durch Wechselwirkungsenergien örtlich gebunden bleiben. Ab einer vom Isolierstoff abhängigen kritischen relativen Feuchte kommt es zu einem Übergang in die flüssige Phase, einem sprunghaften Anstieg der Ionenbeweglichkeit und damit zu einer deutlich höheren Leitfähigkeit der Isolatoroberfläche [Kawasaki 61, Edelmann 69]. Mit abnehmendem Feuchtegehalt desorbieren die angelagerten Molekularlagen wieder. Der Prozeß ist also reversibel.

Die Leitfähigkeitsminderung auf der Isolatoroberfläche tritt zunächst nur lokal auf, dehnt sich aber mit zunehmender Gasfeuchte immer weiter aus, wodurch die Feldverteilung in großen Bereichen gestört wird. Dadurch wird eine Verringerung der Überschlagspannung mit zunehmender Gasfeuchte bewirkt. Die Überschlagspannung wird demnach bei einer hohen relativen Gasfeuchte durch unterschiedliche Leitfähigkeiten an der Oberfläche herabgesetzt.

### 3.2 Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen in luftisolierten Schaltanlagen

Das Grenzschicht- und Alterungsverhalten von Epoxidharzteilen in luftisolierten Schaltanlagen wurde im Rahmen vieler Forschungsarbeiten untersucht [Giesenbauer 76, Völker 81, Müller 85, Quint 93]. Teilentladungen führen über eine Ionisierung der Luft zur Bildung von Ozon ( $\text{O}_3$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) [Peier 88]. Die Konzentrationen von Ozon und Stickstoffdioxid steigen mit zunehmender Teilentladungsenergie. Während die  $\text{NO}_2$ -Konzentration kaum von der relativen Feuchte der Luft abhängt, sinkt die Ozonkonzentration mit zunehmender relativer Luftfeuchte deutlich ab. Für die produzierte  $\text{HNO}_3$ -Menge ließ sich kein Zusammenhang mit der Teilentladungsenergie finden. Folgende Elektronenprozesse sind möglich:



(...)\* instabiler angeregter Zwischenzustand

Als Folgereaktionen können sich daran anschließen:



M = metallischer Katalysator

Eine hohe relative Luftfeuchte begünstigt die Bildung von Salpetersäure, dadurch sinkt die Ozonkonzentration:



Salpetersäure wird im Wasser, das an die Oberflächen der Epoxidharzisoliereteile angelagert ist, vollständig dissoziiert und bildet eine elektrolytische Schicht. Als Folge sinkt die Überschlagnspannung der Isolieranordnung.

### **3.3 Grenzschichtverhalten von Epoxidharzteilen in gekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten Schaltanlagen**

Die Isolierteile gekapselter gasisolierter Schaltanlagen sind vor direkter Beeinflussung durch die Umgebungsatmosphäre geschützt. Trotz des ständigen Überdruckes des Isoliergases im Behälter herrscht ein Unterdruck für den Wasserdampf in der Atmosphäre. Die Feuchte des Isoliergases kann im Laufe des Betriebes ansteigen. Dieser Vorgang wird von folgenden Parametern bestimmt [Algermissen 88]:

- Im Behälter eingebaute Feuchte:

Es können an den Metall- und Gießharzoberflächen größere Mengen Feuchtigkeit angelagert sein, die in das Isoliergas hinein diffundieren. Dieser Anteil läßt sich durch sorgfältiges Evakuieren des Behälters verringern.

- Aufnahmevermögen des eingebauten Trockenmittels:

Trockenmittel besitzen ein begrenztes Aufnahmevermögen für Feuchte. Nach einigen Jahren kann es bei ständigem Feuchtezutritt durch Wasserdampfpermeation erschöpft sein.

- Wasserdampfpermeation durch Dichtungen:

Gekapselte Schaltanlagen werden besonders unter für luftisolierte Schaltanlagen schwierigen Umgebungsbedingungen in feucht-heißem Klima eingesetzt. Die Wasserdampfpermeation in die gekapselte Schaltanlage hängt vom äußeren Wasserdampfpartialdruck, der Betriebsdauer, dem Permeationskoeffizienten des Dichtungsmaterials und der Geometrie der Dichtung ab. Eine verbesserte Dichtwirkung gegen Wasserdampfpermeation wird erreicht, wenn die Dichtflächen abgedreht werden, so daß die Bearbeitungsriefen parallel zu den Dichtringen laufen [Ushio 71].

### **3.4 Feuchte in gekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten Schaltanlagen**

Eine SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlage ist ein abgeschlossenes System. Es besteht aus einem geschlossenen Behälter, in dem sich die einzelnen Anlagenkomponenten befinden. In industriell gefertigten gekapselten Schaltanlagen ist technisch bedingt eine bestimmte Feuchtemenge enthalten, die sich folgendermaßen aufteilt:

- An den Metallwänden adsorbierte Feuchte (Wandfeuchte)  
Adsorption ist die Bindung von Teilchen, die aus der Gasphase stammen und sich an der Oberfläche fester Körper anlagern.
- In den Metallwänden absorbierte Feuchte  
Absorption bezeichnet die Bindung von Teilchen, die aus der Gasphase stammen, im Innern einer festen Substanz.
- Im Gasraum befindliche Feuchte (Gasfeuchte)
- In den verschiedenen Kunststoffteilen, wie Isolatoren oder mit Epoxidharz isolierten Wandlern enthaltene Feuchte (Absorption).
- An den verschiedenen Kunststoffbauteilen enthaltene Feuchte (Adsorption).

Adsorption ist die Ursache dafür, daß sich zunächst die Gasfeuchte des Isoliergases in der Schaltanlage nach dem erstmaligen Befüllen mit der Zeit vermindert [Hathaway 75]. Die in die Anlage eingebrachte Gesamtfeuchte lagert sich zum Teil mittels Sorption in der Anlage an, und geht somit für die Messung der Gasfeuchte verloren, so daß meßtechnisch nur die Gasfeuchte ermittelt werden kann.

Eine Meßgröße für die Gasfeuchte ist die Taupunkttemperatur, die abhängig von der Umgebungstemperatur ist, da bei steigender Umgebungstemperatur Desorption einsetzt [König 73, Neumann 92-2]. Die Umgebungstemperatur muß daher bei der Angabe der Taupunkttemperatur immer mit angegeben werden.

### **3.5 Ursachen für die Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes in gekapselten Schaltanlagen**

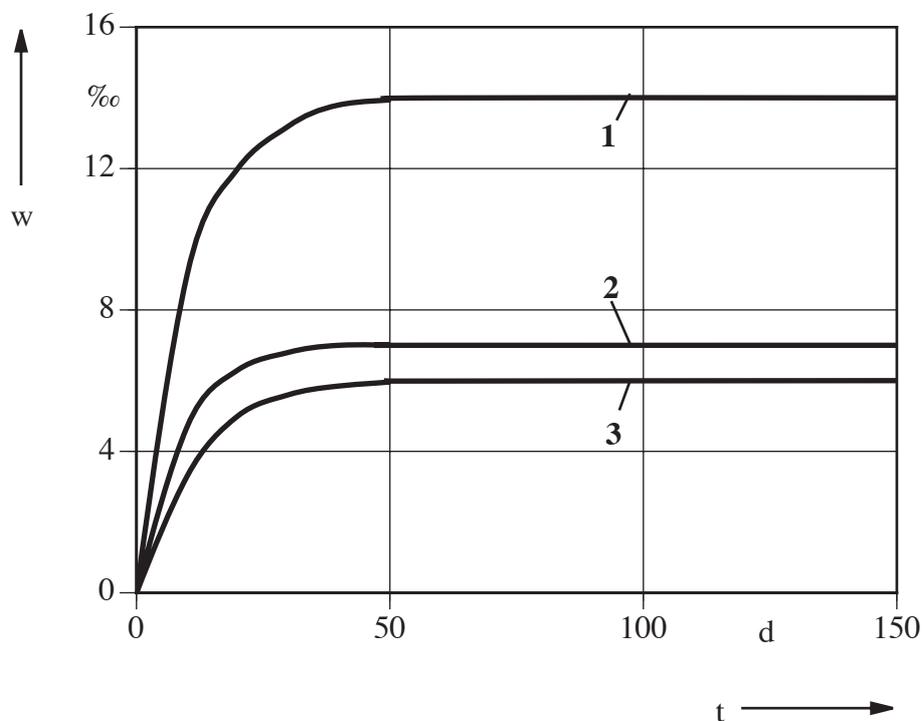
#### **3.5.1 Eingebaute Feuchte**

Die in der Anlage vorhandene Feuchte ist nicht nur als Gasfeuchte, sondern auch als adsorbierte oder absorbierte Feuchte an oder in den verschiedenen Festkörperteilen vorhanden [König 73, Hathaway 75, Braun 87]. Nach dem ersten Befüllen einer Schaltanlage dauert es zwischen einigen Tagen bis zu einigen Monaten bis sich ein Gleichgewichtszustand bezüglich des Wasserdampfpartialdruckes in der Anlage eingestellt hat. In dieser Zeit kann ein Ansteigen der Taupunkttemperatur beobachtet werden.

Die Taupunkttemperaturerhöhung kommt durch Desorption adsorbierter Gase von der Oberfläche eingebauter Feststoffisolierteile und durch Ausgasung absorbierter Gase aus dem Inneren der in der Anlage befindlichen Feststoffe zustande. Der Vorgang der Desorption erfolgt mit Zeitkonstanten von einigen Minuten bis zu mehreren Wochen. Der Vorgang der Ausgasung erfolgt mit erheblich längeren Zeitkonstanten von bis zu einigen Monaten [Wutz 92].

Setzt man ein Epoxidharzbauteil vor dem Einbau der Umgebungsluft aus, so ad- und absorbiert es den in der Luft befindlichen Wasserdampf. Eine Lagerung von Epoxidharzteilen bei 93 %iger Luftfeuchtigkeit zeigt nach etwa 50 Tagen eine Sättigung, wobei die Teile je nach Füllstoff etwa 1 ‰ ihres Eigengewichtes an Wasserdampf aufgenommen haben (**Bild 3.1**) [Beyer 91]. Baut man diese Epoxidharzbauteile in eine SF<sub>6</sub>-Schaltanlage ein, so geben sie Wasserdampf ab, bis sich der Wasserdampfpartialdruck in den Bauteilen und dem SF<sub>6</sub>-Gas angeglichen hat.

Messungen an in Betrieb befindlichen SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen haben gezeigt, daß die Taupunkttemperatur in der Anlage mit steigender Umgebungstemperatur ansteigt [Braun 87, Böhme 76, Schwarzer 76]. Es stellt sich abhängig von der Außentemperatur immer wieder ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen adsorbierter und absorbierter Feuchte und der Gasfeuchte in der Anlage ein. Eine konstante relative Gasfeuchte in der Schaltanlage stellt sich nicht ein, da die Sättigungsdampfdruckkurve über der Temperatur nicht linear verläuft.



**Bild 3.1:** Wasseraufnahme von Epoxidharzformstoffen nach [Beyer 91]

- Kurve 1 Heißhärter ungefüllt
- Kurve 2 Heißhärter mit 150 Gwt. Quarzmehl
- Kurve 3 Heißhärter mit 200 Gwt. Quarzmehl

### 3.5.2 Permeation bei gekapselten Schaltanlagen

Die Permeation schließt die drei Teilprozesse Adsorption, Diffusion und Desorption ein. Sie beschreibt damit den Zusammenhang des Hindurchdringens von Gasen oder Dämpfen durch Feststoffe. Die Gasdurchlässigkeit  $q$  weist die folgenden Abhängigkeiten auf (Ficksches Gesetz):

$$q = \frac{f(\vartheta_w) f(p_1, p_2) A}{d}, \quad (3.1)$$

mit  $f(\vartheta_w)$ : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der Wandtemperatur  
 $f(p_1, p_2)$ : Abhängigkeit von den Drücken zu den beiden Seiten der Wand  
 $A$ : Wandfläche  
 $d$ : Wanddicke

Der Permeationsgasstrom wird in der Literatur in  $[\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$  oder in  $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$  angegeben. Dabei sind  $10 [\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$  gleich  $1 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ . Es handelt sich um einen Druck-Volumen Gasstrom, daher bezeichnet man ihn als  $q_{pV}$ . Der auf die Fläche bezogene Permeationsstrom, der auch Permeationsleitfähigkeit genannt wird, ergibt sich zu:

$$q_{\text{perm}} = \frac{q_{pV} \cdot d}{A \cdot (p_1 - p_2)}. \quad (3.2)$$

Die Permeationsleitfähigkeit ist stark temperaturabhängig und kann für verschiedene Stoffe aus Tabellen entnommen werden. Stellt man obige Gleichung um, so erhält man für den Permeationsgasstrom:

$$q_{pV} = \frac{q_{\text{perm}}(\vartheta) \cdot (p_1 - p_2) \cdot A}{d}. \quad (3.3)$$

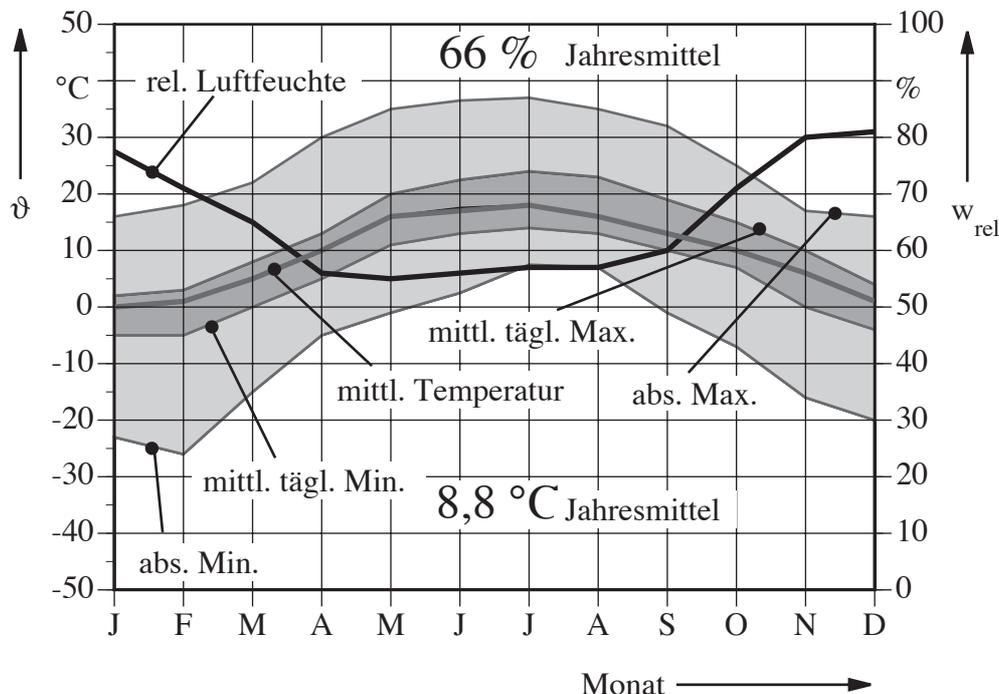
Auf diese Art und Weise kann aus den Permeationsleitfähigkeiten  $q_{\text{perm}}$  verschiedener Stoffe der Permeationsstrom  $q_{pV}$  berechnet werden. Dabei muß für den Druckunterschied  $(p_1 - p_2)$  der Partialdruckunterschied des betrachteten Gases zu beiden Seiten einer Kapselung eingesetzt werden.

Für gekapselte Schaltanlagen verwendet man im allgemeinen gummielastische Stoffe als Dichtmittel. Perbunan ist z.B. ein gummielastischer Dichtstoff (Acryl-Nitril-Butadien-Kautschuk), der bei  $\text{SF}_6$ -gekapselten Anlagen häufig Anwendung findet. Für Flansche wird Epoxidharz eingesetzt. Beide Stoffe besitzen eine gewisse Permeationsleitfähigkeit. Es liegen derzeit allerdings nur wenige quantitative Messungen der Permeationsleitfähigkeit dieser Dichtstoffe vor.

Zur quantitativen Abschätzung des Wasserdampfpartialdrucks, der sich nach fünf Jahren Betriebszeit in einer Schaltanlage einstellen kann, werden nachfolgend unter vereinfachenden Annahmen zwei Berechnungen für typische Einsatzfälle gekapselter Schaltanlagen durchgeführt. Dabei sind die klimatischen Umgebungsverhältnisse, insbesondere die Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur, wichtige Parameter. Die erste Berechnung wird für die klimatischen Verhältnisse Mitteleuropas, die zweite für einen Tropeneinsatz vorgenommen.

### 3.5.3 Berechnung der Permeation für feuchtgemäßigtes Klima in Mitteleuropa

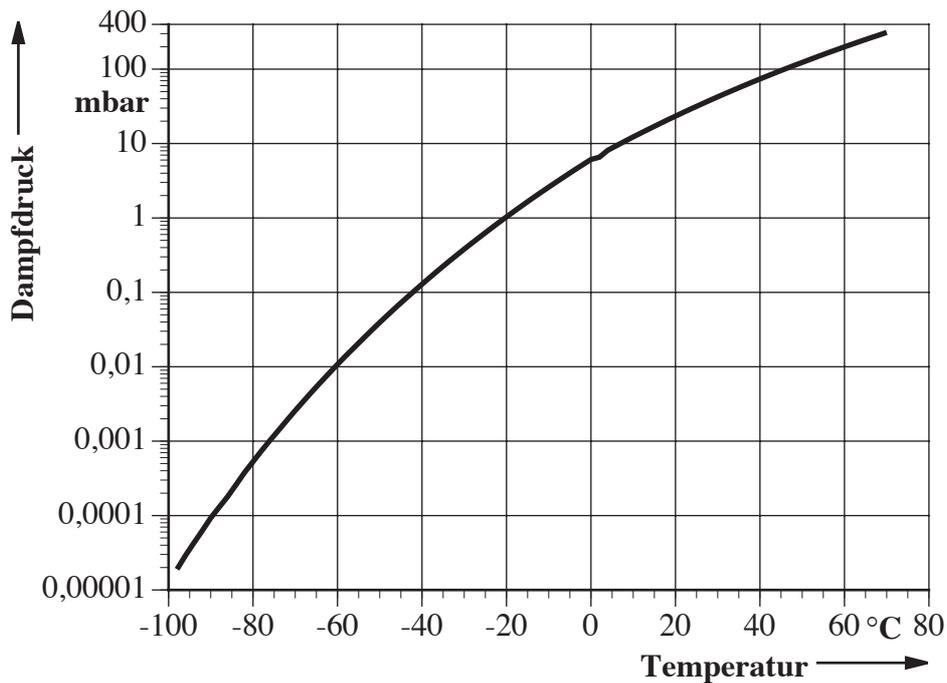
Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt für den ausgewählten Fall  $8,8^{\circ}\text{C}$ , die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit  $66\%$ . Morgens, Abends und in der Nacht herrscht eine hohe Luftfeuchtigkeit, die über den Tag hinweg abnimmt und kurz nach dem Mittag ein Minimum aufweist.



**Bild 3.2:** Beispielhafte Klimadaten für relative Feuchten und Temperaturen in Deutschland [Diercke 74-1]

Für die Berechnung der Permeation werden folgende Annahmen getroffen:

1. die Gasdurchlässigkeit für Wasserdampf ist gleich der Gasdurchlässigkeit für Luft
2. die relative Luftfeuchte von  $66\%$  ist während des gesamten Zeitraumes konstant,
3. die Umgebungstemperatur von  $8,8^{\circ}\text{C}$  ist während des gesamten Zeitraumes konstant,
4. der Druckunterschied beiderseits der Wand ist während des gesamten Zeitraumes konstant und
5. es wird ein Zeitraum von fünf Jahren betrachtet.



**Bild 3.3:** Druck des gesättigten Wasserdampfes über der Temperatur, von -98 °C bis 0 °C über Eis, von 0 °C bis 70 °C über Wasser

Für eine Umgebungstemperatur von 8,8 °C beträgt der Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{part}}$  bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit 11,32 mbar (**Bild 3.3**). Bei 66 % relativer Luftfeuchtigkeit ergibt sich ein Wasserdampfpartialdruck  $\Delta p$  7,47 mbar, der einer Taupunkttemperatur  $\vartheta_{\tau}$  von 2,8 °C entspricht. Die Permeationsleitfähigkeit von Perbunan bei 8,8 °C beträgt  $1,0 \cdot 10^{-2}$  [mbar·l·mm·s<sup>-1</sup>·m<sup>2</sup>·bar<sup>-1</sup>] [Wutz 92].

$$q_{pV, \text{Perb}} = \frac{q_{\text{perm, Perb}}(8,8 \text{ °C}) \cdot \Delta p \cdot A}{d}$$

Die Dicke des Dichtrings ist 8 mm und die gesamte Dichtfläche für alle Perbunandichtungen 0,048 m<sup>2</sup>. Damit kann der Permeationsgasstrom  $q_{pV}$  berechnet werden:

$$\begin{aligned} q_{pV, \text{Perb}} &= \frac{1,0 \cdot 10^{-2} \cdot 7,47 \cdot 0,048}{8} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm} \cdot \text{mbar} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{mm}} \\ &= 4,48 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Nach fünf Jahren beträgt der Wasserdampfpartialdruck in einer Schaltanlage mit einem Volumen von 120 l:

$$\Delta p_{\text{H}_2\text{O, Perb}} = 4,48 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \cdot \frac{15766400 \text{ s}}{120 \text{ l}} = 0,589 \text{ mbar}$$

Analog kann auch der sich einstellende Wasserdampfpartialdruck in der hier betrachteten Anlage für die Durchlässigkeit von Epoxidharz berechnet werden. Der Epoxidharzflansch hat einen Innendurchmesser von 200 mm, eine Breite von 55 mm und eine Dicke von 50 mm. Die Permeationsleitfähigkeit von Epoxidharz bei 8,8°C beträgt etwa 0,0435 [mbar·l·mm·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·bar<sup>-1</sup>]. Nach fünf Jahren und bei einem Anlagenvolumen von 120 l erhält man einen Wasserdampfpartialdruck von:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{H}_2\text{O, Epox}} &= \frac{0,0435 \cdot 7,47 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 55 \cdot 10^{-3} \cdot 157766400}{50 \cdot 120} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm} \cdot \text{mbar} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{mm} \cdot \text{l}} \\ &= 0,590 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Addiert man nun die beiden Partialdrücke entsprechend dem Daltonschen Gesetz, so erhält man den resultierenden Wasserdampfpartialdruck  $\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}$  von 1,179 mbar, was einer Taupunkttemperatur von -18,6 °C entspricht.

### 3.5.4 Berechnung der Permeation für tropisches Regenwaldklima

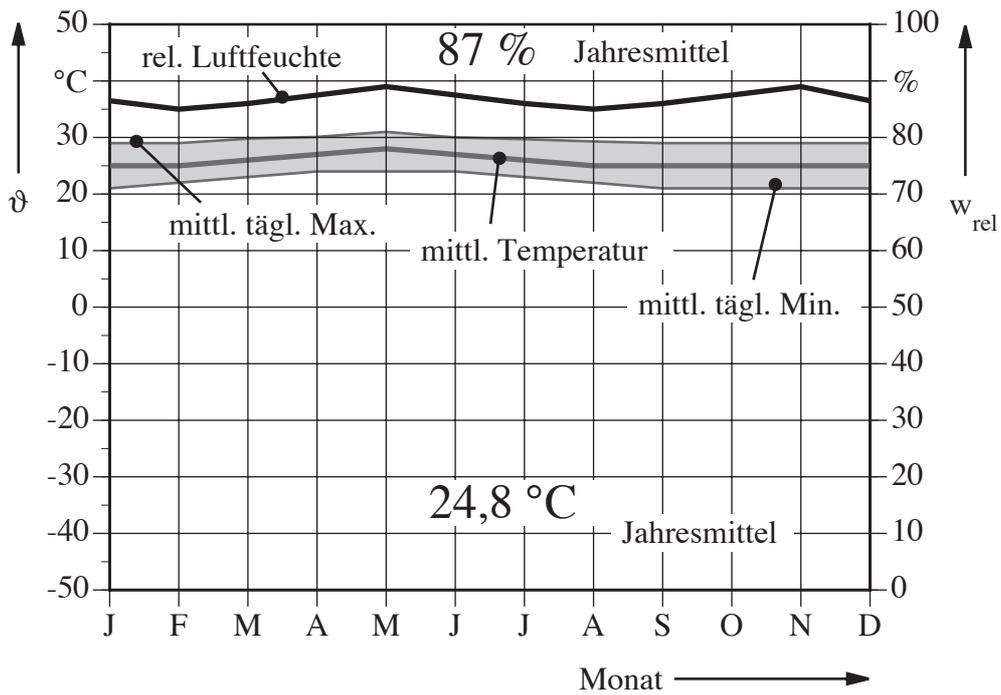
Ein typischer Einsatzort für gekapselte Schaltanlagen im tropischen Regenwaldklima ist Singapur. Die Jahresdurchschnittstemperatur von Singapur beträgt 27,1 °C [Boucher 75]. Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit beträgt ungefähr 90 % [Lockwood 74]. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit ist um die Mittagszeit etwa 75 %. In den Morgen-, Abend- und Nachtstunden wird die höchste relative Luftfeuchte von 95 % erreicht (**Bilder 3.4 und 3.5**).

Analog der Rechnung für Mitteleuropa ergibt sich für Dichtringe aus Perbunan der Wasserdampfpartialdruck zu:

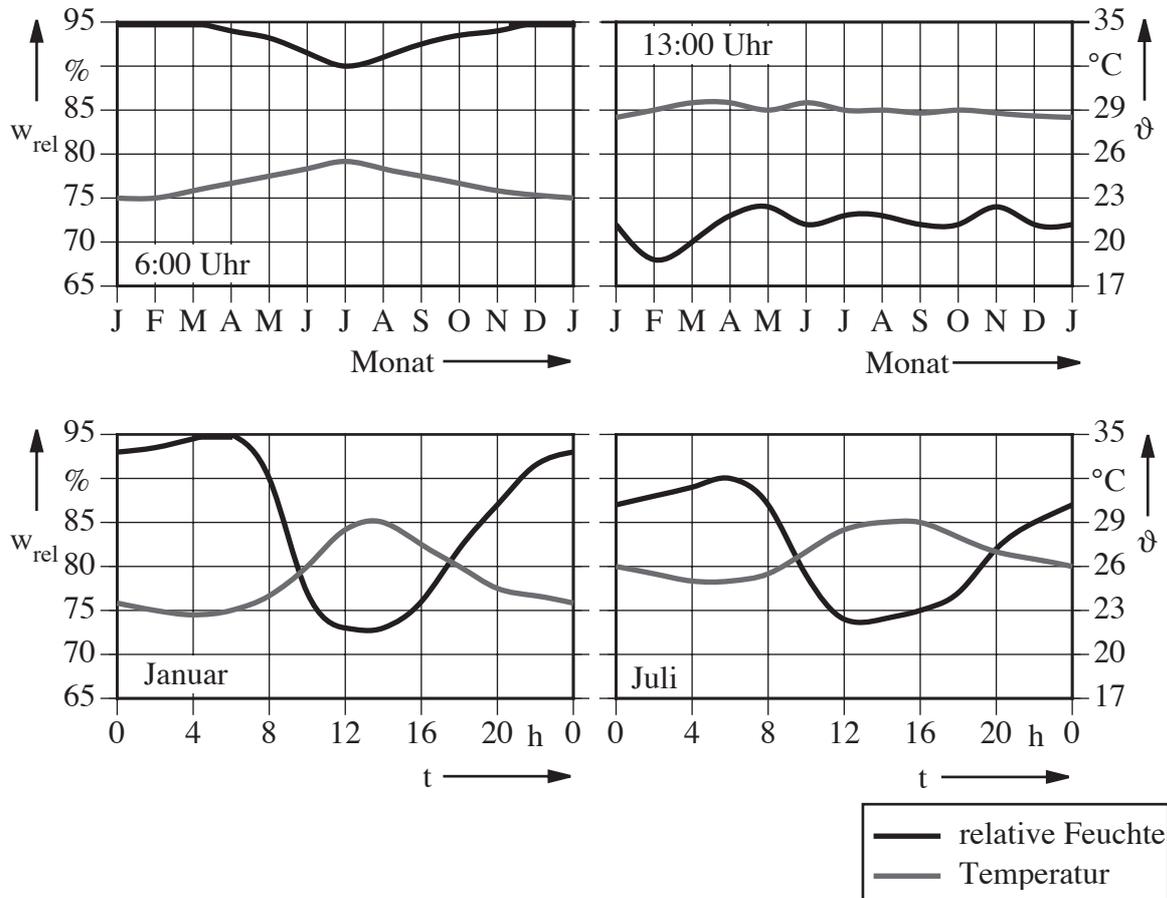
$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{H}_2\text{O, Perb}} &= \frac{q_{\text{perm, Perb}}(27,1 \text{ °C}) \cdot \Delta p \cdot A \cdot t}{d \cdot V} \\ &= \frac{3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,9 \cdot 35,86 \cdot 0,048 \cdot 157766400}{8 \cdot 120} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm} \cdot \text{mbar} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{mm} \cdot \text{l}} \\ &= 8,911 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Für den Anteil am Wasserdampfpartialdruck nach fünf Jahren in der Anlage, der durch die Gasdurchlässigkeit des Epoxidharzes verursacht wird, gilt:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{H}_2\text{O, Epox}} &= \frac{q_{\text{perm, Epox}}(27,1 \text{ °C}) \cdot \Delta p \cdot A \cdot t}{d \cdot V} \\ &= \frac{0,1355 \cdot 32,27 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 55 \cdot 10^{-3} \cdot 157766400}{50 \cdot 120} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm} \cdot \text{mbar} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{mm} \cdot \text{l}} \\ &= 7,948 \text{ mbar.} \end{aligned}$$



**Bild 3.4:** Beispielhafte Klimadaten für rel. Feuchte und Temperatur im tropischen Regenwald [Diercke 74-2]

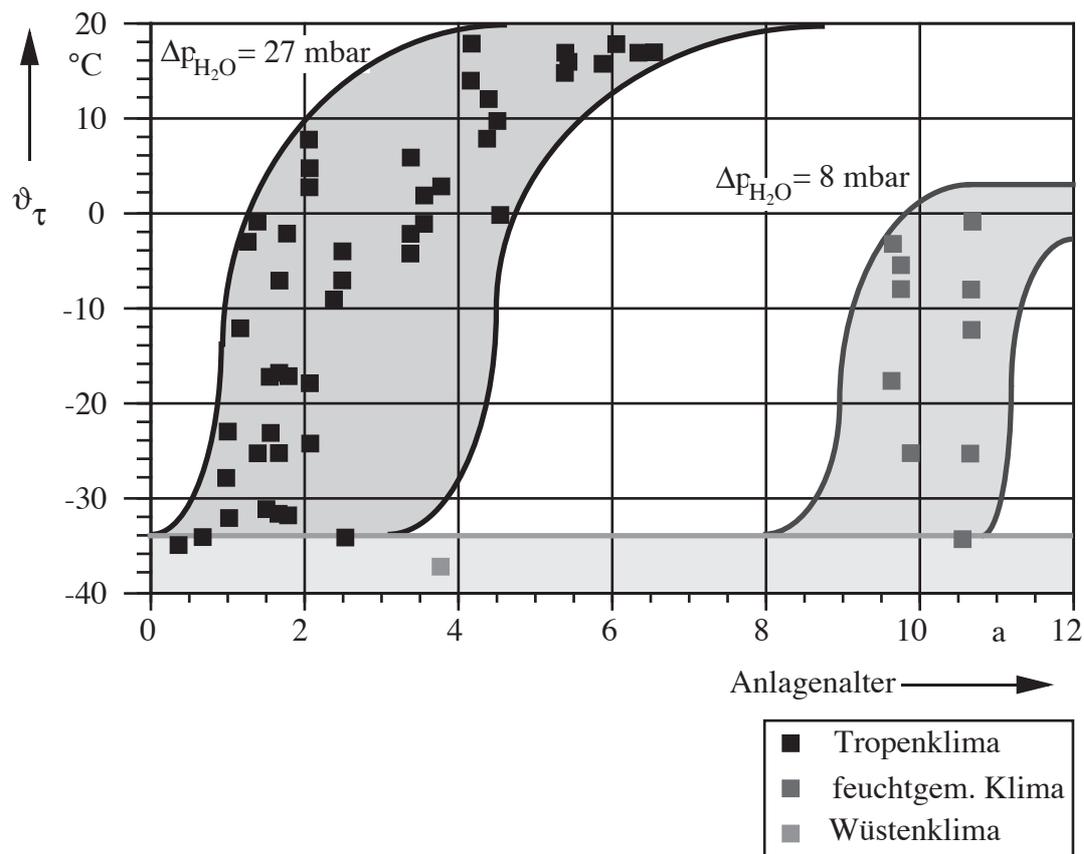


**Bild 3.5:** Klimadaten für relative Feuchten und Temperaturen in Singapur [Lockwood 74]  
oben: Jahresverlauf um 6:00 und 13:00 Uhr Ortszeit  
unten: Tagesverlauf im Januar und Juli

Der resultierende Gesamtpartialdruck  $\Delta p_{\text{H}_2\text{O}} = 16,859 \text{ mbar}$  entspricht einer Taupunkttemperatur von  $14,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dieser Wert macht deutlich, daß sich beim Tropeneinsatz gekapselter Anlagen nach nur fünf Jahren Betriebszeit eine relativ große Feuchtemenge in der Anlage ansammeln kann. Feuchtemessungen an in Betrieb stehenden Anlagen haben diese Abschätzung bestätigt.

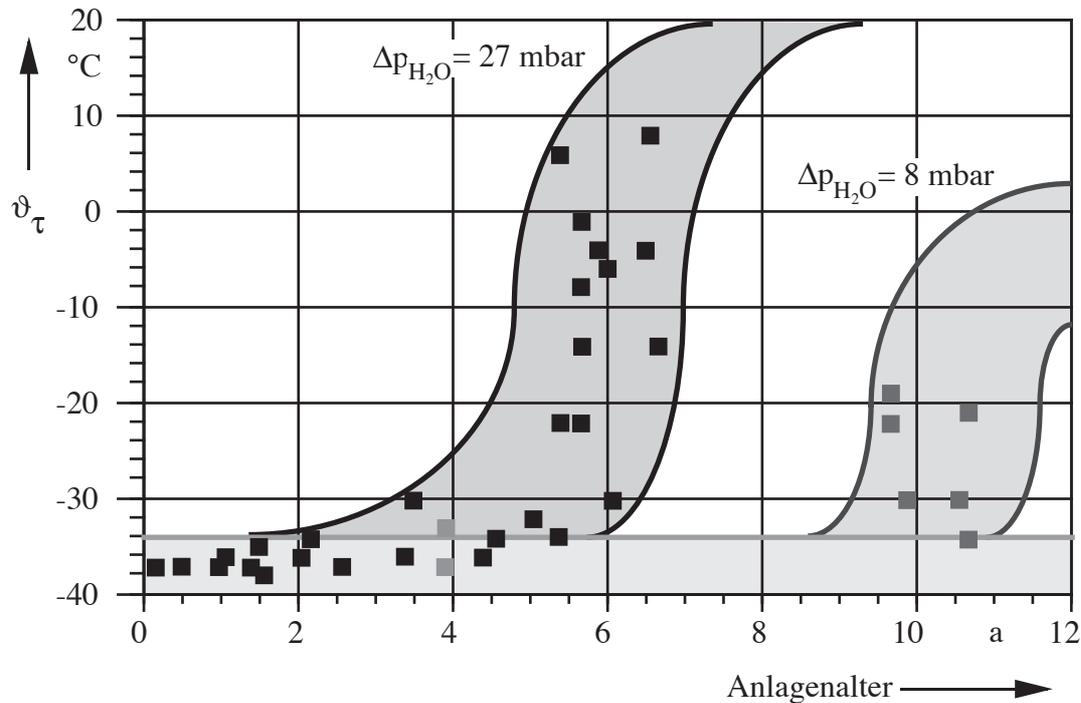
### 3.5.5 Messungen der Isoliertgasfeuchte in gekapselten Anlagen in verschiedenen Klimazonen

Über Messungen der Isoliertgasfeuchte in gekapselten Schaltanlagen wurde bisher in der Literatur selten berichtet. Eine Untersuchung der Isoliertgasqualität zur Beurteilung des inneren Zustandes von 23 Gasräumen von Mittelspannungs-Schaltanlagen ergab Werte von  $-16 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $-27 \text{ }^\circ\text{C}$  für Gasräume ohne Trockenmittel und  $-47 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $-21 \text{ }^\circ\text{C}$  für Gasräume mit Trockenmittel [Heiß 90]. Dabei fehlte allerdings die Angabe, wie lange die jeweiligen Gasräume im Betrieb waren.



**Bild 3.6:** Verlauf der Taupunkttemperaturen in Gasräumen mit 1 g Trockenmittel/ Liter Gas

Die von einem Anlagenhersteller vorgenommenen Messungen der Isoliergasfeuchte von gekapselten Anlagen in verschiedenen Klimazonen sind in den **Bildern 3.6** und **3.7** dargestellt. Das Isoliergas bleibt sehr trocken, bis die Aufnahmefähigkeit des Trockenmittels für Feuchte erschöpft ist. Dieser Punkt wird umso eher erreicht, je mehr Feuchte in die Anlage eingebaut wurde und das Material der Dichtringe eine höhere Permeationsfähigkeit besitzt.



**Bild 3.7:** Verlauf der Taupunkttemperaturen in Gasräumen mit 2 g Trockenmittel /Liter Gas

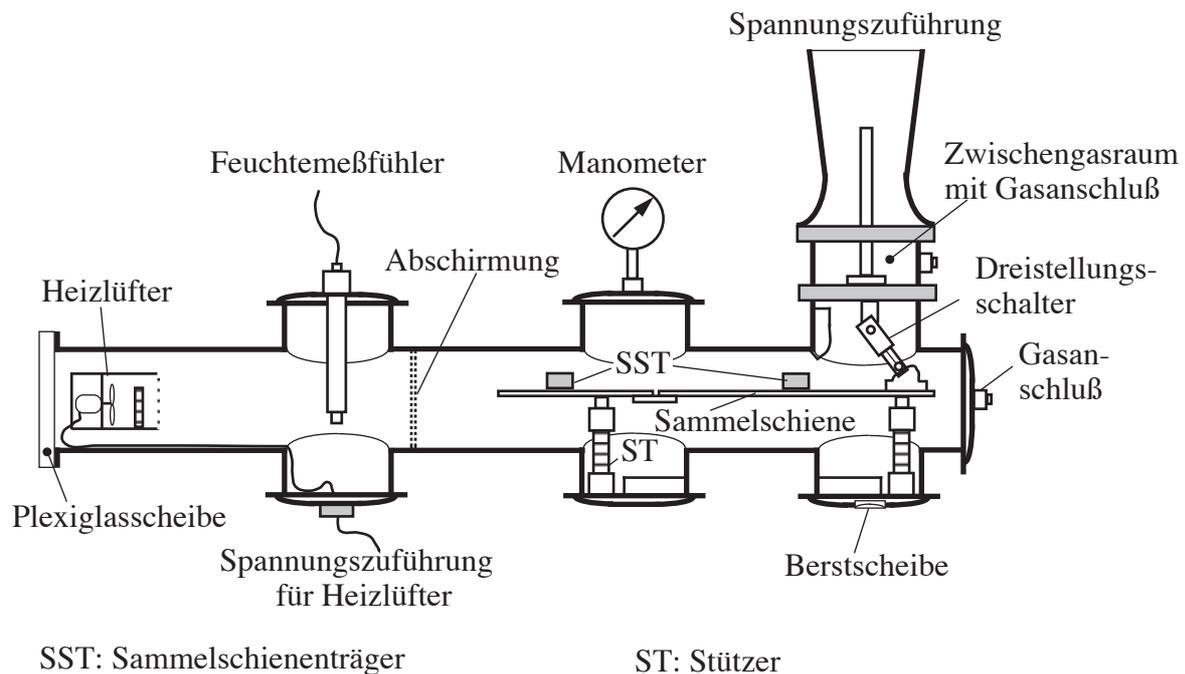
Danach beginnt der Taupunkttemperatur im Gasraum zu steigen, bis sich die Wasserdampfpartialdrücke innerhalb und außerhalb der Kapselung angeglichen haben. Die gemessenen Taupunktwerte zeigen, daß sich abhängig vom Umgebungsklima große Mengen Feuchtigkeit in den Gasräumen sammeln. Dieses Phänomen muß bei der Konstruktion gekapselter Schaltanlagen für den Einsatz in kritischen Klimazonen berücksichtigt werden. Die Menge des Trockenmittels, das in die Anlage einzubauen ist, kann mit Kenntnis der Materialdaten berechnet werden [Arakelyan 93]. Die beste Lösung zur Sicherstellung der Trockenheit des Isoliergases ohne Wartung stellen der Verzicht auf Dichtungen und eine sorgfältige Evakuierung des Anlagenbehälters vor der Befüllung mit dem Isoliergas dar.

### 3.6 Auswirkungen erhöhter Isoliergasfeuchte in gekapselten Schaltanlagen

Eine erhöhte Feuchte der Isoliergase hat keinen negativen Einfluß auf das Isoliervermögen der reinen Gasstrecke [Schmidt 72, Beyer 86]. Die Grenzschicht Isolator-Gas erreicht aber nur im günstigsten Fall die elektrische Festigkeit der reinen Gasstrecke. Verunreinigungen an der Grenzschicht können Quellen einer lokalen Teilentladungsbeanspruchung sein, die zur Bildung von Zersetzungsprodukten und schon nach wenigen Stunden zu einer erheblichen Verminderung der Überschlagspannung führen. Bei relativen Isoliergasfeuchten von mehr als 60-70 % sinkt, abhängig vom Gasdruck und vom Isoliermaterial, die Überschlagspannung der Isolieranordnung deutlich [Benken 68, Link 74, Giesenbauer 76, Brockmann 81]. Diese grundlegenden Erkenntnisse wurden an einer metallgekapselten SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlage überprüft.

#### 3.6.1 Aufbau der Versuchsanlage

Bild 3.8 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus:



**Bild 3.8:** Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses erhöhter Isoliergasfeuchte besteht aus einem Teilstück einer Mittelspannungs-Schaltanlage. Er ist mit einer Spannungszuführung und einem Zwischengasraum ausgestattet, in dem sich trockenes komprimiertes SF<sub>6</sub>-Gas befindet. Mit Hilfe eines Dreistellungsschalters kann die Spannungszuführung geerdet oder die Spannung auf die Sammelschiene geschaltet werden.

Die Kupfersammelschiene wird mechanisch von zwei Stützern und zwei Sammelschienenträgern gehalten. Über ein Manometer wird der Gasdruck der Schaltanlage gemessen. Ein Feuchtemeßfühler zur Messung der Isoliergasfeuchte und ein Heizlüfter zur Einstellung der Temperatur sind in der Schaltanlage montiert und durch eine siebförmige Abschirmung vom Sammelschienenbereich getrennt. Eine Berstscheibe dient zur Vermeidung einer unzulässigen Druckerhöhung bei einem Durch- oder Überschlag in der Schaltanlage. Durch eine Plexiglas-scheibe an der Stirnseite der Anlage kann der Gasraum eingesehen werden.

### **3.6.2 Messung der Isoliergasfeuchte**

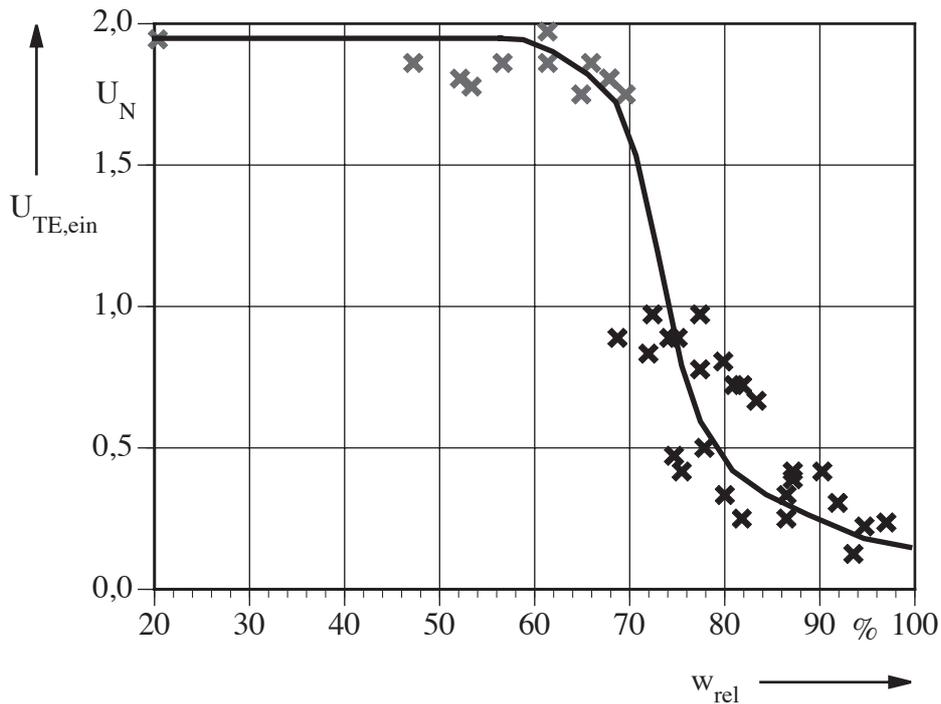
Mögliche Funktionsprinzipien zur Messung der Isoliergasfeuchte sind Elektrolyse (Coulometrische Karl Fischer Titration), Adsorption oder Kondensation [Neumann 92-2]. Handelsübliche Geräte arbeiten meist als Adsorptions-Hygrometer oder als Spiegel-Hygrometer. Bei Vergleichsuntersuchungen hat sich die Spiegel-Methode zur Taupunktmessung als die deutlich bessere Variante herausgestellt [Pettinga 93].

Spiegel-Hygrometer sind unempfindlich gegen Zersetzungsprodukte und altern nicht. Deshalb wurden diese Methode für die Taupunktmessungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Die wesentlichen Bestandteile des Feuchtemeßfühlers sind zwei thermisch und elektrisch in Reihe geschaltete Peltier Elemente, auf die eine Keramikplatte aufgebracht ist, die wiederum mit einem Streufeldkondensator und einem Widerstandsthermometer Pt100 versehen ist. Thermisch isoliert von der Keramikplatte befindet sich am Meßfühler noch ein zweiter Platinwiderstand Pt100, der die Gastemperatur mißt.

Die Peltierelemente kühlen das Keramikplättchen bis zum Taupunkt ab. Durch die damit verbundene Taubildung ändert sich die Kapazität des Streufeldkondensators. Diese Kapazitätsänderung regelt den Peltierstrom derart, daß sich eine konstante dünne Tauschicht auf der Keramikplatte einstellt. Die Temperatur der Keramikplatte wird gemessen, da sie der zu bestimmenden Taupunkttemperatur entspricht.

### **3.6.3 Bestimmung der Teilentladungseinsetzspannung**

Die Teilentladungseinsetzspannung liegt bei relativen Feuchten bis 70% oberhalb der 1,7-fachen Nennspannung. Eine weitere Spannungssteigerung verursacht dann Teilentladungen im Bereich der Spannungszuführung. Da diese Teilentladungen auch ohne zugeschaltete Sammelschiene gemessen wurden, können sie eindeutig der Spannungszuführung zugeordnet werden und entstehen nicht im zu untersuchenden Bereich der Sammelschiene und ihrer Stützelemente. Ab einer relativen Feuchte von 70 % sinkt die Teilentladungseinsetzspannung deutlich unter die 1,7-fache Nennspannung.

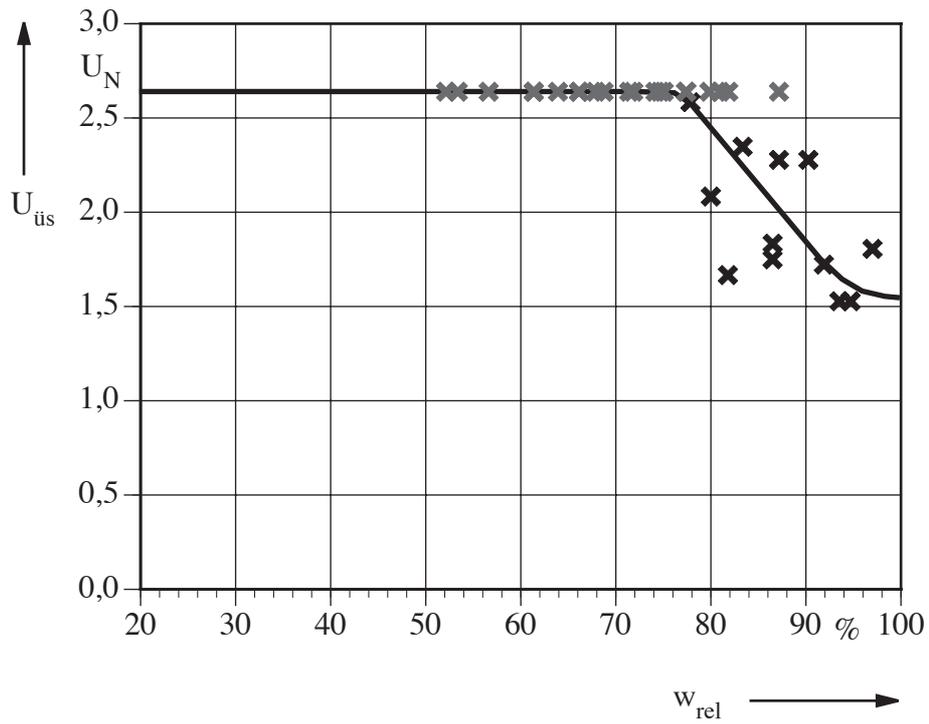


**Bild 3.9:** Verlauf der Teilentladungseinsetzspannung in Abhängigkeit von der relativen Isoliergasfeuchte

### 3.6.4 Bestimmung der Überschlagspannung

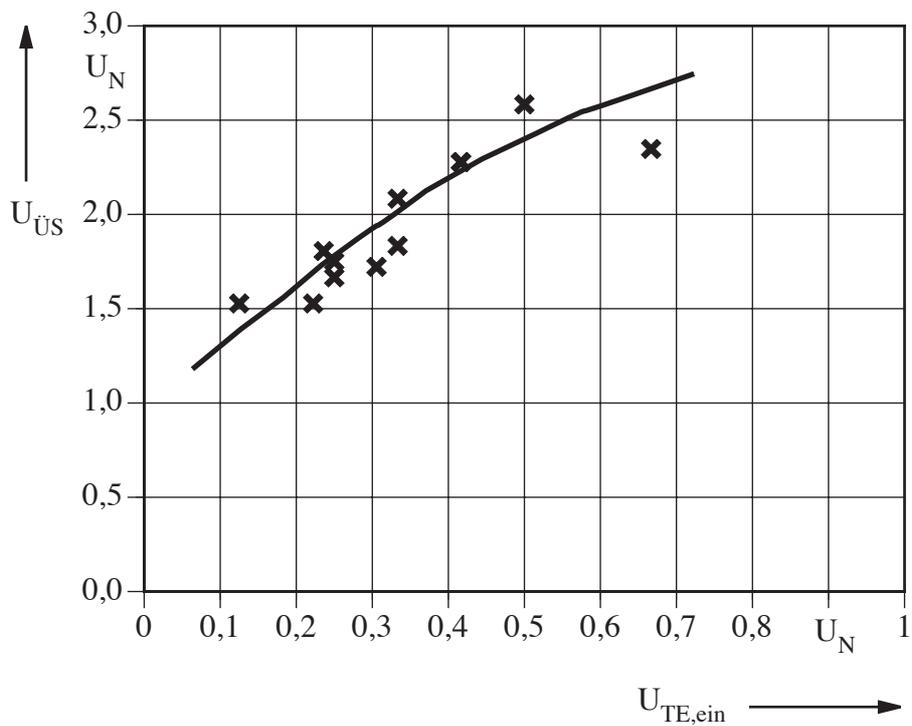
Das **Bild 3.10** zeigt die Überschlagspannung  $U_{\text{üs}}$  in Abhängigkeit von der relativen Isoliergasfeuchte  $w_{\text{rel}}$ . Bei den Überschlagmessungen wurde die Prüfspannung aufgrund des möglichen Durchschlages eines Stützers in der Anlage auf die 2,65-fache Nennspannung begrenzt. Die schwarzen Kreuze in Bild 3.9 stellen je einen Überschlagwert dar. Die grauen Kreuze bezeichnen die höchste an die Schaltanlage angelegte Spannung ohne Überschlag.

Erste Überschläge unterhalb der 2,65-fachen Nennspannung traten ab einer relativen Feuchte von ca. 80 % auf. Die Überschlagspannung betrug dabei das 2,6-fache der Nennspannung. Auch oberhalb von 94% relativer Gasfeuchte sank die Überschlagspannung nicht unter das 1,5-fache der Nennspannung. Spuren von Überschlägen waren auf lediglich einem Sammelschienenträger feststellbar.



**Bild 3.10:** Verlauf der Überschlagnspannung in Abhängigkeit von der relativen Isoliergasfeuchte

### 3.6.5 Überschlagnspannung in Abhängigkeit von der Teilentladungseinsetzspannung



**Bild 3.11:** Überschlagnspannung in Abhängigkeit von der Teilentladungseinsetzspannung

**Bild 3.11** zeigt den Zusammenhang zwischen der Überschlagspannung  $U_{\text{ÜS}}$  und der Teilentladungseinsetzspannung  $U_{\text{TE,ein}}$ . Mit zunehmender Teilentladungseinsetzspannung steigt die Überschlagspannung etwa linear an. Für die untersuchte Anlage ist eine Teilentladungseinsetzspannung unterhalb der 0,7-fachen Nennspannung die Grenze, bei der die Überschläge unterhalb der 2,65-fachen Nennspannung stattfinden. Auch bei sehr niedriger Teilentladungseinsetzspannung ( $0,125 \cdot U_N$ ) beträgt die Überschlagspannung noch das 1,5-fache der Nennspannung. In dieser Schaltanlage wird es daher auch bei sehr hohen Gasfeuchten nicht zu einem spontanen Überschlag kommen.

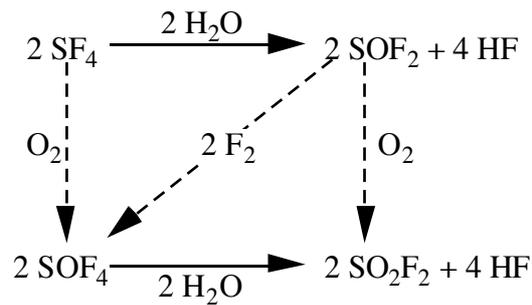
### 3.7 Diskussion der Meßergebnisse bezüglich der Feuchte in gekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten Schaltanlagen

Technisches SF<sub>6</sub> wird heute mit einer Reinheit von 99,995 Gew.-%, einem Sauerstoffgehalt von < 10 ppm<sub>v</sub> und einem Wasserdampfgehalt von < 5 ppm<sub>v</sub> hergestellt. Bei der Zersetzung eines SF<sub>6</sub>-Moleküls durch Funkenentladungen entstehen, abhängig von der Anregungsenergie, durch dissoziative Ionisation unter Abspaltung von Fluoratomen eine Reihe von Radikalen, Ionen und neutralen Molekülen. Außerhalb der Entladungszone wird durch Rekombination ein großer Teil des zersetzten Isoliergases zu SF<sub>6</sub> zurückgebildet. Außerdem kann durch den Zusammenschluß zweier SF<sub>5</sub>-Radikale S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> gebildet werden. Im SF<sub>6</sub> enthaltene Spuren von Wasserstoff und Sauerstoff besitzen eine große Affinität zu Schwefel und Fluor. Es werden weitere Reaktionsprodukte gebildet, die eine Rekombination zu SF<sub>6</sub> verhindern. Bei Teilentladungen werden dadurch die unerwünschten Zersetzungsprodukte Schwefeltetrafluorid (SF<sub>4</sub>), Dischwefeldekafluorid (S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>), Thionylfluorid (SOF<sub>2</sub>), Thionyltetrafluorid (SOF<sub>4</sub>), Sulphurylfluorid (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) und Fluorwasserstoff (HF) erzeugt [Becher 70, Piemontesi 95].

Prozeß	Prozeßgleichung	Energie eV
Anlagerung/ Ablösung	$SF_6 + e \rightleftharpoons (SF_6^-) \rightleftharpoons SF_6^-$	0,05 ... 0,1
Dissoziative Anlagerung	$SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^-) \longrightarrow SF_5^- + F$	0,1
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^-)} \longrightarrow SF_5 + F^-$	4,0
Dissoziation	$SF_6 + e \longrightarrow (SF_6) + e \longrightarrow SF_5 + F + e$	2 ... 6
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6) + e} \longrightarrow S + 6F + e$	22
Dissoziative Ionisation	$SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^+) + 2e \longrightarrow SF_5^+ + F + 2e$	15,8
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^+) + 2e} \longrightarrow SF_4^+ + 2F + 2e$	18,8
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^+) + 2e} \longrightarrow SF_3^+ + 3F + 2e$	19,3
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^+) + 2e} \longrightarrow S + F^+ + 5F + 2e$	41,0
	$\phantom{SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^+) + 2e} (SF_6) + e \longrightarrow SF_5^+ + F + 2e$	15,8

e = Elektron; ( ) instabiler, angeregter Zwischenzustand

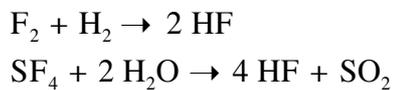
**Tabelle 3.1:** Auswahl von Elektronenprozessen für SF<sub>6</sub> nach [Mosch 79]



**Bild 3.12:** Folgereaktionen der Zersetzung in technischem SF<sub>6</sub> nach [Becher 70]

Im Gegensatz zu reinem Schwefelhexafluorid sind die Zersetzungsprodukte alle toxisch. Sie können Reizungen von Haut, Augen und Schleimhäuten und, wenn sie in größeren Mengen eingeatmet werden, Übelkeit, Schwindelgefühl und Lungenödeme auslösen [Peter 96].

Die durch Teilentladungen verursachten Änderungen in der Isoliergaszusammensetzung beeinflussen die Festigkeit der Gasstrecke nicht. Aggressive Reaktionsprodukte greifen aber die Isolierstoff-Grenzfläche an und vermindern deren Überschlagspannung deutlich negativ. Bei der Reaktion der SF<sub>6</sub>-Zersetzungsprodukte mit Wasserstoff und Wasser entstehen Fluorwasserstoff und Schwefeldioxid, die in wässriger Lösung Flußsäure und Schwefelsäure und damit eine elektrolytische Schicht auf der Isolatoroberfläche bilden [Habermann 69]:



In der Schaltanlage befindliche Feuchte kann eine Wasserhaut auf den Isolierflächen und mit den Teilentladungszersetzungsprodukte des SF<sub>6</sub> zusammen eine elektrolytische Schicht bilden. Elektrolytische Schichten auf der Isolatoroberfläche bewirken dort eine Leitfähigkeitserhöhung und dadurch eine Feldverzerrung im Gasraum nahe der Isolatoroberfläche. Eine lokal erhöhte Feldstärke ermöglicht eine Ionisierung der Gasmoleküle und den Aufbau einer Elektronenlawine, so daß sich ein Überschlag in einer gekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten Schaltanlage aufgrund erhöhter Gasfeuchte durch die Messung von Teilentladungen prognostizieren und unter Umständen vermeiden läßt.

Im Gegensatz zu luftisolierten Anlagen, in denen zur Bildung elektrolytischer Schichten auf den Isolatoroberflächen eine Mindestgasfeuchte von  $w_{\text{rel}} \geq 25 \%$  erforderlich ist, reichen dafür in SF<sub>6</sub> bereits geringste Gasfeuchten von  $w_{\text{rel}} < 1 \%$  aus [Giesenbauer 76]. Die großen Wechselwirkungskräfte zwischen Zersetzungsprodukten und Isolatoroberfläche verhindern eine Selbstreinigung durch Diffusion oder Feldkräfte. Die ursprüngliche Festigkeit der Isolieranordnung kann nur durch Reinigung der Oberfläche wiederhergestellt werden.

### **3.8 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Überwachung der Gasfeuchte in Schaltanlagen**

Der Einfluß der Gasfeuchte in SF<sub>6</sub>-gekapselten Schaltanlagen auf das Überschlagverhalten und die Teilentladungseinsetzspannung bei Wechselspannung für unterschiedliche Epoxidharz-isolierteile war Gegenstand dieses Abschnittes. Dazu stand eine Mittelspannungsanlage zur Verfügung, die über einen eigens hergestellten Gaskreislauf mit SF<sub>6</sub>-Gas unterschiedlicher relativer Feuchte versorgt wurde.

#### **Ergebnisse der Voruntersuchungen:**

- Nach dem Befüllen von SF<sub>6</sub>-gekapselten Schaltanlagen mit trockenem SF<sub>6</sub>-Gas steigt die Taupunkttemperatur aufgrund von Desorption und Ausgasung aus den in der Anlage befindlichen Feststoffen an. Dieser Vorgang dauert einige Wochen. Er ist dann beendet, wenn der Wasserdampfpartialdruck in den Feststoffbauteilen dem Wasserdampfpartialdruck in dem SF<sub>6</sub>-Gas entspricht, wenn also ein Gleichgewichtszustand erreicht ist.
- Die Taupunkttemperatur in der Anlage schwankt in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Steigt die Umgebungstemperatur an, so erhöht sich auch die Taupunkttemperatur in der Anlage durch Desorptions- und Ausgasungsprozesse.
- Dringt durch Permeation oder Diffusion Wasserdampf in die Anlage ein, so erhöht sich die Taupunkttemperatur im Laufe der Zeit. Die durch Permeation in die Anlage eindringenden Feuchtemengen sind in dem Bereich gemäßiger Klimazone unbedenklich.
- Beim Betrieb unter feucht-tropischen Verhältnissen können so große Mengen Wasserdampf in gekapselte Schaltanlagen eindringen, daß für den sicheren Betrieb eine Trocknung des Isoliergases erforderlich wird.

#### **Ergebnisse der Messung der Teilentladungseinsetzspannung:**

- Teilentladungen setzen in der mit trockenem SF<sub>6</sub>-Gas befüllten Schaltanlage ab 1,7-facher Nennspannung im Bereich der Spannungzuführung ein.
- Teilentladungen in der mit feuchtem SF<sub>6</sub>-Gas befüllten Schaltanlage setzen unterhalb 1,0-fachen Nennspannung ein. Daher konnte zwischen dem Auftreten der Teilentladungen in der Spannungzuführung und den durch erhöhte Gasfeuchte verursachten Teilentladungen im Bereich der Sammelschiene unterschieden werden.
- Der durch erhöhte Gasfeuchte verursachte Teilentladungseinsatz in der Schaltanlage erfolgte bei Taupunkttemperaturen zwischen 17 und 18 °C ( $w_{\text{rel}} = 66 - 72 \%$ ).

### **Ergebnisse der Messung der Überschlagspannung:**

- Die Leitfähigkeitssteigerungen auf den Isolierstoffoberflächen in der Schaltanlage treten lokal auf und dehnen sich mit zunehmender relativer Gasfeuchte aus. Dadurch wird die Feldverteilung im Bereich der Grenzfläche zwischen Isolierstoff und Gas gestört. Die lokal erhöhte Feldstärke ermöglicht den Aufbau einer Elektronenlawine.
- Die Höhe der Überschlagspannung wird bei hoher relativer Gasfeuchte durch das Ausmaß der Feldstörungen an der Isolierstoffoberfläche bestimmt.
- Die niedrigste Taupunkttemperatur, bei der ein Überschlag unterhalb der 2,65-fachen Nennspannung stattfindet, beträgt  $19,7\text{ °C}$  ( $w_{\text{rel}} = 80\%$ ). Auch oberhalb von  $94\%$  relativer Gasfeuchte sinkt die Überschlagspannung nicht unter das 1,5-fache der Nennspannung.
- Ein Überschlag in einer gekapselten  $\text{SF}_6$ -gasisolierten Schaltanlage aufgrund erhöhter Gasfeuchte läßt sich durch die Messung von Teilentladungen prognostizieren und vermeiden.

## **4 Teilentladungsmessung zur Diagnose von Mittelspannungs-Schaltanlagen**

Um die größtmögliche Betriebssicherheit einer Schaltanlage gewährleisten zu können, werden Teilentladungs-(TE) messungen durchgeführt. Die Teilentladungsmessung ist das wichtigste Hilfsmittel bei der Diagnose des Isolations-Systems elektrischer Betriebsmittel. Störstellen wie z.B. freibewegliche Teilchen, Partikel auf Hochspannungs- oder Erdpotential, Teilchen auf Stützeroberflächen, potentialfreie Teile oder Teile mit schlechtem Kontakt können anhand der durch sie verursachten Teilentladungen erkannt werden, bevor es zum Durchschlag kommt. Teilentladungsmessungen werden direkt nach der Herstellung, nach dem Errichten der Anlage vor Ort und in zunehmendem Maße auch als Routineuntersuchung im Betrieb durchgeführt. Für die Überprüfung von Anlagenkomponenten nach der Herstellung im Werk wird üblicherweise die konventionelle TE-Messung nach IEC 270/VDE 434 in geschirmten Meßräumen durchgeführt. Zur Diagnose von Hochspannungs-Schaltanlagen unter vor Ort Bedingungen kommen aufgrund der Störanfälligkeit der konventionellen TE-Messung andere akustische, optische, chemische oder elektrische TE-Meßverfahren zum Einsatz [CIGRE 92, Feser 93]. Die unterschiedlichen Methoden haben je nach aufzufindender Fehlerart individuelle Vor- und Nachteile und sind nicht in der Lage, alle Fehlerarten zu erfassen. Derzeit wird die UHF-Methode zur Messung von Teilentladungen im Bereich der gasisolierten Hochspannungs-Schaltanlagen für die Überwachung im Betrieb eingeführt, um damit frühzeitig Veränderungen im Isolationssystem zu erkennen und durch rechtzeitige Reparaturmaßnahmen Störungen zu verhindern [z.B. Hampton 85, Yuen 91, Gerer 94, Masaki 94, Achatz 96, Kurrer 96-2].

### **4.1 Teilentladungsmeßverfahren**

#### **4.1.1 Konventionelle Teilentladungsmessung**

Der zeitliche Verlauf und das Impulsmuster der TE-Impulse in einer Mittelspannungs-Schaltanlage können sehr unterschiedlich sein, da sie sehr stark von der Art des Dielektrikums, von der äußeren Beschaltung des Meßkreises und den Eigenschaften des Prüflings abhängen [Baumgartner 92]. Anders als die Impulsform ist der Ladungsinhalt von der Beschaltung des Prüflings unabhängig. Deshalb werden TE-Impulse durch ihren Ladungsinhalt charakterisiert. Im Falle innerer Teilentladungen wird zwischen der wahren Ladung  $Q$  und der an den äußeren Klemmen des Prüflings meßbaren scheinbaren Ladung  $Q_s$  unterschieden wird. Aus dem an den äußeren Prüflingsklemmen meßbaren TE-Impulsstrom  $i_s(t)$  läßt sich nach folgender Gleichung die scheinbare Ladung bestimmen:

$$I_s(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} i_s(t) e^{j\omega t} dt \quad (4.1)$$

$$I_s(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} i_s(t) dt = Q_s \quad (4.2)$$

mit  $Q_s$  : scheinbare Ladung des TE-Impulses,  
 $i_s(t)$  : scheinbarer TE-Impulsstrom.

Wird eine Fourier-Transformation unter Berücksichtigung des Integrations- und Endwertsatzes bei obiger Gleichung durchgeführt, so ergibt sich:

$$Q_s \circ \bullet I_s(s \rightarrow 0) \quad (4.3)$$

mit  $s$  : komplexe Frequenz,  
 $I_s(s \rightarrow 0)$  : Gleichstromglied der Fourier-Transformierten.

Folglich ist der Gleichanteil des Impulsfrequenzspektrums proportional zur scheinbaren Ladung und könnte theoretisch zur Ladungsbestimmung verwendet werden. Da jedoch die dominanten Spektralanteile der 50-Hz-Hochspannung und die eventuell auftretenden Oberwellen durch Ankopplungsvierpole mit Hochpaßcharakter unterdrückt werden müssen, kann die Teilentladungsmessung nicht mit Hilfe des Gleichanteils durchgeführt werden.

TE-Impulsströme weisen ein Amplitudenspektrum mit nahezu konstanten Werten bis in den MHz-Bereich auf. Die Ladungsbestimmung kann daher an Stelle des Gleichstromgliedes durch die Messung höherfrequenter Spektralanteile erfolgen. Über ein Bandpaßsystem werden die Impulsströme ausgekoppelt, anschließend verstärkt und angezeigt. Dies entspricht einer Quasi-Integration der TE-Stromimpulse. Die Amplitude der Systemantwort der TE-Meßeinheit ist proportional zur scheinbaren Ladung der TE-Impulse.

Konventionelle TE-Meßsysteme werden abhängig von ihrer Filtercharakteristik in breitbandige und schmalbandige Systeme unterteilt. Ziel der breitbandigen Messung ist es, durch die Wahl einer möglichst niedrigen unteren und einer oberen Grenzfrequenz im Bereich der Grenzfrequenz der TE-Impulse einen möglichst großen Teil der spektralen Leistungsdichte der TE-Impulse zu erfassen. Mit zunehmender Bandbreite werden die Teilentladungsimpulse in ihrer Form und Amplitude weniger verfälscht und es wird eine Bestimmung der Polarität des TE-Impulses und eine exakte Erfassung einzelner, schnell aufeinanderfolgender Impulse möglich, so daß mit Hilfe dieser Informationen eine Fehlerortung durchgeführt werden kann. Der Nachteil der breitbandigen TE-Messung liegt in ihrer Störempfindlichkeit. Unter vor Ort Bedingungen werden auch Störsignale erfaßt, die sehr viel stärker als die TE-Impulse sein können.

Bei schmalbandigen TE-Meßsystemen werden TE-Impulsströme üblicherweise mit Störspannungsmeßgeräten detektiert. Es werden Filtersysteme mit einer Bandbreite von einigen kHz eingesetzt. Durch Verwendung eines stufenlos durchstimmbaren Bandpasses können störungsfreie Frequenzbänder gefunden werden, so daß die Messung der TE-Impulsströme nicht durch äußere Störer beeinträchtigt wird. Ein großer Nachteil schmalbandiger Filter sind ihre langen An- und Ausschwingzeiten. Die Folgen davon sind eine schlechte Auflösung zeitlich sehr schnell aufeinanderfolgender Impulse und ein Verlust an Information über die TE-Impulsform und die Impulspolarität.

Eine wirksame Methode zur Störunterdrückung bei der Teilentladungsmessung ist der Einsatz eines abgeglichenen Prüfkreises [VDE 434]. Der Prüfling und die Koppelkapazität werden über je einen Ankopplungsvierpol geerdet. An Stelle einstellbarer Ankopplungsvierpole kann auch eine Scheringbrücke eingesetzt werden (differential discharge bridge) [Praehauser 72, Kuffel 84, Osvath 85]. Durch diese Schaltung lassen sich äußere Störer gut unterdrücken. Voraussetzung für einen frequenzunabhängigen Abgleich der Schaltung ist eine Koppelkapazität, die den gleichen Verlustfaktor und die gleiche Frequenzabhängigkeit wie das Prüfobjekt besitzt. Ideal ist also die Verwendung eines TE-freien Prüfobjektes als Koppelkapazität.

Vor Ort wird die TE-Messung mit elektrischen Meßverfahren durch verschiedene Störquellen stark erschwert, die in vier Kategorien eingeteilt werden :

- Periodische Störsignale, wie z.B. die betriebsfrequente Wechselspannung mit ihren harmonischen Oberwellen oder die trägerfrequenten Rundfunksignale.
- Impulsartige netzsynchrone Störsignale, die z.B. durch Phasenanschnittsteuerungen, Gleich- und Umrichterschaltungen verursacht werden.
- Impulsförmige stochastisch verteilte Störsignale, die z.B. durch Entladungen an scharfen Kanten oder Spitzen der Schirmelektroden und Verbindungsleitungen (Korona) und durch Schalthandlungen in Nieder- und Hochspannungsnetzen hervorgerufen werden.
- Eigenrauschen der Verstärker, das zu einer Erhöhung des Grundstörpegels führt.

#### 4.1.2 Akustische, optische und chemische Teilentladungsmeßverfahren

Die akustische TE-Messung eignet sich besonders zum Auffinden von hüpfenden Partikeln in gasisolierter Schaltanlagen [Albiez 91, Schlemper 95]. Um die akustischen Signale der aufprallenden freibeweglichen Teilchen und der Teilentladung aufnehmen zu können, werden an der Außenseite der Kapselung Körperschallaufnehmer oder Beschleunigungsaufnehmer angebracht [König 73-1, Ambrosch 82, Lundgaard 90]. Der Nachteil dieser Methode ist die starke Beeinflussung der Meßempfindlichkeit durch Störgeräusche und die große Anzahl der benötigten Aufnehmer, um die gesamte Schaltanlage zu überwachen. Deshalb wird die akustische TE-Messung vorzugsweise bei Abnahmeprüfungen eingesetzt.

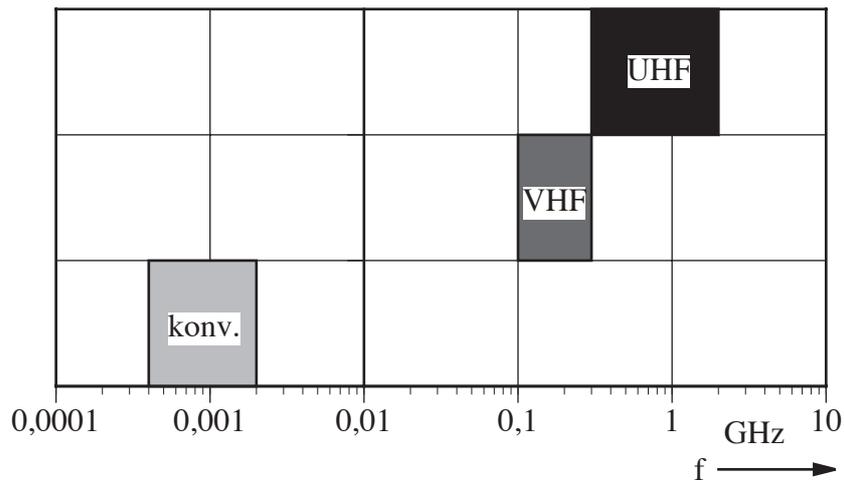
Optische TE-Messungen bieten den Vorteil der hohen Empfindlichkeit und werden nicht durch Reflexionsvorgänge oder Überlagerungen innerhalb des Systems oder durch Störungen von außen beeinflusst. Das von elektrischen Entladungen und Lichtbögen ausgehende Licht besitzt Wellenlängen zwischen 200 und 800 nm (sichtbares Licht : 380 bis 780 nm). Teilentladungen haben hohe Spektralanteile im UV-Bereich und Funken oder Lichtbögen hohe Spektralanteile im IR-Bereich. Für die TE-Messung mit dieser Meßmethode sind für eine räumlich ausgedehnte Messung viele Photosensoren (Photodioden oder Photomultiplier) in einer Anlage erforderlich, da das UV-Licht vom SF<sub>6</sub>-Gas so stark absorbiert wird, daß Teilentladungen ≤ 5 pC nur bis zu einer Entfernung von 0,5 m registriert werden können [Binns 90, Meiß 94].

Teilentladungen führen auch zur Bildung spezifischer Zersetzungsprodukte in SF<sub>6</sub> und Luft. Reines SF<sub>6</sub> unterscheidet sich von mit Zersetzungsprodukten verunreinigtem SF<sub>6</sub> dadurch, daß es saure, oxidierende und hydrolysierbare Bestandteile aufweist. Die Veränderung der Zusammensetzung kann mit Hilfe von in die Schaltanlage eingebauten Gas-Prüfröhrchen für HF, SO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> und SOF<sub>2</sub> oder durch gaschromatographische Analysen im Labor chemisch bestimmt werden [Bargigia 92, Patrunky 93]. Ein neues sehr empfindliches Überwachungsverfahren, das sich zum Nachweis von Zersetzungsprodukten in SF<sub>6</sub> und Luft bei vor Ort Messungen eignet, ist die Ionenbeweglichkeits-Spektrometrie (ion mobility spectrometry) [Baumbach 95, Soppart 95/97, Held 97]. Im Falle von SF<sub>6</sub>-Zersetzungsprodukten lassen sich Spuren von Verunreinigungen ab 1 ppm<sub>v</sub> zuverlässig nachweisen. Bezogen auf das Gesamtvolumen einer Schaltanlage dauert es aber immer noch einen Tag, bis sich eine durch eine TE-Quelle initiierte Gaszersetzung nachweisen läßt.

Bei luftisolierten Schaltanlagen wird der Nachweis von Stickoxiden NO<sub>x</sub> und Ozon O<sub>3</sub> zur TE-Überwachung vorgeschlagen [Drescher 93, Beierl 95]. NO<sub>x</sub> wird aber durch Teilentladungen nur in sehr geringen Mengen gebildet. Die Messung von NO<sub>x</sub> zum Nachweis von TE ist deshalb zu unempfindlich. Die Bildung von Ozon nimmt mit steigender relativer Luftfeuchte stark ab [Peier 87]. Die Ozonwerte sind also am geringsten, wenn durch Betauung an Isolierstoffoberflächen TE auftreten und ein Überschlag in der Schaltanlage eingeleitet wird. Beide Meßverfahren sind daher zur Überwachung luftisolierter Schaltanlagen nicht empfehlenswert.

### 4.1.3 TE-Messung mit Sonden im VHF und UHF-Bereich

Ein Nachteil der klassischen elektrischen Teilentladungsmeßverfahren besteht darin, daß zur Erfassung der TE-Signale ein hochspannungsfester Koppelkondensator benötigt wird. Obwohl durch die Verwendung von Brückenschaltungen oder Diskriminatorschaltungen eine Ausblendung von Störsignalen möglich ist, konnte sich die TE-Messung zur Überwachung unter Betriebsbedingungen bisher noch nicht durchsetzen. Die Installation eines Koppelkondensators erfordert, falls dieser nicht fest eingebaut ist, ein Freischalten der Schaltanlage.



**Bild 4.1:** Elektrische TE-Meßverfahren und benutzte Frequenzbereiche

TE-Signale besitzen jedoch ein sehr breites Frequenzspektrum, so daß ihr Strahlungsfeld mit Antennen und Sensoren empfangen werden kann. Zur Störunterdrückung bieten sich die breitbandige Messung im VHF- oder die Messung im UHF-Bereich an, da in diesem Frequenzbereich weniger Störer vorhanden sind. Allgemein wird zur Unterscheidung der Meßmethoden die Einteilung nach **Bild 4.1** vorgenommen. Dabei ist die Grenze zwischen VHF- und UHF-Methode so gesetzt, daß Messungen mit der VHF-Methode bis zur untersten Grenzfrequenz eines höheren Wellenmodes als der TEM-Welle ausgeführt werden können. Mittelspannungsschaltanlagen sind in ihren geometrischen Abmessungen kleiner als Hochspannungsschaltanlagen. Deshalb kann die Frequenzgrenze für VHF-Messungen entsprechend weiter zu höheren Frequenzen verschoben werden. Die Richtungscharakteristik von Meßsonden läßt sich gut zur Ortung der Teilentladungen benutzen. Die erste Teilentladungssonde, die im VHF-Bereich arbeitet, ist die 1987 vorgestellte Lemke-Sonde [Lemke 87].

Teilentladungen in gasisolierten Hochspannungs-Schaltanlagen erregen elektromagnetische Wellen im Grundmodus (TEM) und in höheren Wellenmoden (TE, TM) [Pearson 91]. Bei der UHF-Methode werden diese TE-Signale mit Sensoren direkt in der Anlage empfangen. Sensoren dafür sind üblicherweise kapazitive Feldsonden [Hampton 85, Albiez 89], aber auch verschiedene Antennentypen wurden erfolgreich erprobt [Kimura 93/96, Wanninger 95-1/95-2]. Mit einem Oszilloskop oder einem Transientenrekorder mit sehr hoher Bandbreite von einigen GHz können die TE-Signale im Zeitbereich gemessen werden. Diese Möglichkeit wird deshalb als Breitband-UHF-Methode bezeichnet.

Die Messung von Teilentladungen mit Hilfe eines Spektrumanalysator wird Schmalband-UHF-Methode genannt, weil Spektrumanalysatoren die Spektralanteile des Frequenzspektrums der TE-Signale mit einer Auflösungsbandbreite zwischen 3 Hz und 3 MHz messen. Die UHF-Methode wurde anfangs überwiegend experimentell untersucht [Lightle 89, Yuen 91, Petit 93]. Umfangreiche theoretischen und praktischen Untersuchungen zur TE-Messung in SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen wurden dann von Kurrer und Judd durchgeführt [Kurrer 94/95/96, Judd 95/96].

## **4.2 Ziel der Untersuchungen zur Teilentladungsmessung**

Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten von Schaltanlagen wurden bisher überwiegend an gasisolierten Hochspannungs-Schaltanlagen durchgeführt. Für diese Anlagen ist es gelungen, eine Theorie und ein detailliertes Modell für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und deren Auskopplung zu entwickeln. Es wurden Labor- und vor Ort Messungen durchgeführt, die die theoretischen Ergebnisse bestätigen. Auf dieser Grundlage wurden Systeme zur On-line-TE-Überwachung realisiert.

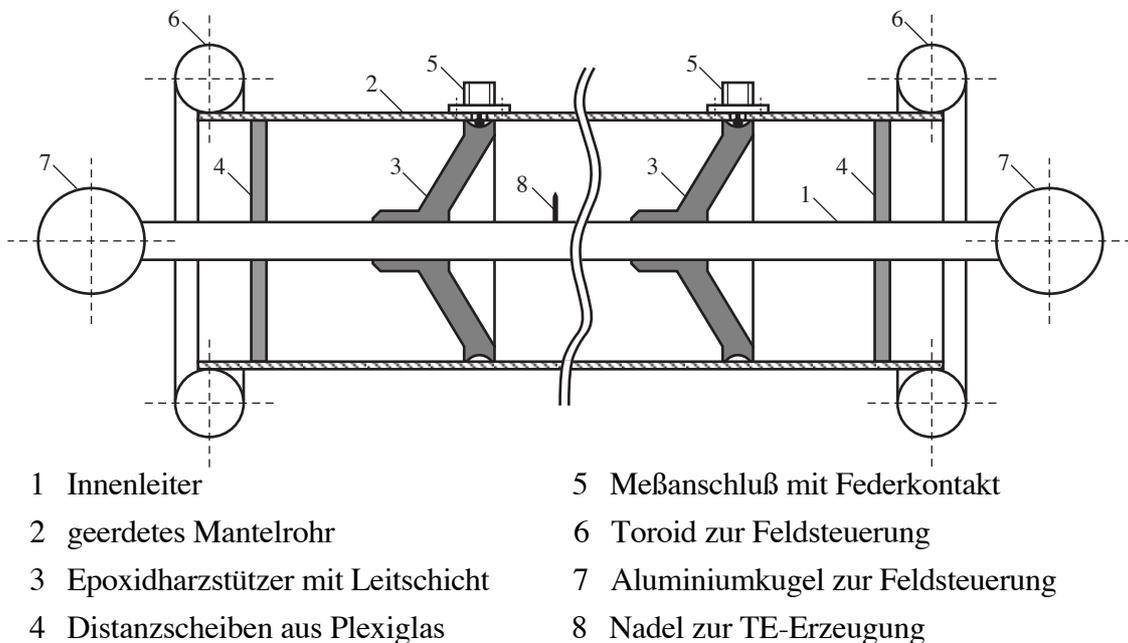
Die Ergebnisse der Untersuchungen an gasisolierten Hochspannungs-Schaltanlagen lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse in Mittelspannungs-Schaltanlagen übertragen, da sich die Schaltanlagen für die beiden Spannungsbereiche durch ihre konstruktiven Ausführungen wesentlich unterscheiden.

Sammelschienen für gasisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen sind entweder als koaxiale einphasige oder dreiphasig gekapselte Anordnungen mit runden Leitern ausgeführt. Als Leistungsschalter kommen ausschließlich SF<sub>6</sub>-Blaskolbenschalter zum Einsatz. Die Ausführungsvarianten von Mittelspannungs-Schaltanlagen sind dagegen sehr vielfältig (siehe Kap. 1.2). Deshalb ist es erforderlich, angepaßte Lösungen für die Teilentladungs-Überwachung zur technischen Diagnose verschiedener Mittelspannungs-Schaltanlagen zu entwickeln.

### 4.3 Konventionelle Teilentladungsmessung an gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen

#### 4.3.1 Modellrohranordnung als Nachbildung eines koaxialen Leitersystems

Die koaxiale Modellrohranordnung, die für Vorversuche benutzt wurde, ist in **Bild 4.2** dargestellt. Sie besteht aus einem Mantelrohr mit einem Durchmesser von 200 mm, einem zylindrischen Innenleiter mit einem Durchmesser von 60 mm, zwei Plexiglasscheiben zur Fixierung des Innenleiters im Mantelrohr und zwei trichterförmigen rotationssymmetrischen Epoxidharzstützern. Die Stützer besitzen an der Außenseite eine Auskehlung mit einer umlaufenden Leitschicht aus Silberlack, so daß ein kapazitiver Teiler mit einer Hochspannungskapazität  $C_1$  zwischen Innenleiter und Leitschicht und einer Niederspannungskapazität  $C_2$  zwischen Leitschicht und Mantelrohr entsteht. Die Kontaktzuführung von der Leitschicht des Stützers zum Ankopplungsvierpol erfolgt mittels einer isolierten Durchführung durch das Mantelrohr. Die leitende Verbindung des Meßanschlusses zur Leitschicht wird über eine modifizierte UHF-Anschlußbuchse hergestellt, in der bei Anschluß eines Steckers ein federnder Kontakt auf die Leitschicht des Stützers gedrückt wird. Der Abstand der Anschlußbuchsen und damit der Stützerleitschichten beträgt 500 mm. Zur Vermeidung von Teilentladungen an den Enden der Modellrohranordnung wurden auf die Enden des Innenleiters Aluminiumkugeln aufgesteckt und um die Stirnseiten des Mantelrohrs Toroide aus flexiblem Aluminiumrohr montiert.



**Bild 4.2:** Koaxiale Modellrohranordnung

Durch Verschieben des Innenleiters gegen das Mantelrohr bzw. Anbringen einer Nadel in verschiedene Nadelhalter läßt sich der Abstand der Nadel zu einem Stützer beliebig variieren. Dazu sind in den Innenleiter in äquidistanten Abständen von 200 mm Nadelhalter eingeschraubt. Zur Erzeugung definierter Teilentladungen wird eine 15 mm lange Wolframnadel mit einem Spitzenradius von 2 µm verwendet.

Unter Annahme eines rotationssymmetrischen zylindrischen Feldes berechnet sich die Hochspannungskapazität  $C_1$  zu

$$C_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot b_1}{\ln\left(\frac{r_{st}}{r_i}\right)}, \quad (4.4)$$

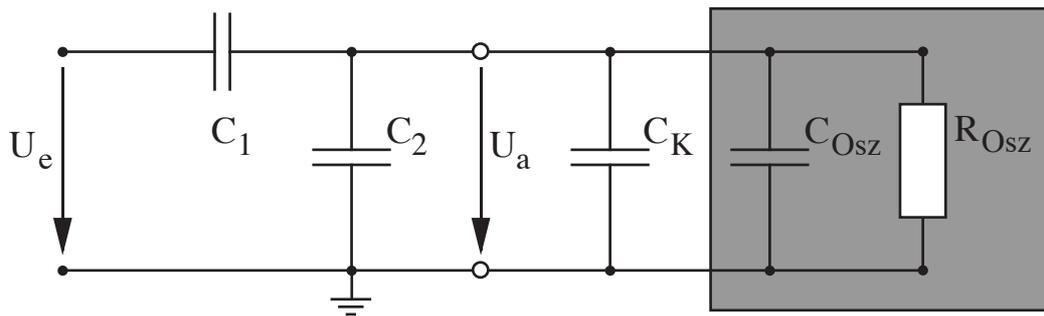
bzw. die Niederspannungskapazität zu

$$C_2 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot b_1}{\ln\left(\frac{r_m}{r_{st}}\right)}, \quad (4.5)$$

- mit  $\varepsilon_0$ : absolute Dielektrizitätszahl ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m),  
 $\varepsilon_r$ : relative Dielektrizitätszahl des Stützermaterials (EP-Harz:  $\varepsilon_r = 3,3$ ),  
 $b_1$ : Breite der Leitschicht,  
 $r_m$ : Mantelrohrradius,  
 $r_{st}$ : mittlerer Außenradius des Stützers,  
 $r_i$ : Innenleiterradius.

Der Wert für die Hochspannungskapazität  $C_1$  beträgt 2,35 pF, für die Niederspannungskapazität  $C_2$  107 pF.

Zur Messung der Teilkapazitäten der Stützer im eingebauten Zustand wird zunächst die größere Niederspannungskapazität  $C_2$  gemessen. Die anschließende Bestimmung der Hochspannungskapazität  $C_1$  erfolgt durch die Bestimmung des Teilverhältnisses unter Verwendung eines Frequenzgenerators, dessen Signal überspannungsseitig eingespeist wird. Die hochfrequente Messung ist notwendig, da der kapazitive Teiler durch den Eingangswiderstand des zur Messung verwendeten Oszilloskopes belastet wird und damit systemtechnisch wieder ein Hochpaß 1.Ordnung entsteht, dessen Grenzfrequenz für hinreichend genaue Meßergebnisse weit unterhalb der Meßfrequenz liegen muß. Weiterhin sind die Eingangskapazität des Oszilloskops  $C_{osz}$  sowie die Kapazität der Zuleitung  $C_K$  für die Bestimmung von  $C_1$  zu berücksichtigen (**Bild 4.3**).



- $C_1$  Hochspannungskapazität
- $C_2$  Niederspannungskapazität
- $C_K$  Kabelkapazität der Zuleitung
- $C_{Osz}$  Eingangskapazität des Oszilloskops
- $R_{Osz}$  Eingangswiderstand des Oszilloskops

**Bild 4.3:** Ersatzschaltbild zur Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses des kapazitiven Teilers

Für das kapazitive Teilverhältnis gilt:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_K + C_{Osz}}, \quad (4.6)$$

so daß nach Messung der Ein- und Ausgangsspannungen  $U_e$  und  $U_a$  bei verschiedenen Frequenzen die Hochspannungskapazität bestimmt werden kann.

Eine Übersicht der rechnerisch ermittelten und gemessenen Werte der Teilkapazitäten in der Modellrohranordnung gibt **Tabelle 4.1**.

berechnete Werte		gemessene Werte	
$C_1$ [pF]	$C_2$ [pF]	$C_1$ [pF]	$C_2$ [pF]
2,35	107	0,91	103

**Tabelle 4.1:** Werte der rechnerisch und meßtechnisch ermittelten Teilkapazitäten der Stützer in der Modellrohranordnung

Die Vereinfachung einer koaxialen Leiteranordnung mit einem Trichterstützer zu einer Anordnung mit einem Scheibenförmigen Stützer zur Berechnung der Hochspannungskapazität ist nicht zulässig, da es sich nicht um eine ideale koaxiale Kondensatoranordnung handelt. Die exakte Berechnung dieses Wertes ist mit Hilfe einer Feldberechnung möglich. Die Messung der Kapazität ist aber weniger aufwendig.

### 4.3.2 SF<sub>6</sub>-gasisolierte Schaltanlage

**Bild 4.4** zeigt die zur Teilentladungsmessung verwendete Schaltanlage. Die Schaltanlage hat eine Länge von 1925 mm und ein Volumen von 120 l. Der Anschluß der Hochspannung an die Sammelschiene erfolgt über einen Zwischengasraum, in dem sich SF<sub>6</sub>-Gas unter einem Druck von 2,5 bar befindet. Mit einem Dreistellungsschalter kann die Sammelschiene von der Hochspannung getrennt und geerdet werden. Die Kupfersammelschiene befindet sich mittig angeordnet im Gasraum und wird von drei Sammelschienenhaltern und drei Sammelschienenstützern fixiert. Zwei der drei Stützer sind als kapazitiven Sensorstützer ausgeführt. Die in Kapitel 4.3.4 näher beschriebenen Deckelsonden sind ebenfalls in die Anlage integriert. Der Abstand zwischen den Sensorstützern und den Deckelsonden beträgt jeweils 600 mm. Die Anlage kann über einen geschlossenen Gaskreislauf mit SF<sub>6</sub> befüllt werden. Der Druck des Isoliergases im Sammelschienenraum beträgt 1,3 bar. Ein Manometer ermöglicht die Kontrolle des Isoliergasdrucks.

Das Schema des Versuchsaufbaus zur Teilentladungsmessung an der gasisolierten Schaltanlage ist in **Bild 4.5** dargestellt. Die TE-Impulse werden über die Stützer mit integriertem Meßsensor oder über die Deckelsonden ausgekoppelt. An die Teiler sind identische Ankopplungsvierpole angeschlossen, die über Koaxialkabel mit dem Differenzverstärker verbunden sind. Zum Vergleich erfolgt zusätzlich eine Erfassung der Teilentladungsimpulse durch eine konventionellen Parallelauskopplung. Über einen Koppelkondensator mit Ankopplungsvierpol wird das Signal von einem schmalbandigen Teilentladungsmeßgerät gemessen. Die Ergebnisse der beiden Meßmethoden werden mit einem Oszilloskop dargestellt.

Bei der digitalen Aufzeichnung der Meßergebnisse muß das Shannon-Theorem eingehalten werden. Dafür muß die Abtastfrequenz  $f_t$  mindestens doppelt so groß sein, wie die höchste zu erwartende Frequenz  $f_{\max}$  des Meßsignals:

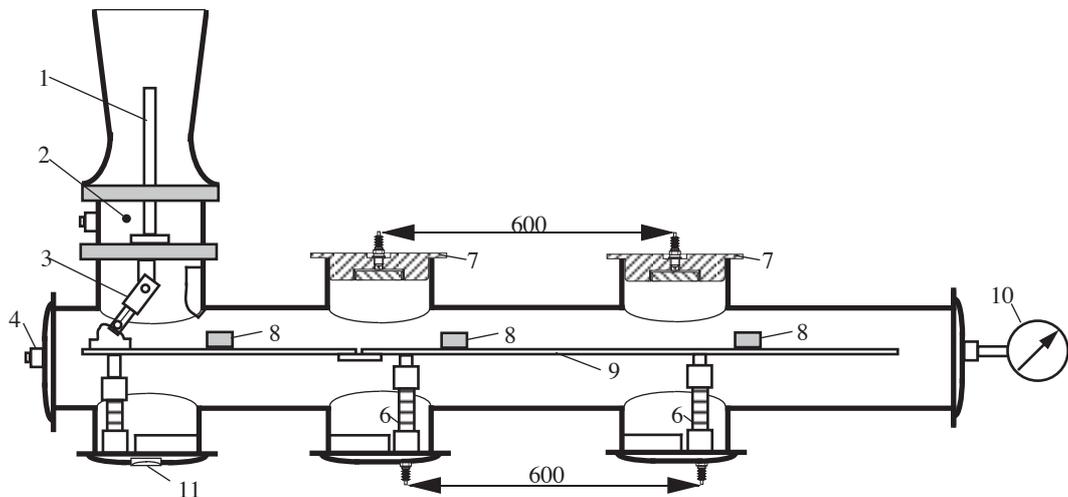
$$f_t \geq 2 \cdot f_{\max}. \quad (4.7)$$

Zur Unterdrückung hochfrequenter Anteile im Ausgangssignal dient ein Anti-Aliasing-Filter mit einer oberen Grenzfrequenz von 9,6 MHz. Für die digitale Aufzeichnung der TE-Signale wird ein 4-Kanal-Transientenrecorder verwendet. Die Abtastfrequenz beträgt  $f_t = 20$  MHz bei einer Auflösung von 8 bit und einer Speichertiefe von maximal 512 kByte. Daraus folgt eine maximal Aufnahmedauer  $t_{\max}$  von

$$t_{\max} = \frac{524288}{20 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 26,2144 \text{ ms}, \quad (4.8)$$

so daß etwas mehr als eine Netzperiode aufgezeichnet werden kann. Durch externe Triggerung ist es möglich, die Zuordnung der auftretenden Teilentladungen zur angelegten Hochspannung zu erhalten. Die Steuerung der Meßwertaufnahme erfolgt durch einen an den Transientenrecorder angeschlossenen Arbeitsplatzrechners mit einer am Schering-Institut entwickelte Steuerungssoftware, mit der die Meßdaten ausgelesen, gespeichert und weiterverarbeitet werden.

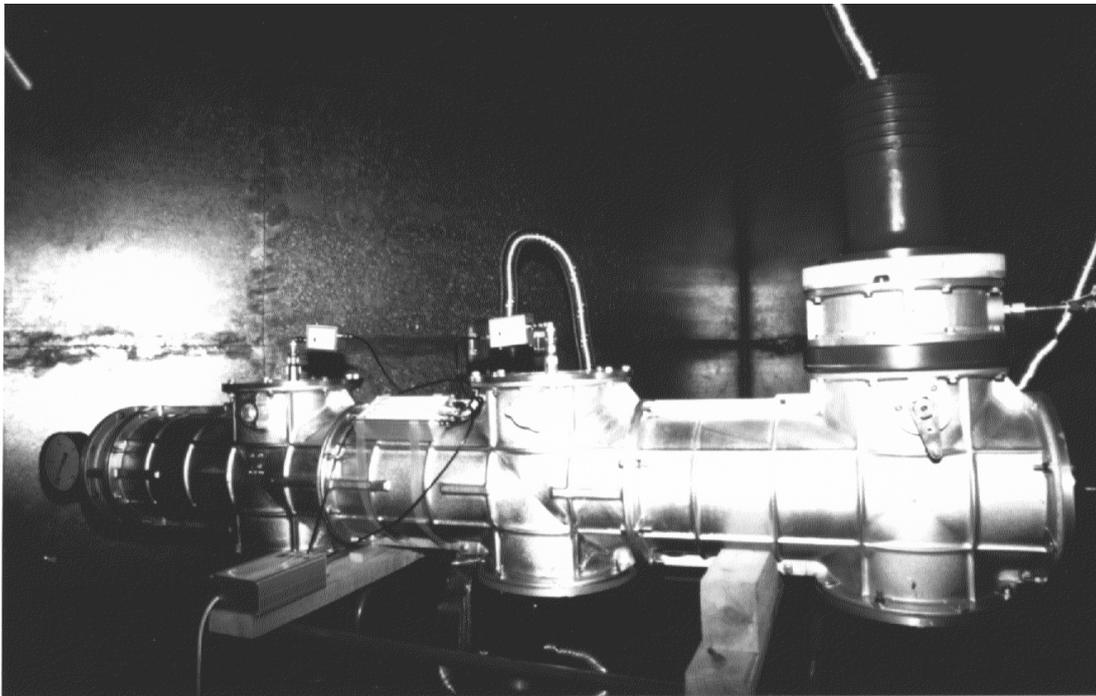
a)



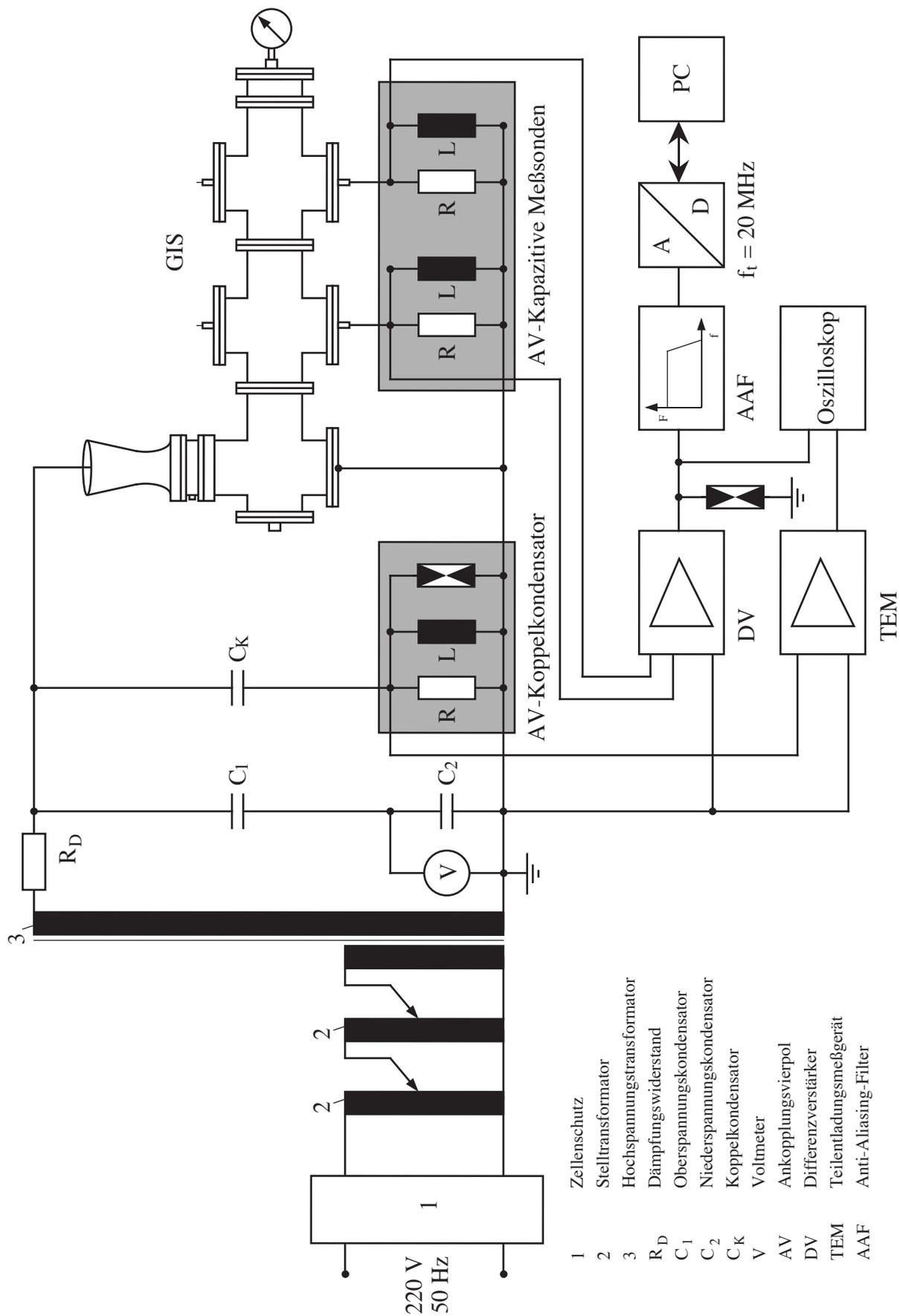
- 1 Hochspannungszuführung
- 2 Zwischengasraum mit Gasanschluß
- 3 Dreistellungsschalter
- 4 Gasanschluß
- 5 Sammelschienenstützer
- 6 Stützer mit integrierter Meßsonde

- 7 Deckelsonde
- 8 Sammelschienenträger
- 9 Sammelschiene
- 10 Manometer
- 11 Berstscheibe

b)



**Bild 4.4:** SF<sub>6</sub>-isolierte Mittelspannungsschaltanlage  
a) Schematische Darstellung  
b) Foto der Schaltanlage mit angeschlossenen Ankopplungsvierpolen und nachgeschaltetem Verstärker



**Bild 4.5:** Versuchsaufbau zur Teilentladungsmessung an einer SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungsschaltanlage

- 1 Zellschutz
- 2 Stelltransformator
- 3 Hochspannungstransformator
- $R_D$  Dämpfungswiderstand
- $C_1$  Oberspannungskondensator
- $C_2$  Niederspannungskondensator
- $C_k$  Koppelkondensator
- V Voltmeter
- AV Ankopplungsvierpol
- DV Differenzverstärker
- TEM Teilentladungsmeßgerät
- AAF Anti-Aliasing-Filter

### 4.3.3 Kapazitive Sonde in Form eines Sensor-Stützers

Eine elegante Methode der Teilentladungsauskopplung ist die Modifikation bereits vorhandener Bauteile einer gasisolierten Mittelspannungs-Schaltanlage. Im Fall einer einpolig gekapselten Schaltanlage mit einer Kupferschiene als Leiter bieten sich dafür die Sammelschienenstützer an. Diese Stützer sind aus gefülltem Epoxidharz gefertigt und in äquidistanten Abständen als isolierende Abstandshalter zwischen Sammelschiene und Druckgußgehäuse innerhalb der Schaltanlage montiert. Durch das Einbringen einer isoliert angeordneten metallischen Meßfläche innerhalb des Stützers zwischen Sammelschiene und geerdetem Gehäuse ergibt sich ein kapazitiver Teiler.

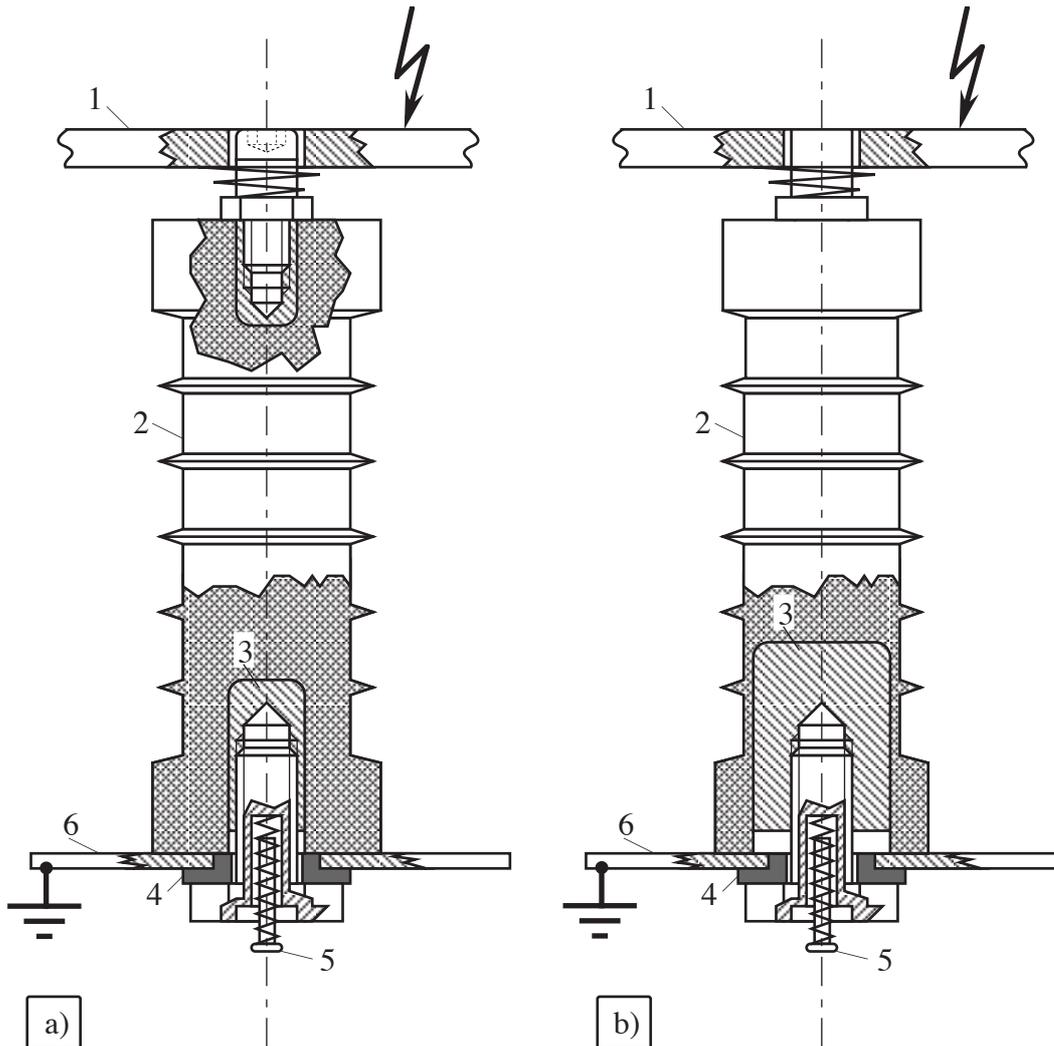
Zunächst wurde der Original-Stützer gegen das Gehäuse isoliert und seine untere metallische Einschraubbuchse als Sensor verwendet. Das vom Sensor gemessene Signal wurde über eine gasdichte Durchführung im Deckel zum Teilentladungsmeßgerät weitergeleitet (**Bild 4.6a**).

Dieser Aufbau führte jedoch mit dem verwendeten Meßsystem (Ankopplungsvierpol, Verstärker, Oszilloskop) zu keinen verwertbaren Ergebnissen, da die Sensorfläche ( $A_s = 2,4 \text{ cm}^2$ ) zu klein und das Meßsignal zu gering war, um einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand zu erhalten. Daher wurde ein modifizierter Stützer angefertigt, bei dem die Meßfläche auf den maximal möglichen Wert von  $19,6 \text{ cm}^2$  vergrößert wurde. Da Epoxidharz schlecht bearbeitet werden kann, wurde der Stützer aus Polyamid (PA) angefertigt (**Bild 4.6b**).

Unter Vernachlässigung äußerer Randeffekte berechnet sich die Hochspannungskapazität  $C_1$  zu

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A_s}{d}, \quad (4.9)$$

mit  $\epsilon_0$ : absolute Dielektrizitätszahl,  
 $\epsilon_r$ : relative Dielektrizitätszahl des Stützermaterials (EP-Harz:  $\epsilon_r = 3,3$ , PA:  $\epsilon_r = 3,7$ ),  
 $A_s$ : Sondenfläche,  
d: Abstand der Sondenflächen.



- |  |  |
|--|--|
| 1 Sammelschiene  | 4 Polyamidscheibe                            |
| 2 Stützerkorpus aus Epoxidharz (a),<br>bzw. Polyamid (b) | 5 federnder Kontakt zur gasdichten Zuführung |
| 3 Sondenfläche   | 6 geerdete Fußplatte                         |

**Bild 4.6:** Kapazitiver Stützersensor zur Teilentladungsauskopplung

a) Originalstützer

b) modifizierter Stützer mit vergrößerter Sondenfläche

Die Niederspannungskapazität, die sich aus der Streukapazität der Sonde gegen Erde und der Kapazität der gasdichten Durchführung zusammensetzt, läßt sich wegen der komplizierten geometrischen Anordnung nur meßtechnisch bestimmen. In **Tabelle 4.2** sind die errechneten und tatsächlich gemessenen Werte der Stützerkapazitäten aufgeführt.

	berechnete Werte	gemessene Werte	
	C <sub>1</sub> [pF]	C <sub>1</sub> [pF]	C <sub>2</sub> [pF]
Originalstützer	0,120	0,712	39
modifizierter Stützer	0,804	0,653	51

**Tabelle 4.2:** Werte der rechnerisch und meßtechnisch ermittelten Teilkapazitäten der verwendeten Stützer

#### 4.3.4 Kapazitive Sonde in Form eines Deckels

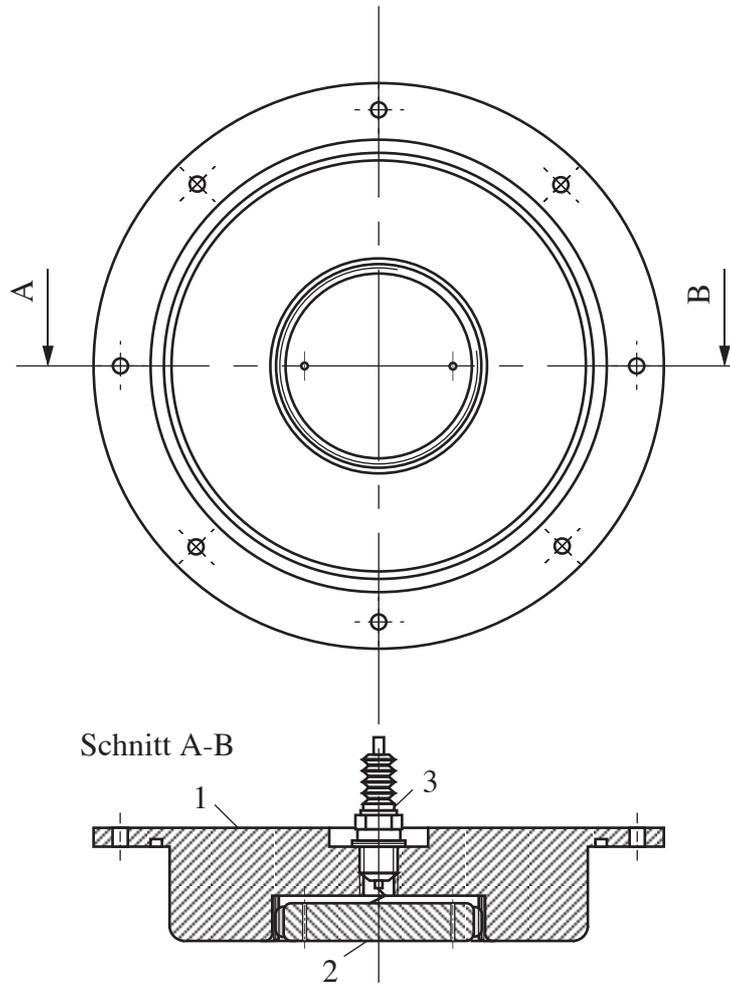
Als weitere Sensorvariante kam ein Plattenkondensator zur Anwendung, der in einen Deckel-  
flansch integriert ist (**Bild 4.7**). Die Meßfläche des Sensors beträgt 78,5 cm<sup>2</sup>. Der Sensor  
besaß einen radialen Gewinding aus Polyamid. In den Deckel wurde zur Aufnahme des  
Sensors eine Gewindehülse aus Polyamid eingepreßt. Über den veränderbaren Abstand  
zwischen der geerdeten Deckelplatte und dem Sensor läßt sich die Niederspannungskapazität  
und damit das kapazitive Übersetzungsverhältnis einstellen. Ein Federkontakt verbindet den  
Sensor mit der gasdichten Durchführung im Deckel.

Die Hochspannungskapazität C<sub>1</sub> berechnet sich zu [Küchler 85]:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot r_s \cdot \arcsin\left(\frac{r_s}{r_a}\right)}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}, \quad (4.10)$$

mit  $\epsilon_0$ : absolute Dielektrizitätszahl,  
 $r_s$ : Sondenradius,  
 $r_a$ : Radius des Gehäuses,  
 $r_i$ : Sammelschienenradius.

Die Hochspannungskapazität berechnet sich zu C<sub>1</sub> = 0,27 pF.



- 1 Deckelflansch
- 2 Meßfläche
- 3 Gasdichte Durchführung mit Federkontakt

**Bild 4.7:** Kapazitive Sonde im Deckel

Die Niederspannungskapazität setzt sich aus einem konstanten radialen Kapazitätsanteil zwischen der Sensorkante und dem Deckel und einem variablen axialen Kapazitätsanteil zwischen der dem Deckel zugewandten Sensorfläche und dem Deckel zusammen:

$$C_2 = C_{\text{radial}} + C_{\text{axial}}, \quad (4.11)$$

mit  $C_{\text{radial}}$ : radialer Kapazitätsanteil,  
 $C_{\text{axial}}$ : axialer Kapazitätsanteil.

Die konstante Radialkapazität errechnet sich zu

$$C_{\text{radial}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot h_s}{\ln\left(\frac{r_d}{r_s}\right)}, \quad (4.12)$$

- mit  $\epsilon_0$ : absolute Dielektrizitätszahl,  
 $\epsilon_r$ : relative Dielektrizitätszahl von Polyamid ( $\epsilon_r = 3,7$ )  
 $h_s$ : Sondenhöhe,  
 $r_d$ : Radius der Deckelaussparung,  
 $r_s$ : Sondenradius.

Für die Radialkapazität ergibt sich damit ein theoretischer Wert von  $C_{\text{radial}} = 18 \text{ pF}$ . Die Größe der axialen Kapazität ist abhängig vom variablen Abstand  $d$  der Meßsonde zum geerdeten Deckel und über die Gewindesteigung damit vom Verdrehwinkel  $\varphi$ . Es gilt:

$$C_{\text{axial}} = \epsilon_0 \cdot A_s \cdot \frac{1}{d} = \epsilon_0 \cdot \frac{A_s}{P} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\varphi}, \quad (4.13)$$

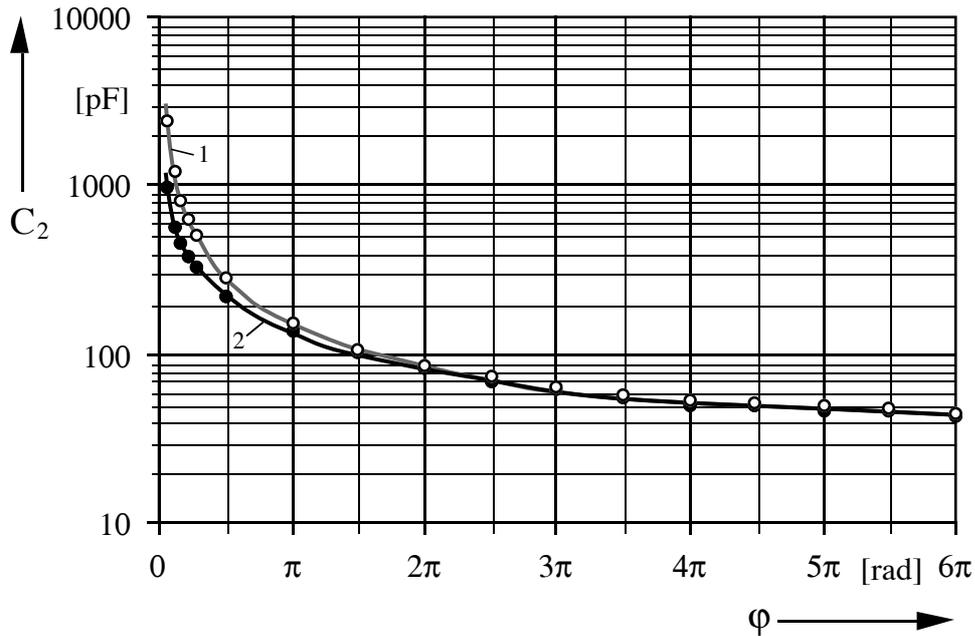
- mit  $\epsilon_0$ : absolute Dielektrizitätszahl,  
 $A_s$ : Sondenfläche,  
 $P$ : Gewindesteigung.

Die nachstehende **Tabelle 4.4** enthält eine Zusammenstellung der durch Rechnung und Messung ermittelten Werte der Teilkapazitäten der Deckelsonde.

berechneter Wert	gemessene Werte	
$C_1$ [pF]	$C_1$ [pF]	$C_2$ [pF]
0,270	0,275	50

**Tabelle 4.4:** Werte der Teilkapazitäten der Deckelsonden

In **Bild 4.8** ist die Abhängigkeit der Niederspannungskapazität vom Verdrehwinkel  $\varphi$  graphisch dargestellt.



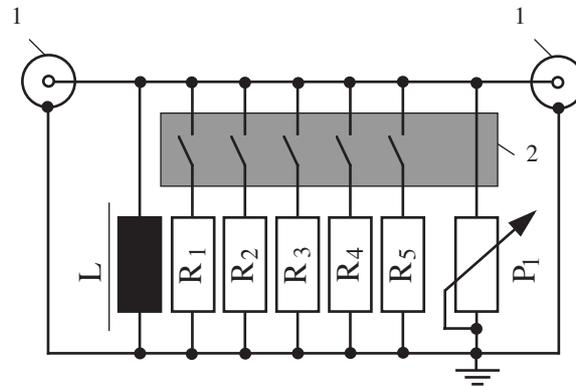
**Bild 4.8:** Abhängigkeit der Niederspannungskapazität vom Verdrehwinkel  $\phi$   
 Kurve 1: theoretischer Wert  
 Kurve 2: Meßwert

#### 4.3.5 Auslegung der Ankopplungsvierpole

Die Auslegung der Ankopplungsvierpole erfolgte im Hinblick auf eine für die breitbandige TE-Messung ausreichend tiefe untere Grenzfrequenz bei gleichzeitig effektiver Unterdrückung der netzfrequenten Hochspannung. Die Durchgangsdämpfung  $K$  des Übertragungssystems kapazitiver Teiler-Ankopplungsvierpol wird sowohl bei ohmscher als auch bei ohmsch-induktiver Beschaltung allein durch das kapazitive Teilverhältnis bestimmt. Bei Forderung einer Dämpfung  $K_{50\text{Hz}}$  von mehr als 100 dB und einer angestrebten unteren Grenzfrequenz von  $f_g \approx 30$  kHz ist eine wirkungsvolle Unterdrückung der Netzspannung nur mit Hilfe einer genügend großen Induktivität im Ankopplungsvierpol zu erreichen.

**Bild 4.9** zeigt das Ersatzschaltbild der realisierten Ankopplungsvierpole. Der Meßwiderstand kann durch Kombination der Einzelwiderstände  $R_1 - R_5$  durch den Schalter und durch Verstellen des Spindelpotentiometers  $P_1$  in einem weiten Bereich variiert werden. Die Induktivität ist als Kerndrossel ausgeführt und besitzt einen hochmagnetischen Ferritkern, um einerseits noch genügend kleine geometrische Maße zu erreichen und andererseits den Eigenwiderstand durch Verwendung von Wickeldraht mit großem Querschnitt möglichst gering zu halten.

Im Hinblick auf die Hochfrequenztauglichkeit der Induktivität wurde besondere Rücksicht auf die Güte des Kernmaterials genommen. Der verwendete Ferritkern eignet sich für meßtechnische Anwendungen bis zu Frequenzen von 10 MHz. Der Ankopplungsvierpol ist zur Schirmung in einem Metallgehäuse untergebracht.



- |                |              |                |        |
|----------------|--------------|----------------|--------|
| 1              | BNC-Buchse   | R <sub>4</sub> | 100 kΩ |
| 2              | DIL-Schalter | R <sub>5</sub> | 1 MΩ   |
| R <sub>1</sub> | 1 kΩ         | P <sub>1</sub> | 25 kΩ  |
| R <sub>2</sub> | 10 kΩ        | L              | 100 mH |
| R <sub>3</sub> | 50 kΩ        |                |        |

**Bild 4.9:** Ersatzschaltbild der verwendeten Ankopplungsvierpole

Die folgende **Tabelle 4.5** enthält die Werte für den Meßwiderstand  $R_m$ , die untere Grenzfrequenz  $f_g$  und den Proportionalitätsfaktor  $K$  bei einer aperiodischen Dämpfung von  $D = 0,707$  für die beiden in der GIS verwendeten kapazitiven Teiler und für die kapazitiven Stützerteiler in der zu Vorversuchen herangezogenen Modellrohranordnung.

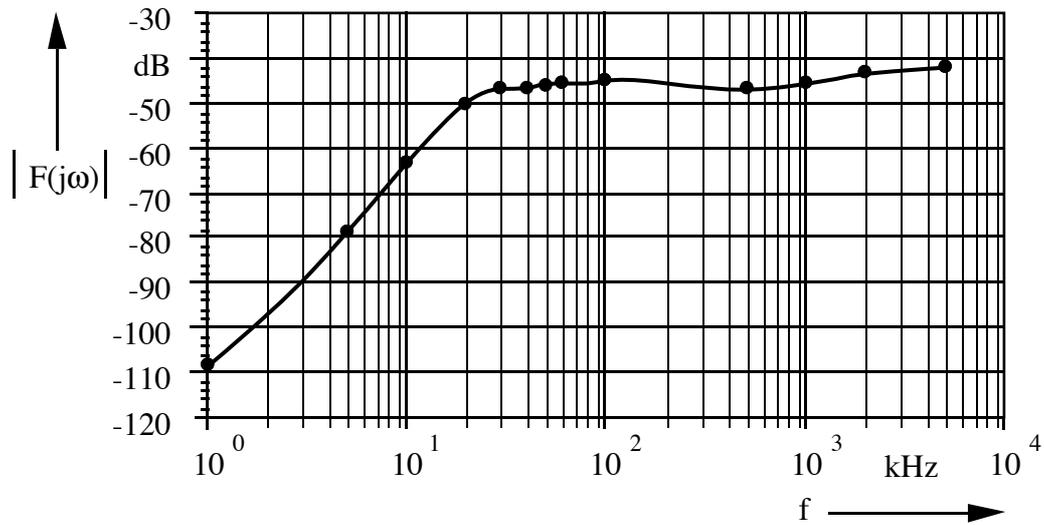
Kapazitiver Spannungsteiler	Ankopplungsvierpol $R_m$ [kΩ]	Grenzfrequenz $f_g$ [kHz]	Proportionalitätsfaktor $K$ [dB]
Modellrohranordnung	17,2	38,6	-46,3
Originalstützer	22,7	50,7	-42,8
modifizierter Stützer	21,5	47,8	-44,6
Deckelsonde	21,6	48,1	-51,8

**Tabelle 4.5:** Kennwerte der verwendeten Meßsysteme, bestehend aus kapazitivem Spannungsteiler und Ankopplungsvierpol

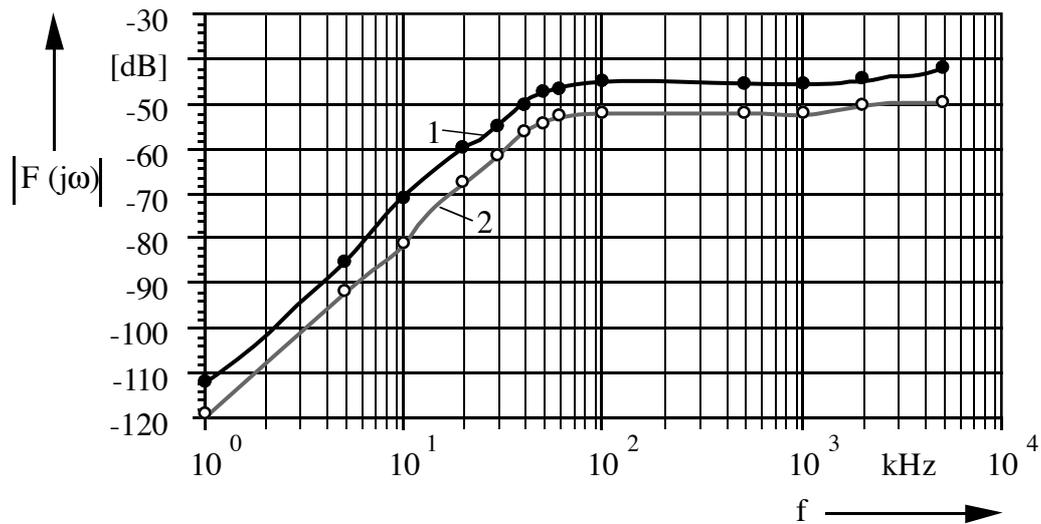
Die **Bilder 4.10** und **4.11** zeigen die gemessenen Amplitudengänge der Spannungs-Übertragungsfunktionen des Stützers innerhalb der Modellrohranordnung und der beiden in der GIS eingesetzten Sonden einschließlich der Ankopplungsvierpole. Der Betrag  $|F(j\omega)|$  des Amplitudenganges wurde durch Messung der Eingangs- und der Ausgangsspannung bestimmt:

$$|F(j\omega)| = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right), \quad (4.14)$$

mit  $U_1$ : Eingangsspannung des kapazitiven Teilers,  
 $U_2$ : Ausgangsspannung des kapazitiven Teilers.



**Bild 4.10:** Amplitudengang der Übertragungsfunktion  $|F(j\omega)|$  der kapazitiven Auskopplung in der Modellrohranordnung

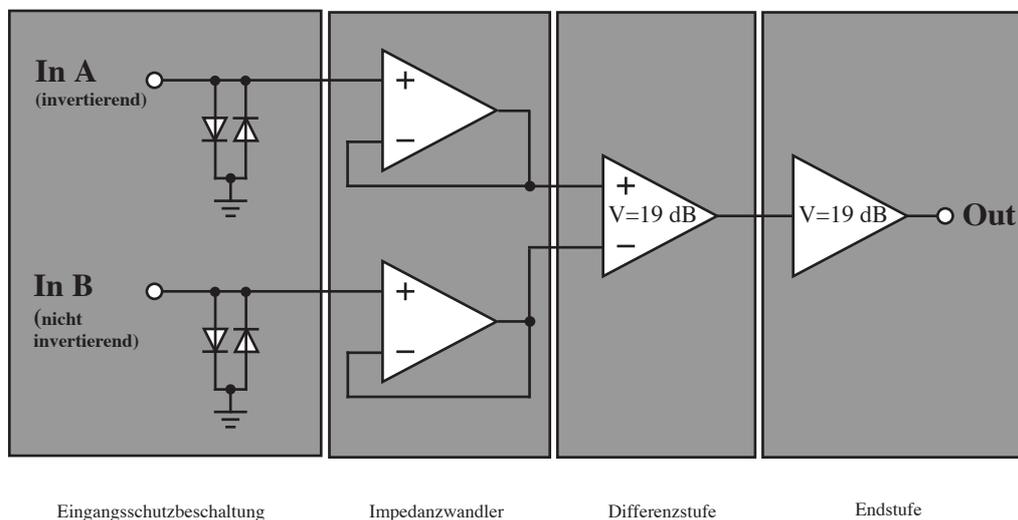


**Bild 4.11:** Amplitudengang der Übertragungsfunktion  $|F(j\omega)|$  beider kapazitiver Meßsonden  
 Kurve 1: modifizierter Stützer    Kurve 2: Deckelsonde

#### 4.3.6 Auslegung des Differenzverstärkers

Für das Meßsystem wurde ein kostengünstiger unempfindlicher Differenzverstärker entwickelt, der die breitbandige Verstärkung der Impulsantwort der Ankopplungsvierpole bei einem geringen Rauschpegel ermöglicht. Das Entwicklungsziel wurde durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Ein hoher Eingangswiderstand und eine geringe Eingangskapazität gewährleisten eine rückwirkungsfreie Messung.
- Eine hohe Gleichtaktdämpfung sorgt dafür, daß das Netzsignal sicher unterdrückt wird.
- Durch eine hohe Anstiegsrate lassen sich auch TE-Impulse mit kurzer Anstiegszeit gut detektieren.
- Durch einen symmetrischen Aufbau der beiden Eingangsstufen werden Störeinflüsse durch eingekoppelte Signale wirksam unterdrückt.
- Eine Schutzbeschaltung verhindert eine Zerstörung des Verstärkers im Falle transienter Überspannungen.
- Durch die Verwendung passiver Bauelemente und rauscharmer integrierter Schaltungen wird der Schaltungsaufbau übersichtlich gestaltet und die Kosten minimiert.

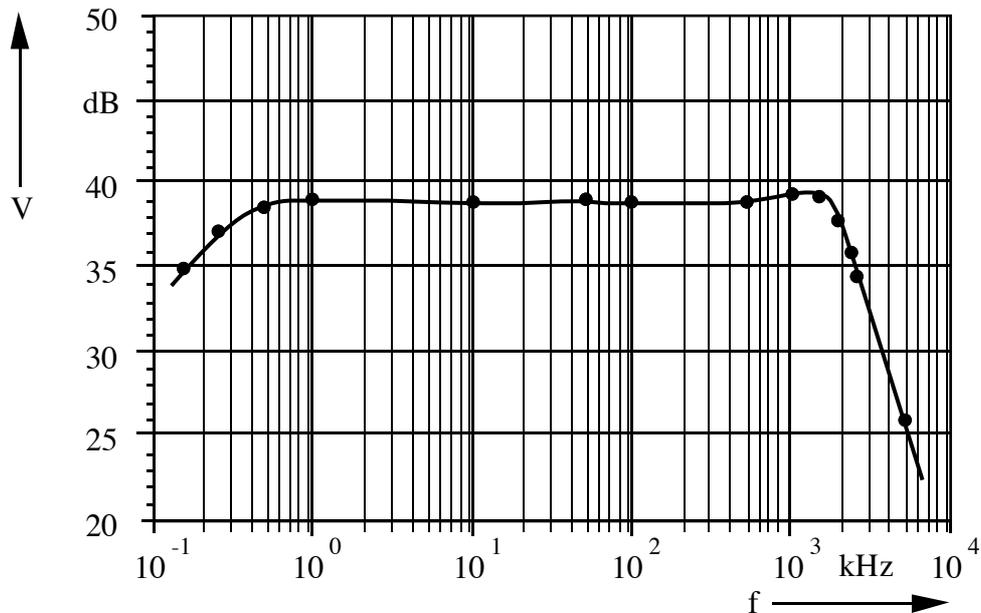


**Bild 4.12:** Aufbau des Differenzverstärkers

In **Bild 4.12** ist der Aufbau des realisierten Verstärkers dargestellt. In beiden Eingängen befindet sich je ein Paar antiparallel geschalteter, kapazitätsarmer Dioden zum Schutz gegen Überspannungen. Eine rückwirkungsfreie Verstärkung der Eingangsspannung wird durch die nachfolgenden Impedanzwandler realisiert.

Daran schließt sich die eigentliche Differenzverstärkerstufe an, gefolgt von der Treiberstufe für größere Kabellängen zwischen Verstärker und Auswerteeinheit. Die Verstärkung dieser Stufen ist einstellbar. Die Gleichspannungsentkopplung der einzelnen Verstärkerstufen erfolgt durch Koppelkapazitäten, die nicht im Detail dargestellt sind.

Die Verstärkungsgang des Differenzverstärkers ist in **Bild 4.13** dargestellt.



**Bild 4.13:** Verstärkungsgang des Differenzverstärkers

**Tabelle 4.6** gibt einen Überblick über die technischen Daten des Verstärkers.

untere Grenzfrequenz $f_u$	160 Hz
obere Grenzfrequenz $f_o$	2,4 MHz
Verstärkung V	38 dB
Gleichtaktunterdrückung G	-37 dB
Eingangswiderstand $R_{in}$	1 M $\Omega$
Eingangskapazität $C_{in}$	15 pF
Ausgangswiderstand $R_{out}$	50 $\Omega$
Anstiegsrate	25 V/ $\mu$ s
Versorgungsspannung $V_{cc}$	$\pm 8V - \pm 15V$

**Tabelle 4.6:** Technische Daten des Differenzverstärkers für die TE-Messung

### 4.3.7 Übertragungsverhalten des TE-Meßkreises

Mit dem Meßsystem können Signale mit Frequenzen von 160 Hz bis 2,4 MHz gemessen werden. In diesem Frequenzbereich kann sich nur eine Transversal-Elektromagnetische Welle in der untersuchten Leiteranordnungen ausbreiten. Deshalb kann für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens ein quasistationäres elektrisches Feld angenommen werden. Unter dieser Annahme ergibt sich das Verhältnis des zeitlichen Verlaufes der Ausgangsspannung bei verschiedenen Sensoren mit unterschiedlichen Meßflächen und Isoliermedien aber identischen Meßimpedanzen zu:

$$\frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{\epsilon_{r_1} \cdot A_1}{\epsilon_{r_2} \cdot A_2}. \quad (4.15)$$

Das Verhältnis der Größe der Signalamplitude hängt vom Aufbau des Sensors ab. Der zeitliche Verlauf der Ausgangsspannung ist von der Beschaltung des Sensors abhängig und deshalb hier für beide Varianten identisch. Für die Deckelsonde und den Stützersensor ergibt sich das Verhältnis der Signalamplituden zu:

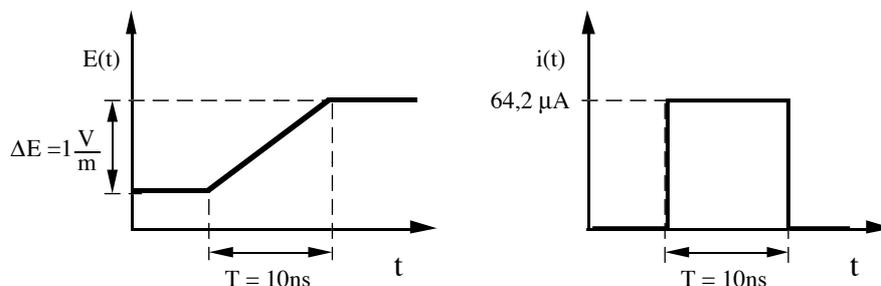
$$\frac{U_{\text{Deckel}}(s)}{U_{\text{Stützer}}(s)} = 1,08. \quad (4.16)$$

Beide Sensoren weisen eine nahezu identische Meßempfindlichkeit auf.

Zur Veranschaulichung wurde das Übertragungsverhalten des Meßsystems, bestehend aus Deckelsonde, Ankopplungsvierpol und Verstärker mit dem Netzwerkanalyseprogramm PSpice berechnet. Ein linearer Anstieg des elektrischen Feldes am Oberspannungskondensator mit einer Anstiegsgeschwindigkeit von

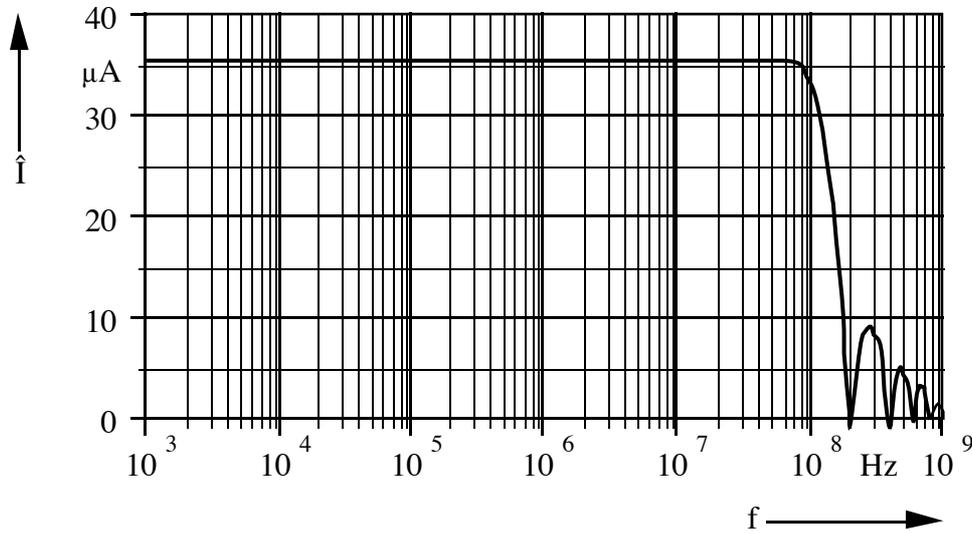
$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m} \cdot \text{ns}} \quad (4.17)$$

ergibt während einer Anstiegszeit von  $T = 10 \text{ ns}$  einen konstanten Strom von  $I = 64,2 \mu\text{A}$  in der Deckelsonde (**Bild 4.14**).



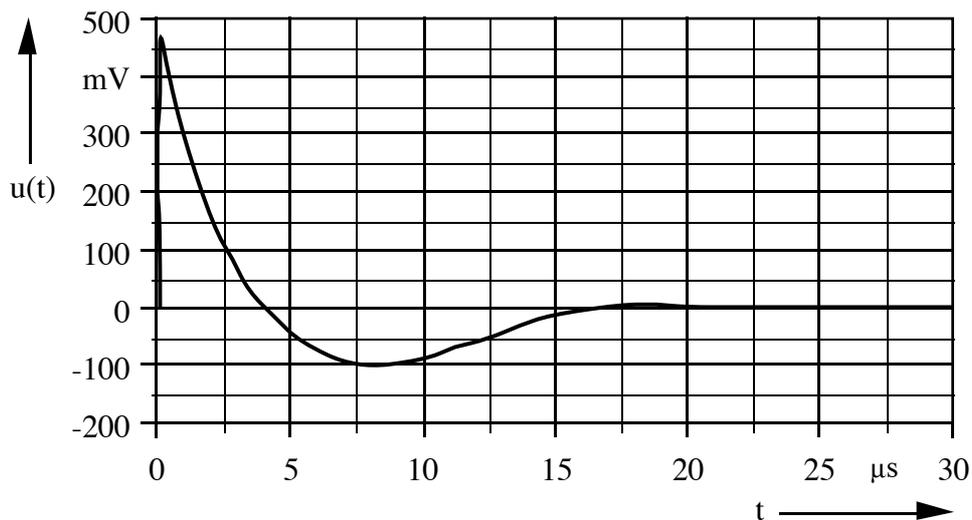
**Bild 4.14:** Feldverlauf und influenzierter Strom in der Sensorfläche der Deckelsonde

**Bild 4.15** zeigt das berechnete Amplitudendichtespektrum des Rechteckstromimpulses. Es hat den charakteristischen Verlauf eines Quasi-Dirac Impulses. Bis 100 MHz weist der Frequenzgang ein konstantes Amplitudendichtespektrum auf.



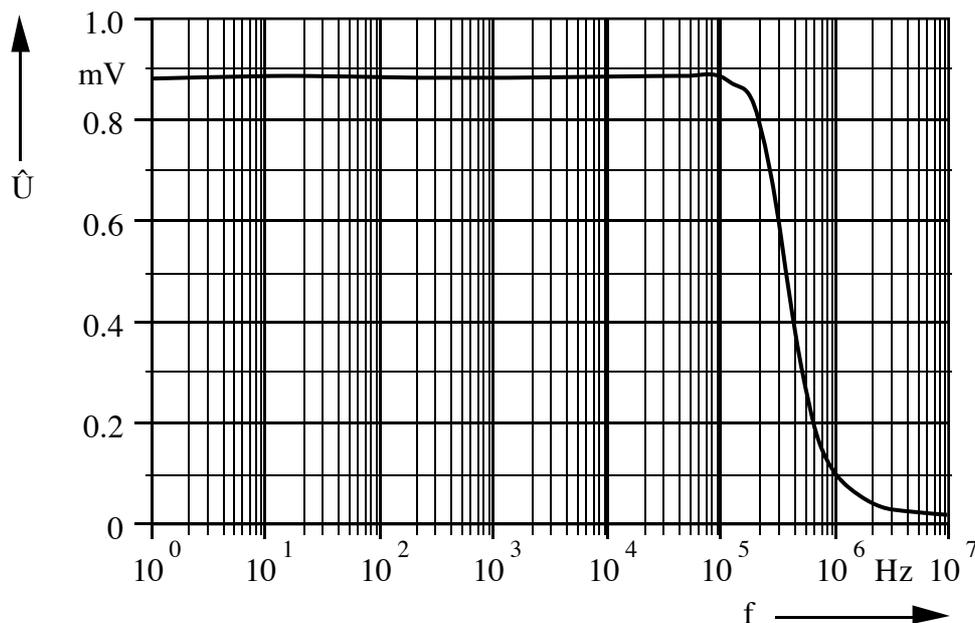
**Bild 4.15:** Amplitudenfrequenzgang des influenzierten Rechteckstromimpulses

Die berechnete Antwort des Ankopplungsvierpols mit nachgeschaltetem Verstärker auf diesen Stromimpuls wird in **Bild 4.16** dargestellt. Es zeigt sich, daß das Übertragungsverhalten des Ankopplungsvierpols das Ansprechverhalten des Meßsystems bestimmt. Die Einschwingzeit der Impulsantwort ist sehr viel größer als die Pulsbreite des Impulses selbst.



**Bild 4.16:** Berechnete Impulsantwort des Meßsystems auf einen Rechteckstromimpuls

Aus der Fouriertransformation der Impulsantwort ergibt sich der in **Bild 4.17** dargestellte Amplitudenfrequenzgang. Die Impulsantwort des Ankopplungsvierpols enthält kaum noch Frequenzanteile größer 1 MHz. Diese Frequenz ist geringer als die obere Grenzfrequenz des Verstärkers, dessen Frequenzgang folglich keinen Einfluß auf die Impulsantwort des Meßsystems hat. Die Eigenschaften des Meßverstärkers sind für den Einsatz in diesem Meßsystem daher vollkommen ausreichend.

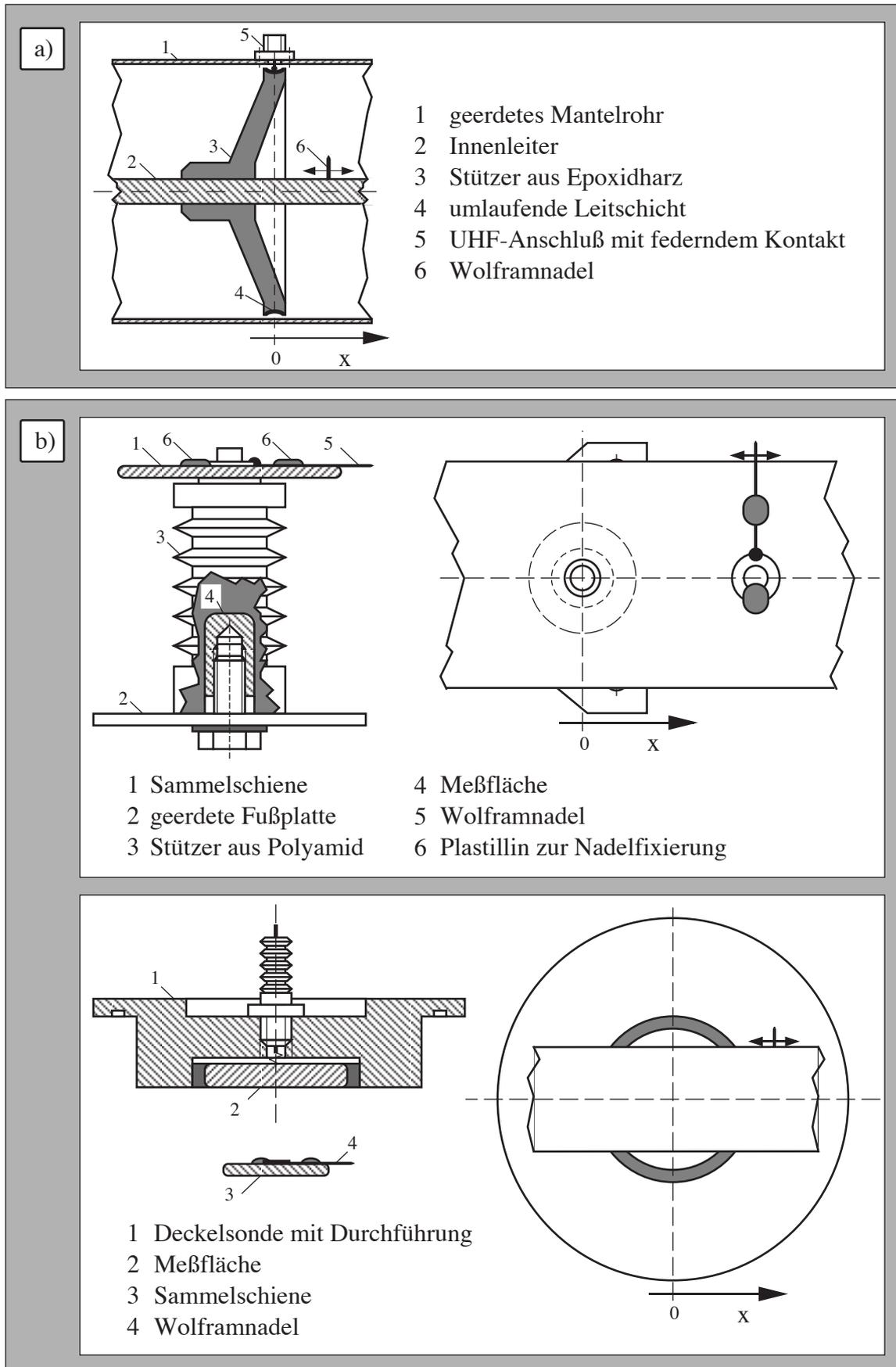


**Bild 4.17:** Amplitudendichtespektrum des Ankopplungsvierpols bei Anregung mit einem Rechteckstromimpuls

#### 4.3.8 Meßergebnisse

Zur Erzeugung von Teilentladungen wurde eine Nadel jeweils auf dem Leiter der Modellrohranordnung und der Schaltanlage montiert. Der Abstand zwischen Nadel und Mantelrohr betrug für die Modellrohranordnung 55 mm und für die Schaltanlage 70 mm. Die Messungen erfolgten mit Luft bei Normaldruck als Isoliergas. Die angelegte Hochspannung betrug bei allen Messungen 7 kV. **Bild 4.18** gibt einen Überblick der Meßanordnung der drei verschiedenen TE-Sensoren.

Um eine Aussage über die Meßempfindlichkeit der Meßsonden in Abhängigkeit vom Entstehungsort der Teilentladungen zu gewinnen, wurde der Abstand der Nadel zum Sensor variiert. Die Impulshöhen von Differenzverstärker und schmalbandigem Meßgerät wurden auf dem Oszilloskop abgelesen.

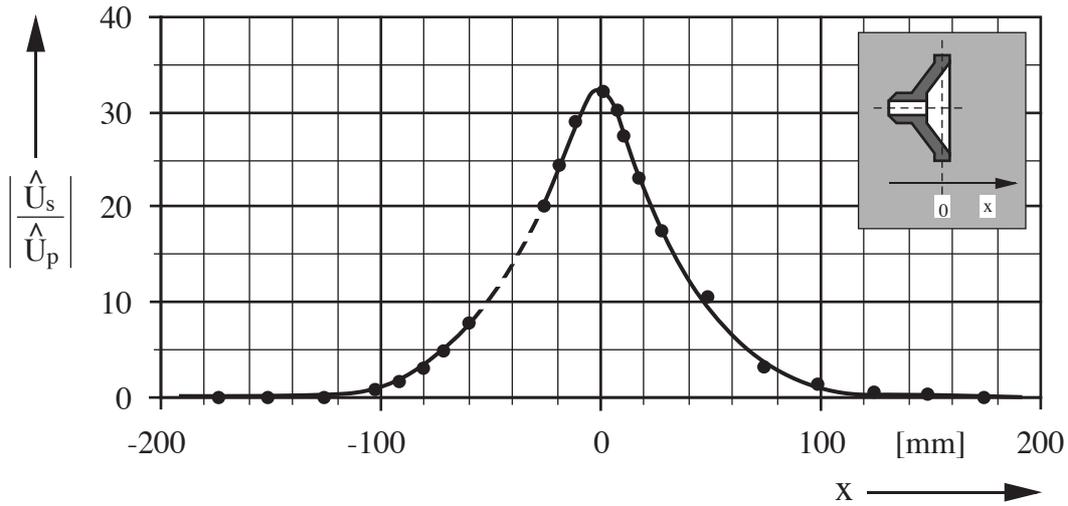


**Bild 4.18:** Anordnung der Nadel zur Teilentladungserzeugung und Bestimmung der Meßempfindlichkeit der kapazitiven Sonden  
 a) Modellrohranordnung  
 b) Schaltanlage

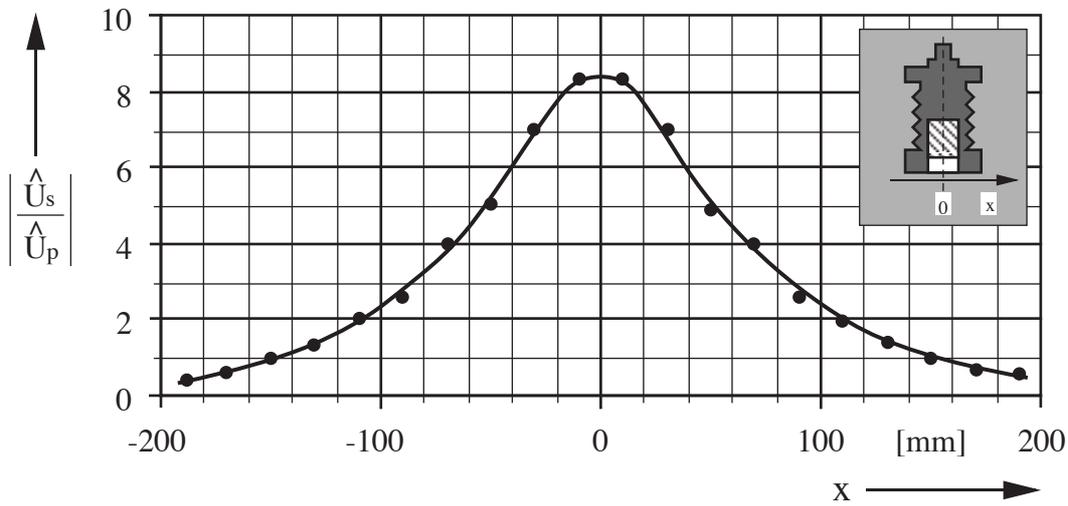
Die über das schmalbandige Teilentladungsmeßgerät gemessene Impulshöhe der parallelen Auskopplung bleibt bei Veränderung der Lage der Nadel auf dem Innenleiter konstant. Unabhängig vom Ort der Nadel wurden Teilentladungsimpulse mit gleichem Ladungsinhalt erzeugt. Dagegen verändert sich die scheinbare Ladung der seriell ausgekoppelten TE-Impulse. Das Verhältnis der Impulshöhe von paralleler und differentieller Auskopplung ist ein Maß für die Empfindlichkeit der TE-Meßsonden.

Die **Bilder 4.19 bis 4.21** geben einen Überblick über die relative Empfindlichkeit der kapazitiven Sensoren in Abhängigkeit vom Abstand der Nadel zum jeweiligen Sensor. Alle drei Sensoren besitzen ihre größte Empfindlichkeit, wenn sich die Nadel und damit der Entstehungsort der Teilentladungen in Höhe der Meßfläche befindet. Bei dem Stützersensor und der Deckelsonde ist ein Plateau zu erkennen. Die Empfindlichkeit bleibt konstant, solange sich die Nadel im Bereich der Meßfläche befindet. Mit größer werdendem Abstand der Nadel von der Meßfläche sinkt die Meßempfindlichkeit. Teilentladungen gleicher Intensität werden mit zunehmender Entfernung von der Sensorfläche schlechter erfaßt.

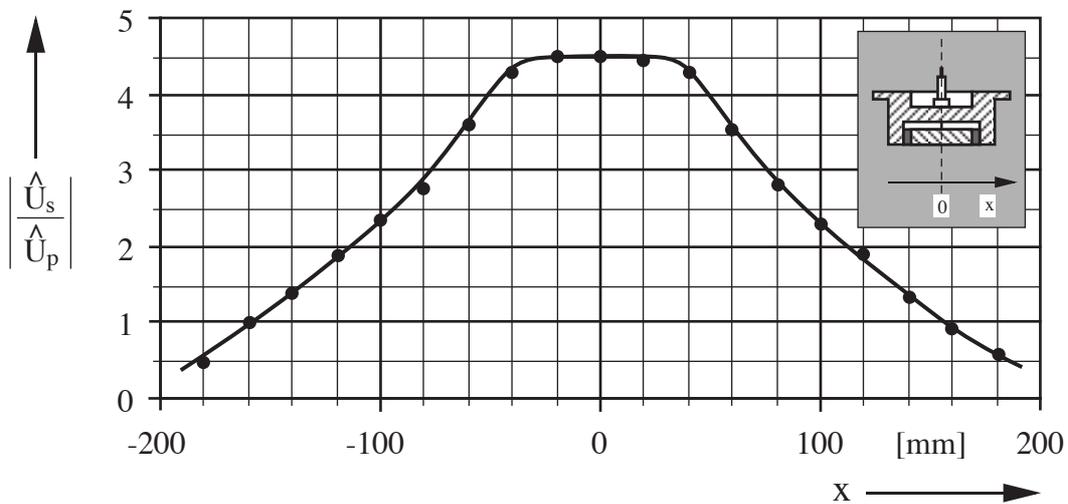
Entsprechend den Überlegungen in Kapitel 4.3.7 wird der Einfluß der Feldverzerrung durch die Teilentladungstätigkeit in der Umgebung der Nadel mit größer werdender Entfernung immer geringer. Folglich sinkt die durch die Teilentladungen hervorgerufene Influenzwirkung des zeitlich veränderlichen Feldes mit steigendem Abstand Nadel-Sensor. Damit sich Teilentladungsimpulse bei der Differenzmessung nicht gegenseitig auslöschen, dürfen sich die Empfindlichkeitsbereiche zweier benachbarter kapazitiver Feldsensoren gerade nicht mehr überlappen. Im Falle der hier untersuchten Schaltung wird diese Bedingung mit beiden Sensorvarianten erfüllt, so daß die Gefahr der Impulsauslöschung nicht besteht.



**Bild 4.19:** Relative Meßempfindlichkeit des koaxialen Stützersensors der Modellanordnung in Abhängigkeit von der Entfernung Nadel-Stützer



**Bild 4.20:** Relative Meßempfindlichkeit des Stützersensors der gekapselten Schaltanlage in Abhängigkeit von der Entfernung Nadel-Stützer



**Bild 4.21:** Relative Meßempfindlichkeit der Deckelsonde der gekapselten Schaltanlage in Abhängigkeit von der Entfernung Nadel-Sonde

#### 4.3.9 Zeitliche Verläufe der Teilentladungssignale

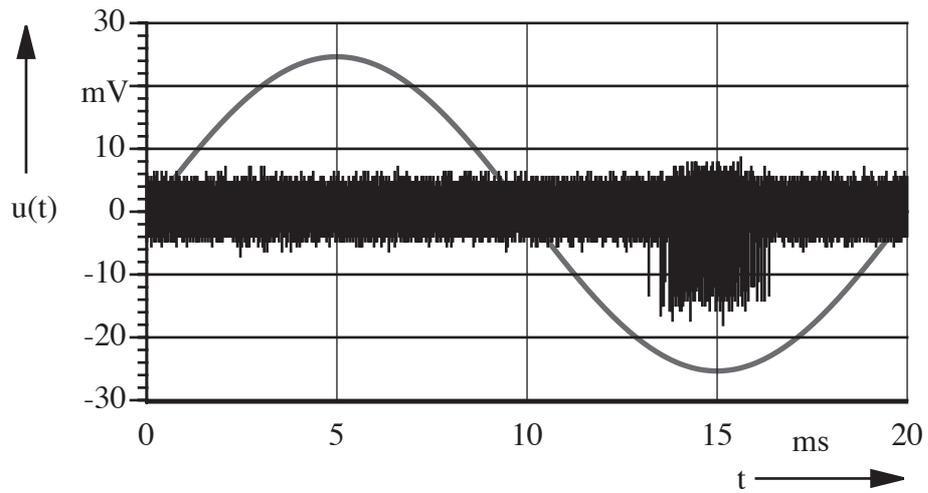
In den **Bildern 4.22** bis **4.29** ist jeweils der Zeitverlauf der Ausgangsspannung des Differenzverstärkers über eine Periode der angelegten Hochspannung dargestellt.

##### - Modellrohranordnung

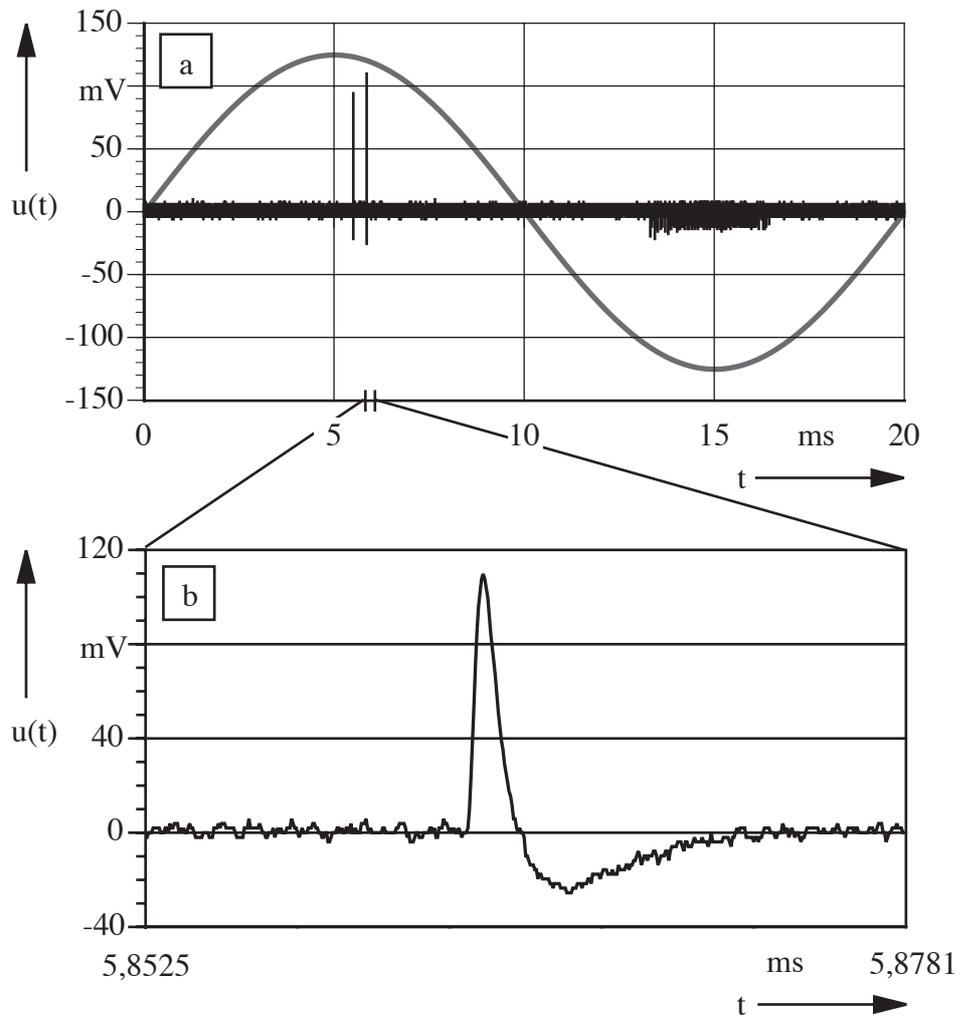
Die **Bilder 4.22** und **4.23 a** zeigen Teilentladungen, die in der Modellrohranordnung bei einem Nadelabstand von 70 mm zu einem der Sensorstützer aufgenommen wurden. Dieser Sensor wurde an den nicht invertierenden Eingang des Differenzverstärkers angeschlossen. Bei dem in Bild 4.22 dargestellten Meßergebnis betrug die angelegte Spannung 8,7 kV. Man erkennt deutlich die Teilentladungstätigkeit im Bereich des negativen Spannungsmaximums. Bei weiterer Spannungssteigerung auf 10 kV treten zusätzlich auch Teilentladungen im Bereich des positiven Maximums der Hochspannung auf (Bild 4.23 a). Die Polarität der Impulse entspricht der Hochspannungspolarität. Die Amplitude der positiven Impulse ist deutlich größer als die Amplitude der negativen Impulse.

Bei den Messungen, deren Ergebnisse in den **Bildern 4.24** und **4.25** dargestellt sind, befand sich die Nadel in einem Abstand von 35 mm zu dem Stützer, der an den invertierenden Eingang des Verstärkers angeschlossen ist. Bei einer angelegten Spannung von 7,7 kV setzt die Teilentladungstätigkeit zunächst im negativen Scheitelwert der Hochspannung ein (Bild 4.24). Nach einer Spannungserhöhung auf 10 kV treten auch Teilentladungen im Bereich um den positiven Scheitelwert der Hochspannung auf (Bild 4.25 a). Die Polarität der TE-Impulse ist entgegengesetzt zur Polarität der Hochspannung. Impulse in der positiven Halbwelle der Hochspannung haben negative Polarität, Impulse in der negativen Halbwelle der Spannung positive Polarität. Weiterhin ist festzustellen, daß nicht die Amplitude der Impulse in der negativen Halbwelle zunimmt, sondern deren Häufigkeit, da die Teilentladungseinsetzspannung mit steigender Spannung zu kleineren Phasenwinkeln verschoben wird. Dadurch vergrößert sich der Bereich um das Spannungsmaximum, in dem die Teilentladungen auftreten. Die Amplitude ist größer als die Werte in den Bildern 4.22 und 4.23, weil die Nadelentfernung zum Stützer halbiert wurde.

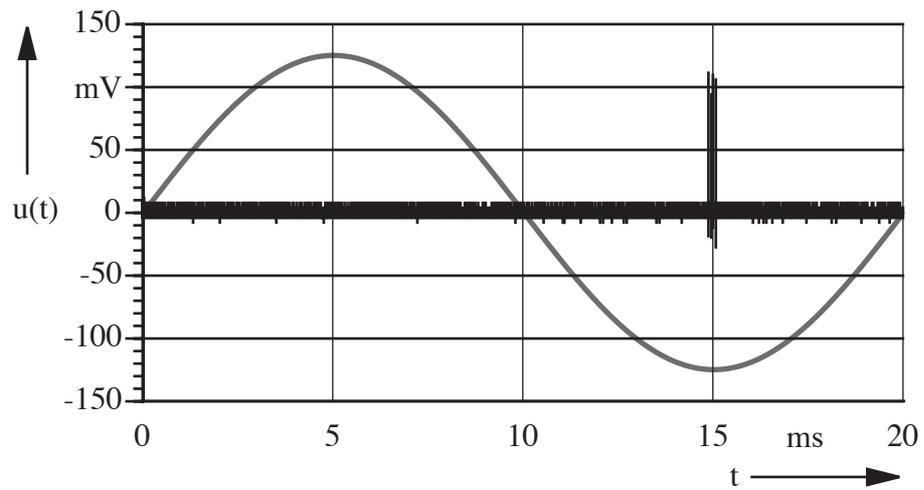
Durch die Polarität der TE-Impulse an den jeweiligen Verstärkern ist eine eindeutige Zuordnung der Teilentladungsquelle zu einem TE-Sensor möglich.



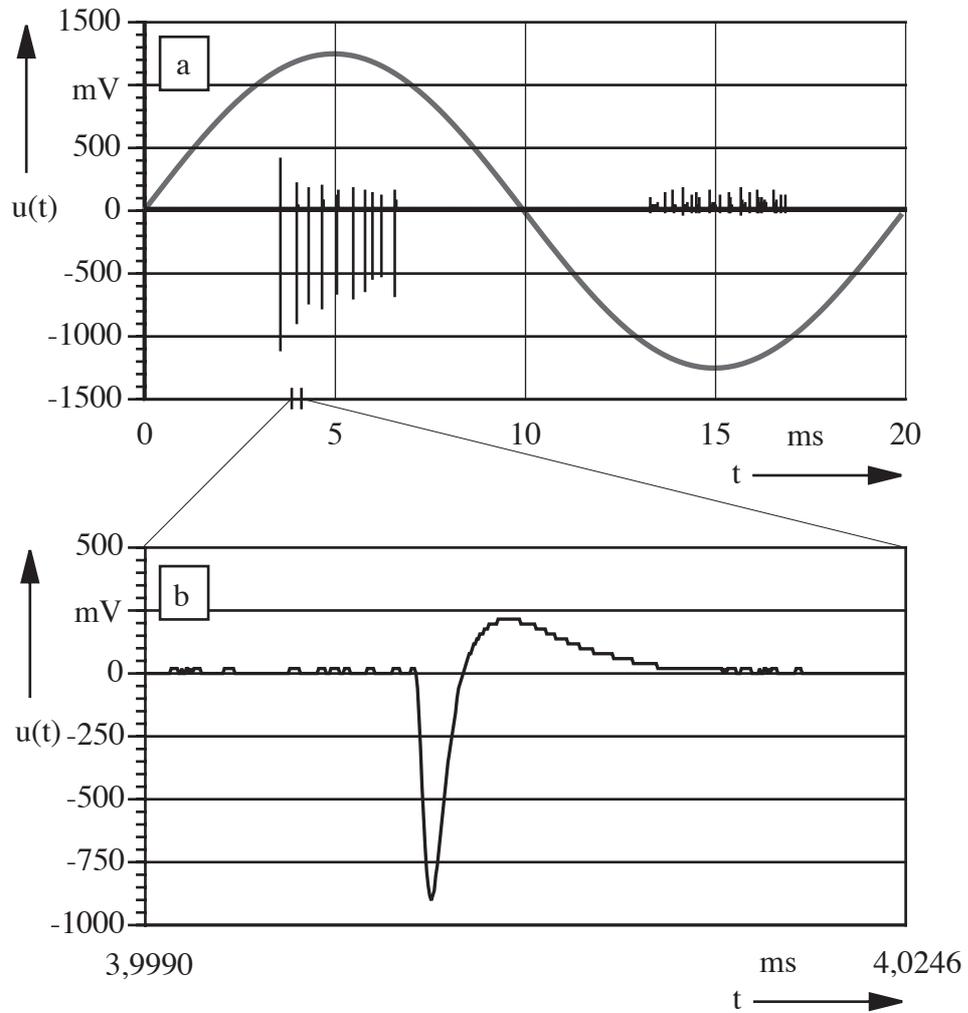
**Bild 4.22:** Modellrohranordnung bei 8,7 kV, Nadelabstand 70 mm vom nicht invertierenden Stützer



**Bild 4.23:** Modellrohranordnung bei 10 kV,  
(a) Nadelabstand 70 mm vom nicht invertierenden Stützer,  
(b) vergrößerter Einzelimpuls



**Bild 4.24:** Modellrohranordnung bei 7,7 kV, Nadelabstand 35 mm vom invertierenden Stützer



**Bild 4.25:** Modellrohranordnung bei 10 kV,  
(a) Nadelabstand 35 mm vom invertierenden Stützer,  
(b) vergrößerter Einzelimpuls

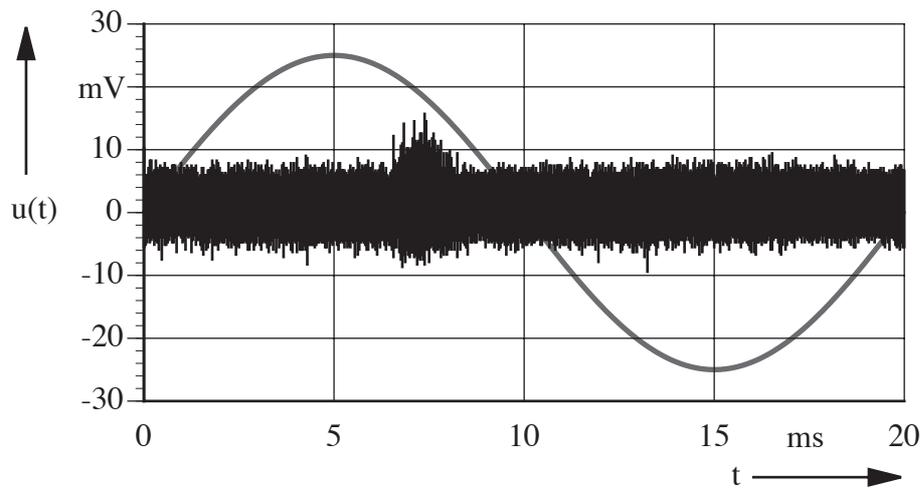
### - SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlage

Bei den Messergebnissen, die den nachfolgenden **Bildern 4.26 - 4.29** dargestellt sind, befand sich die Nadel zur Teilentladungserzeugung unterhalb eines Sammelschienenhalters in der Nähe der TE-Sonden, die mit dem nicht invertierenden Eingang des Differenzverstärkers verbunden waren. Der Abstand zwischen dem Stützensensor und der Nadel betrug 83 mm und zwischen der Deckelsonde und der Nadel 120 mm. Die durch die Nadel erzeugten Teilentladungsimpulse wurden sowohl mit den Stützensensoren als auch mit den Deckelsonden ausgekoppelt.

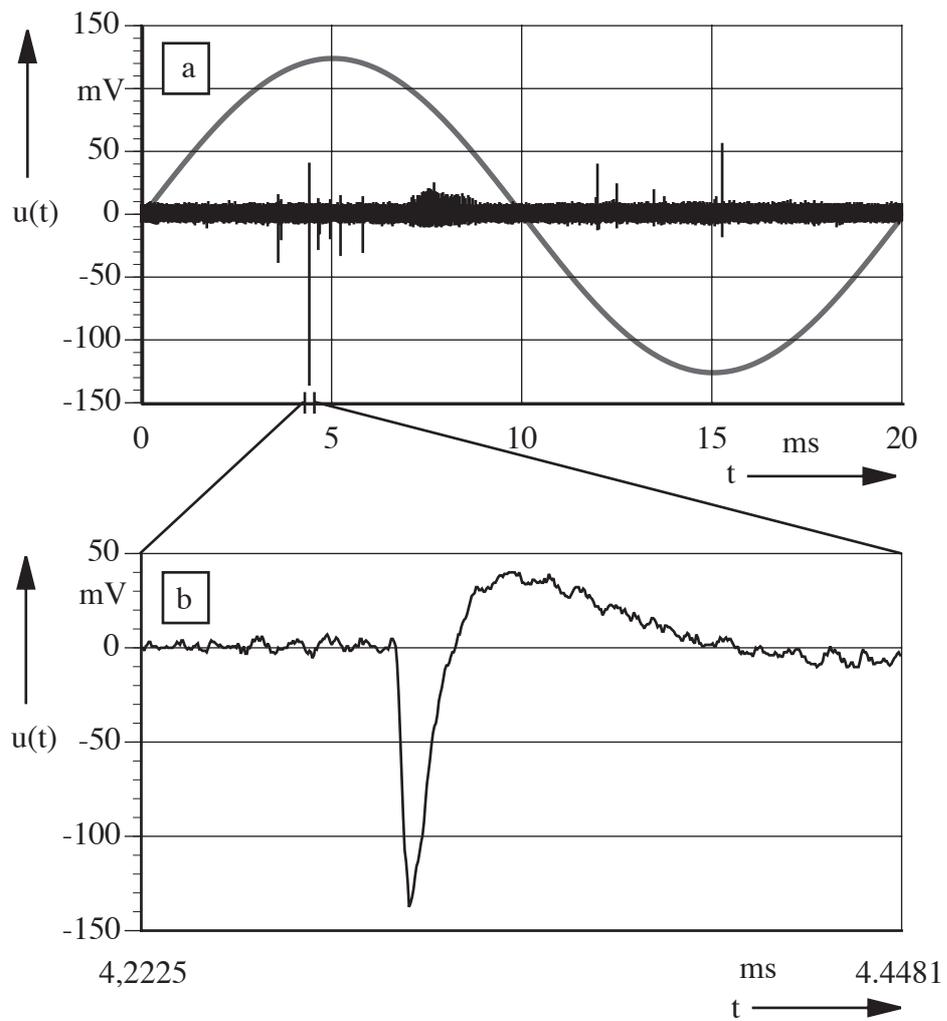
Die Bilder 4.26 und 4.28 zeigen die über die Stützensensoren bzw. über die Deckelsonden ausgekoppelten Signalverläufe bei einer Spannung von 40 kV. Bei beiden Bildern ist eine Teilentladungstätigkeit im Bereich der positiven Spannungshalbwellen zu erkennen. Die Impulse besitzen positive Polarität und sind einer Fehlstelle im Meßbereich des an den nicht invertierenden Eingang des Verstärkers angeschlossenen Sensors zuzuordnen. Die Amplituden sind annähernd gleich groß. Wird die Spannung auf 50 kV gesteigert, überlagern sich den durch die Nadel erzeugten Teilentladungen größere Impulse (Bilder 4.27a und 4.29a).

Nach den an der Modellrohranordnung gewonnenen Ergebnisse muß der Ursprung dieser Impulsmuster auf Teilentladungen in einer Fehlstelle im Meßbereich der invertierenden Auskoppereinheit zurückzuführen sein. Daher wurde für weitere Untersuchungen die Nadel aus dem Gasraum entfernt. Danach blieben die Teilentladungsimpulse bei 40 kV erwartungsgemäß aus. Die starken Impulse traten wiederum bei 50 kV auf. Bei einer anschließenden Untersuchung der Anlage konnte die Schwachstelle am Dreistellungsschalter lokalisiert werden. An einer Hutmutter kam es zu sichtbaren Glimmentladungen. Die Fehlstelle befand sich im Meßbereich der invertierenden Auskoppereinheit. Der Vergleich von Deckelsonde und Stützensensor ergibt eine annähernd gleiche Meßempfindlichkeit, so daß beide Sensorvarianten gleich gut zur differentiellen Teilentladungsauskopplung geeignet sind.

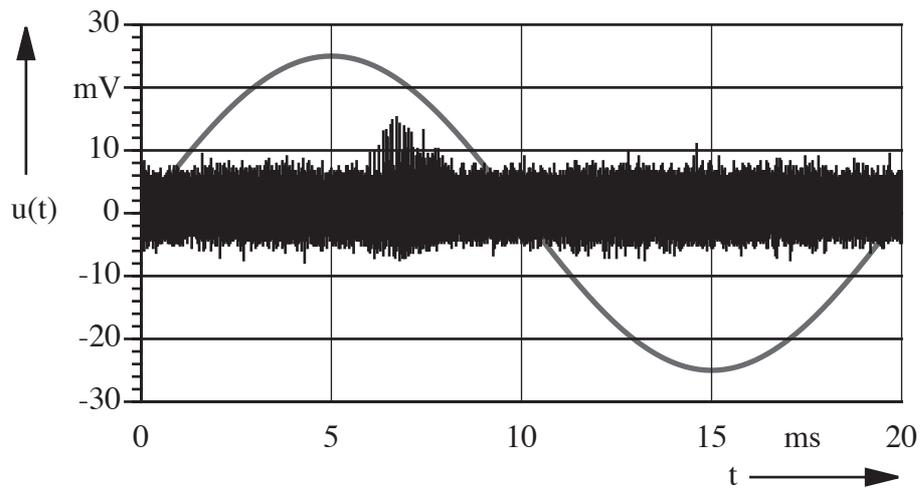
Die Bilder 4.23 b, 4.25 b, 4.27 b, 4.29 b zeigen das Einschwingverhalten aufgezeichneter Einzelimpulse in zeitlich vergrößerter Auflösung. Das Meßsystem reagiert auf Teilentladungen in Luft (Modellrohranordnung) und SF<sub>6</sub> (gekapselte Schaltanlage) mit gleichen Zeitverläufen. Die berechnete Einschwingzeit der Impulse bei Auskopplung mit der Deckelsonde ( $t \approx 20 \mu\text{s}$ ) (Bild 4.14) stimmt sehr gut mit dem gemessenen Wert in Bild 4.29 b ( $t \approx 17 \mu\text{s}$ ) überein. Die Meßergebnisse bestätigen die Überlegungen in Kapitel 4.3.5, nach denen der zeitliche Verlauf der Verstärkerausgangsspannung durch das Einschwingverhalten des Ankopplungsvierpols bestimmt wird.



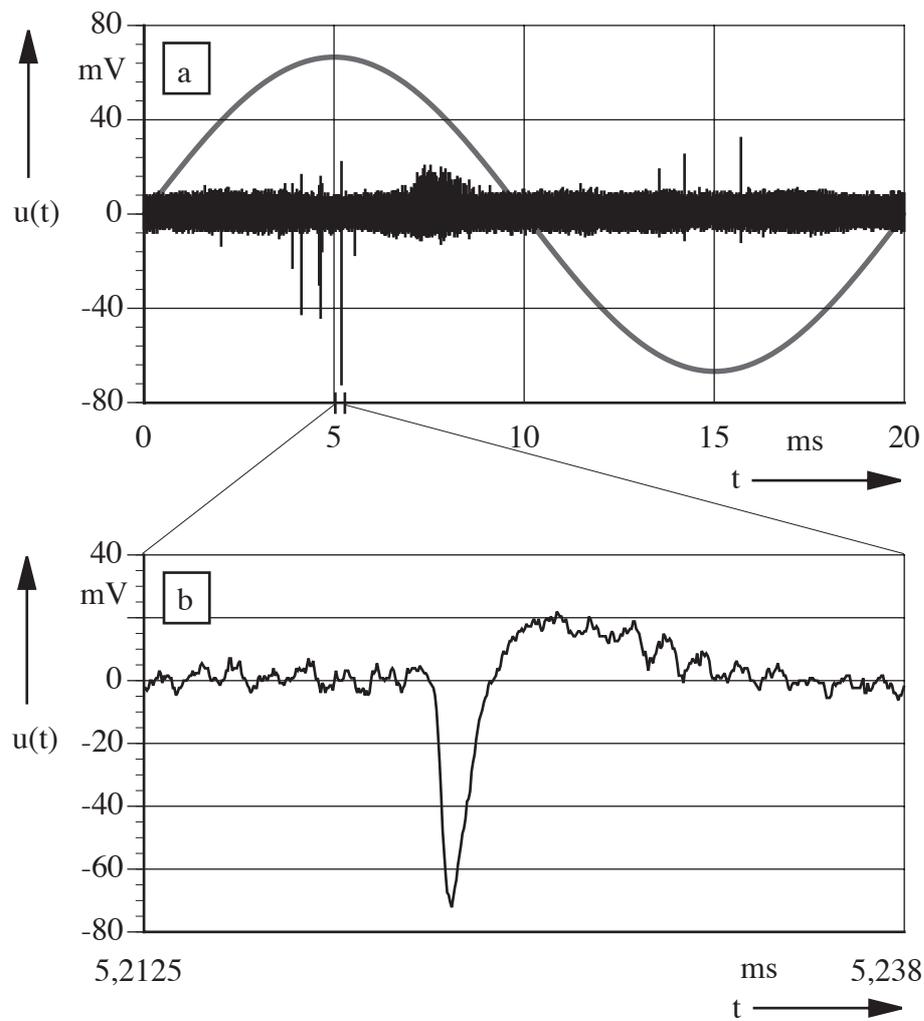
**Bild 4.26:** Gasisolierte Schaltanlage bei 40 kV, Nadelabstand 83 mm vom nicht invertierenden Stützensensor



**Bild 4.27:** Gasisolierte Schaltanlage bei 50 kV  
(a) Nadelabstand 83 mm vom nicht invertierenden Stützensensor  
(b) vergrößerter Einzelimpuls



**Bild 4.28:** Gasisolierte Schaltanlage bei 40 kV, Nadelabstand 120 mm von der nicht invertierenden Deckelsonde



**Bild 4.29:** Gasisolierte Schaltanlage bei 50 kV  
(a) Nadelabstand 120 mm von der nicht invertierenden Deckelsonde  
(b) vergrößerter Einzelimpuls

#### **4.3.10 Zusammenfassung der Untersuchungen zur konventionellen TE-Messung an gekapselten Schaltanlagen**

Die Entwicklung und Erprobung eines differentiellen Meßsystems zur Teilentladungsauskopplung in Mittelspannungs-Schaltanlagen stand im Mittelpunkt der Arbeiten zu diesem Kapitel. Auf der Basis detaillierter Grundlagenuntersuchungen erfolgte die Entwicklung und Dimensionierung der Bestandteile eines Systems zur Erfassung von Teilentladungen während des Betriebes mit Störunterdrückung nach dem Prinzip der Differenzmessung. Der Aspekt einer einfachen und kostengünstigen Ausführung und Integration in bestehende Schaltanlagenkonzepte stand dabei im Vordergrund.

Die Verwendung vorhandener Stützer in Mittelspannungs-Schaltanlagen zur Auskopplung von Teilentladungen ist eine einfache Alternative zu bisher bekannten Methoden. Durch die Verwendung eines Differenzverstärkers mit hohem Eingangswiderstand wird eine rückwirkungsfreie breitbandige Messung von Teilentladungen unter vor Ort Bedingungen möglich. Die Einsatzfähigkeit der entwickelten Komponenten wurde durch Messungen an einer Modellrohanordnung und einer SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungsschaltanlage geprüft.

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind:

- Eine Erfassung der Teilentladungstätigkeit ist mit dem differentiellen Auskopplungsverfahren möglich.
- Beide Feldsonden, die für die Mittelspannungs-Schaltanlage entwickelt wurden, eignen sich zur Teilentladungserfassung. Kapazitive Sensorstützer sind kostengünstiger und einfacher in eine Mittelspannungs-Schaltanlage zu integrieren als zusätzliche TE-Sensoren.
- Die Meßempfindlichkeit der entwickelten kapazitiven Feldsonden ist stark von der Entfernung zwischen Fehlstelle und Meßsonde abhängig. Teilentladungen gleicher Intensität werden mit zunehmender Entfernung zur Meßsonde mit geringerer Amplitude erfaßt.
- Eine Bestimmung des Ladungsinhaltes der an der Fehlstelle erzeugten Teilentladungen ist wegen der ortsabhängigen Meßempfindlichkeit der Feldsonden nicht sinnvoll. Eine Kalibrierung mit extern eingespeisten Impulsen definierten Ladungsinhaltes ist nicht möglich.
- Die mit einer Nadel auf Hochspannungspotential künstlich erzeugten TE-Impulse sind durch die Phasenlage der TE-Impulse zur angelegten Hochspannung als äußere Teilentladungen zu identifizieren. Eine Zuordnung der Teilentladungen zur jeweiligen Meßsonde ist anhand der Polarität und der Phasenlage der Impulse zur Hochspannung möglich.
- Das Zeitverhalten der durch die Teilentladungen erzeugten Impulse wird ausschließlich durch das Impulsantwortverhalten des Meßsystems bestimmt. Es ist unabhängig von unterschiedlichen TE-Impulsformen, die durch unterschiedliche Gasarten und Gasdrücke verursacht werden.

#### **4.4 UHF-Teilentladungsmessung und Simulation an gekapselten SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlage**

Eine Alternative zu den bisher beschriebenen Verfahren ist die elektrische TE-Messung mit dem UHF-Verfahren, bei dem Defekte schon bei wesentlich niedrigeren Testspannungen als bei der konventionellen Meßmethode festzustellen sind, so daß Durch- und Überschläge vermieden werden. Durch die Möglichkeit der Lokalisierung kann gezielt an der defekten Stelle eingegriffen werden. Zahlreiche Untersuchungen belegen die Tauglichkeit der UHF-Methode für die Überwachung von Hochspannungs-Schaltanlagen [Hampton 88, Lightle 89, Hampton 92, Petit 93-2].

Bei der TE-Messung mit der UHF-Methode werden auch Störsignale erfasst, die aber gut als solche erkannt werden können. Teilentladungen in Luft haben z.B. Spektralanteile unterhalb des Frequenzbereiches von Teilentladungen in Schaltanlagen. Radiosender sind aufgrund ihrer bekannten Frequenzen leicht zu identifizieren und können ausgeblendet werden [Petit 93-1].

Das UHF-Verfahren nutzt die von jeder TE-Störstelle ausgehenden elektromagnetischen Wellen. Die Teilentladungen an der Störstelle sind mit sehr steilen Impulsen verbunden, die Frequenzanteile bis in den GHz-Bereich enthalten und den jeweiligen Anlagenraum zu verschiedenen Eigenschwingungen anregen. Diese ultrahochfrequenten Signale im Bereich zwischen 300 MHz und mehr als 1500 MHz können mit Sensoren, die z.B. als Sonden im Deckel der Kapselung eingebracht werden, erfaßt und mit Hilfe eines Frequenzanalysators ausgewertet werden. Da sich die Eigenschwingungen im gesamten Schaltanlagenraum ausbreiten und kaum gedämpft werden, ist zur Detektierung von Teilentladungen nur eine Sonde pro Phase notwendig. In der Praxis werden mehrere Sonden installiert, um eine Lokalisierung der TE-Störstelle über eine Laufzeitmessung zwischen benachbarten Sensoren zu ermöglichen. Die hervorragende Empfindlichkeit dieser Meßmethode ermöglicht die Erfassung von Teilchen auf eine Entfernung von mehr als zehn Metern. Zusätzlich kann mit Hilfe des UHF-Verfahrens vielfach die Ursache der Teilentladung bestimmt werden, da für viele Defekte charakteristische Frequenz- und Impulsspektren existieren.

##### **4.4.1 Ausführung der Sonde**

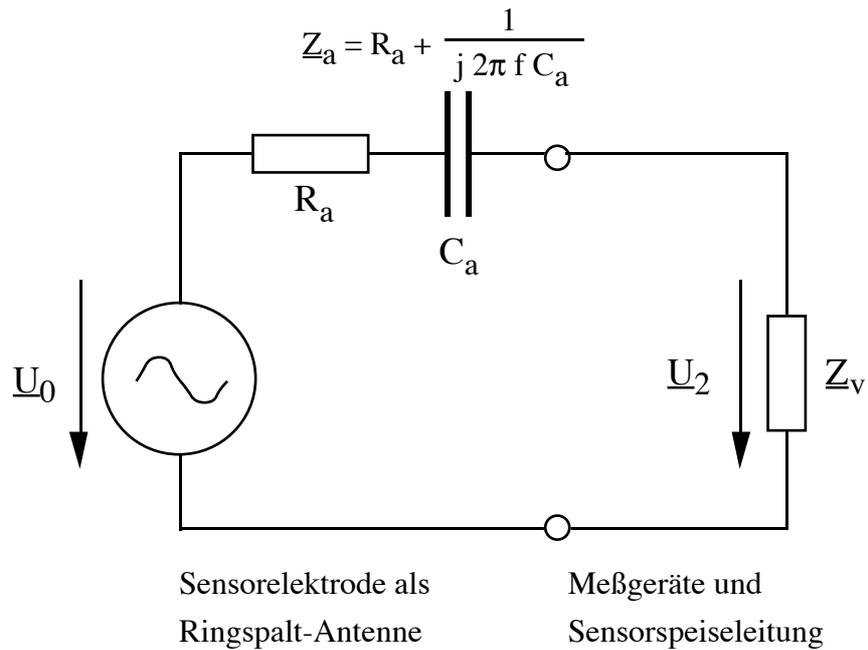
Die Entwicklung der für die UHF-Methode benötigten Sonden wurde aufgrund der unterschiedlichen Schaltanlagentypen vom jeweiligen Hersteller vorangetrieben, so daß mehrere Ausführungsformen von UHF-Sensoren auf dem Markt existieren [Hampton 85, Fletcher 90].

UHF-Sonden sind potentialfreie Elektroden mit einer Meßfläche, die als Antenne wirkt. Sie werden bevorzugt in den Verschlußdeckeln der GIS montiert. In [Schlemper 93] wurde von flachen, kreisrunden Platten mit einem Durchmesser von 100 mm und einem Abstand zur Sammelschiene von 145 mm berichtet. Die Wirkung des elektrischen Feldes zwischen der Elektrodenoberfläche und der Sammelschiene kann bis zum Auftreten höherer Wellenmoden, also unterhalb des UHF-Bereichs, durch eine Hochspannungskapazität nachgebildet werden. Der Wert dieser Kapazität in einer koaxialen Anordnung läßt sich für eine leitfähige, runde Platte unter Vernachlässigung der Randfelder nach der bereits aufgeführten Gleichung (4.10) abschätzen.

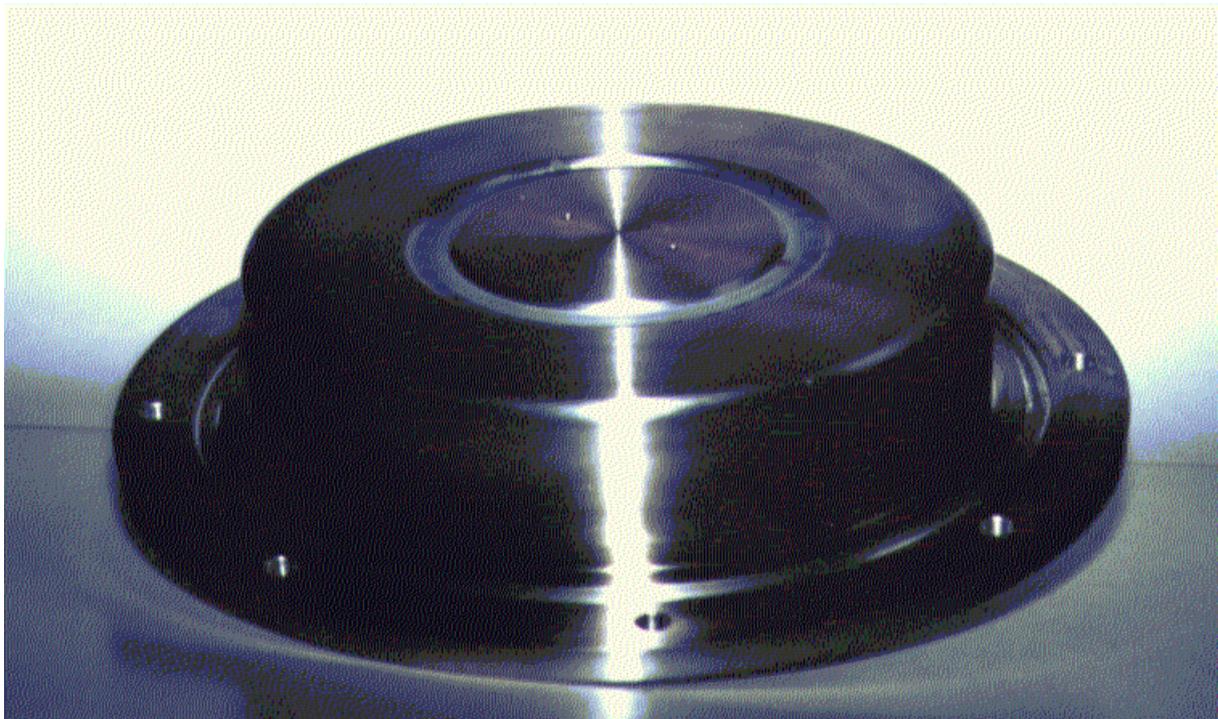
Da sich zwischen Elektrode und Kapselung ein elektrisches Streufeld mit einer Streukapazität  $C_2$  vorhanden ist, wirkt die Sonde im ganzen als kapazitiver Teiler [Albiez 89, Bauer 93]. Für die Messungen ist eine hohe Empfindlichkeit erforderlich, wobei die Sonde gleichzeitig für hohe Frequenzen geeignet sein muß. Konstruktiv werden diese Forderungen durch eine kleine Niederspannungskapazität erfüllt, die durch einen isolierten Spalt zwischen Meßelektrode und Kapselung gebildet wird.

Ein anderes Verfahren wurde von [Yuen 91] vorgestellt. Dort werden externe, aus einer isolierten Drahtschleife bestehende Sonden verwendet, die mit Hilfe eines hermetisch abgedichteten Flansches an den Sichtfenstern der Anlage angebracht sind. Der Frequenzanalysator wird über einen Vorverstärker angeschlossen, um so auch kleinste Signale messen zu können.

Im UHF-Bereich sind die Abmessungen der Sensorelektrode im Bereich der zu empfangenden Wellenlänge von 2 - 10 cm. Deshalb muß der Sensor als Ringspalt-Antenne beschrieben werden [Meixner 51, Kurrer 95-1]. Die Berechnung der Antennenimpedanz und des Übertragungsverhaltens für die technische Ausführung in einer Hochspannungs-Schaltanlage wird in [Kurrer 96-2] ausführlich diskutiert. Für die Ringspalt-Antenne ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild:



**Bild 4.30:** Ersatzschaltbild einer Ringspalt-Antenne im UHF-Bereich nach [Kurrer 96-2]



**Bild 4.31:** Ausführungsbeispiel einer Sonde im Verschlussdeckel

Für eine vor Ort Messung ist es von Vorteil, wenn sie mit fest installierten und bereits geprüften Sensoren (z.B. Sonde im Verschlussdeckel, **Bild 4.31**) mit einem guten Signal/ Rauschverhältnis durchgeführt werden kann. Für ältere Anlagen ohne Sensoren sind für die Nachrüstung geeignete Konstruktionen einzusetzen.

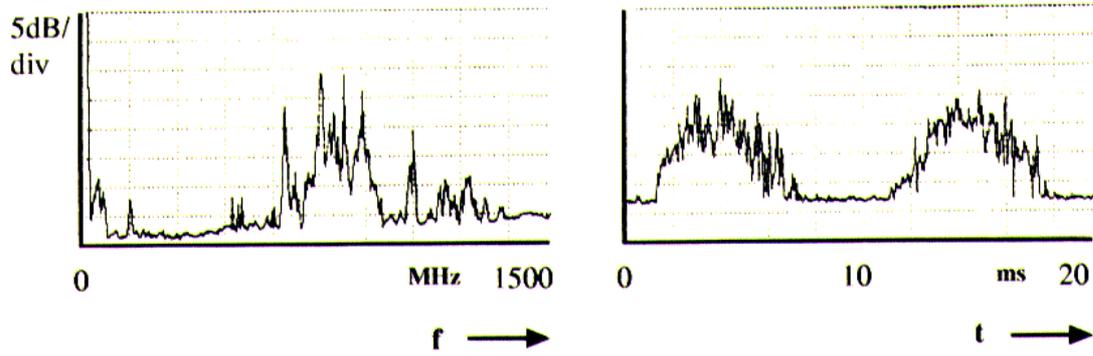
#### 4.4.2 Erfassung und Identifizierung der TE-Signale

Zur Erprobung der UHF-Methode wurden Versuche durchgeführt, bei denen verschiedene bekannte TE verursachende Fehler in die mit SF<sub>6</sub> gefüllte Anlage eingebracht wurden. Das Sondersignal wurde vom Spektrumanalysator aufgezeichnet und der Teilentladungseinsatz kann deutlich erkannt werden (**Bilder 4.32**).

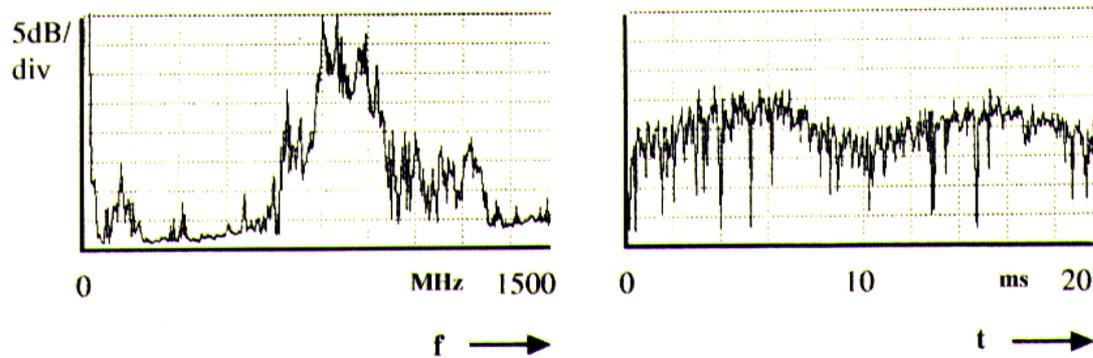
Um die Fehlerquelle zu identifizieren, wird meist eine "point-on-wave (POW)"-Messung durchgeführt. Dabei wird die Teilentladungsaktivität mit einer im positiven Nulldurchgang getriggerten Periode der Netzspannung überlagert [Hampton 85/88, Pearson 91; Sellars 92/93, Hanai 93]. Typische Fehler zeigen sich wie folgt (**Bilder 4.32** und **4.33**) [CIGRÉ 92]:

- (a) Feste (z.B. nadelförmige) Störstellen auf dem Hochspannungsleiter führen zu Teilentladungen im Maximum der negativen Halbwelle, denen bei Spannungssteigerung Teilentladungen im Spannungsmaximum der positiven Halbwelle folgen. Für eine Verunreinigung an der Kapselung verhält es sich genau umgekehrt, aber im allgemeinen ist die Differenz zwischen positiver und negativer TE-Einsatzspannung nur sehr klein.
- (b) Frei bewegliche Teilchen, die sich langsam und unkontrolliert in der Schaltanlage bewegen, erzeugen eine eher zufällig über den Spannungsverlauf verteilte Teilentladungsaktivität.
- (c) Potentialfreie Teile können anhand ihres Teilentladungseinsatzes im Anstieg der positiven Halbwelle und im fallenden Teil der negativen Halbwelle erkannt werden. Der Teilentladungsausschlag ist hierbei wesentlich höher als in den Fällen (a) und (b).

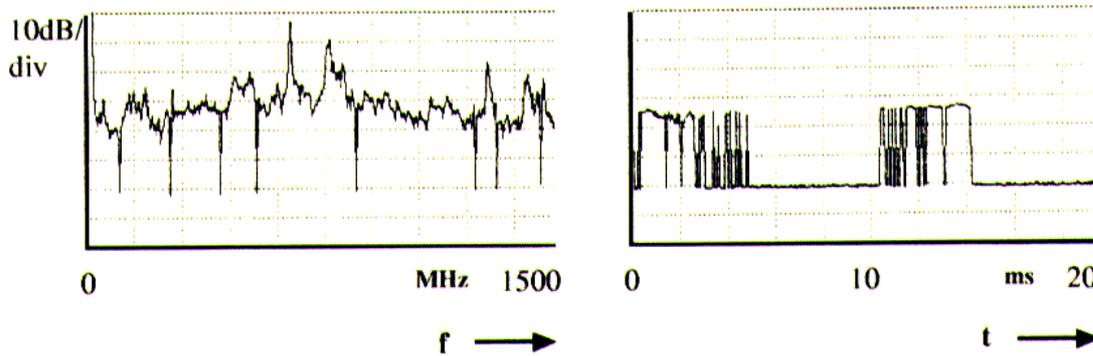
Bei der konventionellen TE-Messung wird die Intensität der Teilentladung üblicherweise als scheinbare Ladung in pC angegeben. Die UHF-Methode ist eine relative Messung. Die Meßergebnisse werden deshalb in Abhängigkeit vom Pegel am Sensor in dB bzw. in der Leistungseinheit dBm dargestellt. 0 dBm ist definiert als 1 mW bei 50 Ω, der Eingangsimpedanz der üblichen Spektrumanalysatoren [Hampton 88 und 92].



(a) UHF-TE-Meßsignal einer Nadel auf Hochspannungspotential



(b) UHF-TE-Meßsignal freibeweglicher Teilchen



(c) UHF-TE-Meßsignal potentialfreier Teile

**Bilder 4.32:** Frequenzspektrum **Bilder 4.33:** "point-on-wave" bei einer festen Frequenzen

beide Bilder nach [CIGRÉ 92]

#### 4.4.3 Lokalisierung der TE-Quelle

Der Impuls einer Teilentladung breitet sich in beide Richtungen der GIS entlang der Sammelschiene mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  aus. Die Fehlerstelle kann mit Hilfe der Differenz der Laufzeit des Impulses zu den beiden Sonden gefunden werden, wenn die Zuleitungen zu den Sonden identisch sind. Die Laufzeitbestimmung kann so vorgenommen werden, daß beide Sensoren an ein Zweikanal-Oszilloskop angeschlossen werden, auf den zuerst eintreffenden Impuls getriggert und beim Eintreffen des zweiten Impulses die Zeitdifferenz  $t$  zwischen Impuls 1 und Impuls 2 bestimmt wird. Weiterhin muß die Entfernung  $L$  zwischen Sonde 1 und Sonde 2 entlang der Mittellinie der Schaltanlagenkapselung bekannt sein. Aus diesen Daten läßt sich die Entfernung vom Sensor, der den Impuls zuerst registriert hat, zur Fehlerstelle nach Gleichung (4.20) bestimmen:

$$x = \frac{1}{2} \cdot (L - c_0 \cdot t). \quad (4.20)$$

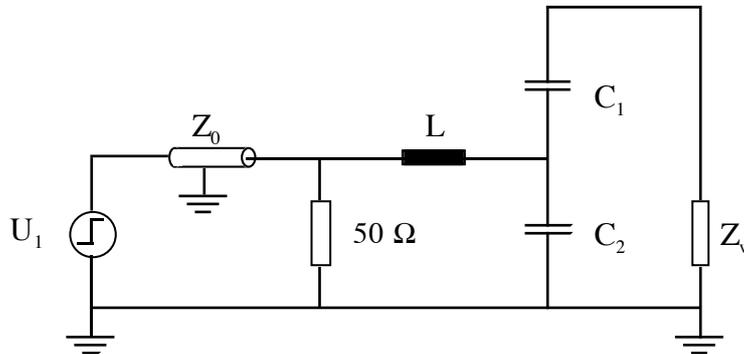
Bei einem Fehler der Zeitdifferenzmessung von  $\pm 1$  ns kann die Teilentladungsquelle bis auf  $\pm 0,15$  m genau lokalisiert werden. Dieses gilt nicht nur für kurze, gerade Schaltanlagenabschnitte, sondern auch für längere Schaltanlagen mit vielen T-Stücken und Krümmungen. Dort sind jedoch mehrere Messungen nötig, da in der berechneten Entfernung von der Sonde in der Regel mehrere Punkte als Teilentladungsquellen in Frage kommen.

Eine geringfügig höhere Genauigkeit läßt sich erreichen, wenn statt der physikalischen Länge zwischen den beiden Sonden die elektrische Länge berücksichtigt wird, welche effektiv größer als die physikalische Länge ist [Pack 93]. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Wellen in den Sammelschienenträgern ist nach  $c = c_0 / \sqrt{\epsilon_r}$  aufgrund der unterschiedlichen Permittivität um den Faktor  $\sqrt{\epsilon_r}$  kleiner als die Geschwindigkeit  $c_0$  im Gas. Die Laufzeit der Welle durch den Träger wird durch die geringere Wellengeschwindigkeit größer, so daß sich die elektrische Länge erhöht. Eine Korrektur der Gleichung (4.20) kann mit dieser Erkenntnis abgeschätzt werden.

#### 4.4.4 Kalibrierung der Meßanordnung

Zur Kalibrierung einer TE-Messung werden mit Hilfe von Kalibriergeneratoren Stromimpulse einer definierten Ladung  $q$  in die GIS eingespeist. Die zur Kalibrierung eines konventionellen TE-Meßkreises verwendeten Kalibriergeneratoren erzeugen Stromimpulse mit einer Dauer von einigen zehn Nanosekunden und besitzen ein Amplitudendichtespektrum mit einer Grenzfrequenz unterhalb von 10 MHz. Damit sind diese Kalibriergeneratoren nicht geeignet, einen TE-Meßkreis mit einer unteren Grenzfrequenz der Sonde von einigen 100 MHz, zu kalibrieren. Ohne Kenntnis des genauen zeitlichen Verlaufs des Kalibriersignals kann aber keine Relation zur Ladung hergestellt werden.

Um Stromimpulse sehr viel kürzerer Dauer im Bereich von 100 ps in die Anlage einzuspeisen, wird ein Kabelimpulsgenerator eingesetzt, der die Impulse über eine Sonde in die Anlage einspeist, wobei die Sonde als Kalibriersignalquelle benutzt wird. Dabei wird ein Spannungssprung über ein 50 Ω-Koaxialkabel mit einem 50 Ω Abschlußwiderstand auf die Reihenschaltung aus der Induktivität L und der Niederspannungskapazität C<sub>2</sub> der Sonde eingespeist [ETG 89] (**Bild 4.34**).



**Bild 4.34:** Ersatzschaltung der Kalibrieranordnung

Der Spannungssprung erzeugt in der Hochspannungskapazität C<sub>1</sub> der Sonde einen Stromimpuls i<sub>1</sub> mit der Gesamtladung q, der in das Rohrleitersystem der GIS mit dem Wellenwiderstand Z<sub>w</sub> eingepreßt wird. Der für eine bestimmte Ladung q benötigte Wert des Spannungssprungs U<sub>1</sub> berechnet sich nach Gleichung (4.21) zu

$$U_1 = \frac{q}{C_1} \quad . \quad (4.21)$$

Eine Kalibrierung wird dann möglich, wenn in der GIS in einer Phase mindestens zwei Sonden vorhanden sind. An der ersten Sonde wird eine definierte Ladung q über die Hochspannungskapazität C<sub>1</sub> in die Schaltanlage eingebracht. Der Stromimpuls i<sub>1</sub> induziert in der GIS eine Wanderwelle, welche nach der entsprechenden Laufzeit eine zweite Sonde erreicht und hier ausgekoppelt wird. Man erhält den Verlauf des zeitlich differenzierten Stromimpulses i<sub>1</sub>, der zum Vergleich mit dem Ausgangssignal noch integriert werden muß [Baumgartner 92]. Mit dem eingespeisten und dem gemessenen Signal können die Linearität, die Frequenzabhängigkeit und die Umkehrbarkeit überprüft werden. Nach erfolgter Kalibrierung kann eine Korrektur der Zeitdifferenzmessung und die Auswahl einer geeigneten Meßfrequenz vorgenommen werden.

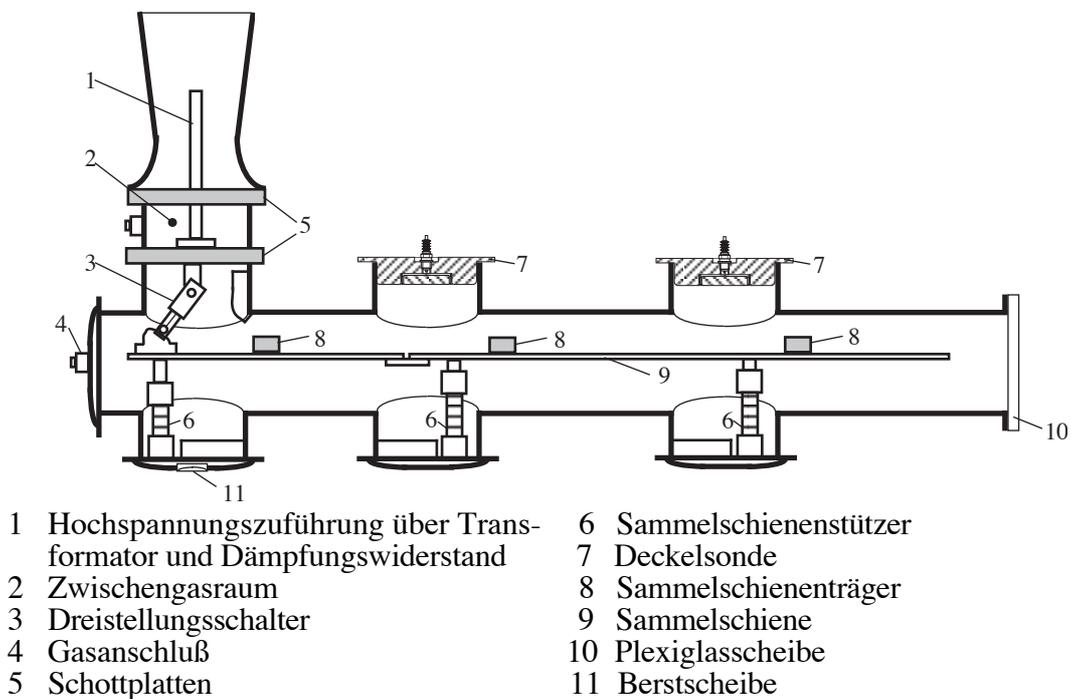
#### 4.4.5 Beschreibung der Versuchsanlage zur Simulation der TE-Signale

Die grundlegenden Betrachtungen dieses Abschnitts dienen dem besseren Verständnis des Verlaufes von Teilentladungssignalen in gekapselten Schaltanlagen. Ziel ist es, ein geeignetes Modell der Schaltanlage zur Simulation der Ausbreitung von TE-Signalen zu erstellen. Dazu werden die einzelnen Komponenten einer GIS-Anlage mit ihren geometrischen Größen durch elektrische Parameter nachgebildet oder, je nach dem Einfluß auf das TE-signal, vernachlässigt.

Mit Hilfe dieses Ersatzschaltbildes können dann Fehlerfälle simuliert werden, so daß das Zeit- und Frequenzverhalten der Schaltanlage im Bezug auf TE-Signale beurteilt werden kann. Die meßbaren TE-Signale werden durch Wanderwellenvorgänge in der Anlage bestimmt und hängen vom Aufbau der Anlage mit ihren Brechungs- und Reflexionsstellen und dem Ort der Messung ab [König 86].

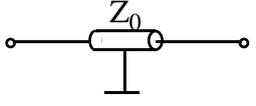
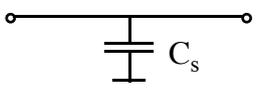
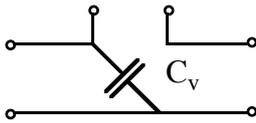
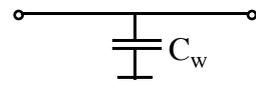
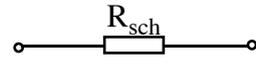
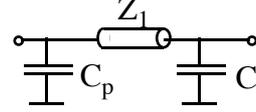
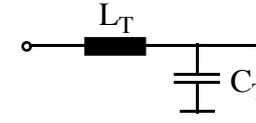
Die Simulation ist um so aussagekräftiger, je besser das Anlagen-Ersatzschaltbild den hochfrequenten Bereich erfaßt. Hochfrequenztaugliche Ersatzschaltbilder können darüber hinaus eine Grundlage für die Teilentladungsortung in räumlich ausgedehnten Anlagen bilden. Voraussetzung für eine Simulation mit großer Genauigkeit ist die exakte Erfassung und Nachbildung des physikalischen Verhaltens aller Betriebsmittel [Völker 93].

Für die Untersuchungen des TE-Verhaltens stand ein Teil einer Mittelspannungs-Schaltanlage zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um eine einpolig gekapselte GIS mit Einfachsammlerschiene. Den Aufbau der untersuchten Anlagenkonfiguration zeigt **Bild 4.35**.



**Bild 4.35:** Aufbau der Schaltanlage

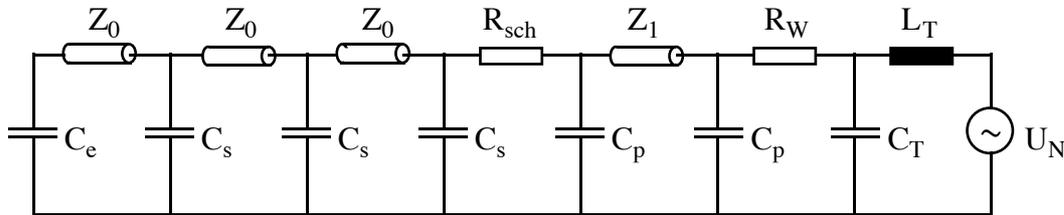
Für diese Anlagenkonfiguration, deren einzelne Komponenten durch konzentrierte Elemente  $R$ ,  $L$  und  $C$  bzw. durch lauffzeitbehaftete Elemente  $Z$  und  $\tau$  nachgebildet werden können, wurde ein Ersatzschaltbild erstellt [Peier 88]. Dieses ESB ist später die Grundlage für die Simulation mit dem Netzwerkanalyseprogramm PSpice. In der folgenden **Tabelle 4.7** sind die in dieser Anordnung auftretenden Anlagenkomponenten und die dazu äquivalenten Bauelemente aufgeführt. Unstetigkeiten der Leitung treten besonders bei Stützern, Verzweigungen und Winkelstücken auf.

Sammelschiene / Rohrleitung	
Stützer	
Verzweigungen	
Winkelstücke	
Dreistellungsschalter, geschlossen	
Kopplungsstelle	
Hochspannungstransformator	

**Tabelle 4.7:** Anlagenkomponenten mit Netzelementen [Peier 88, CIGRÉ 88]

Mit diesen Netzelementen wird das Ersatzschaltbild, entsprechend dem inneren Aufbau der  $SF_6$ -Schaltanlage, in Abschnitte unterschiedlicher Längen, also in Abschnitte unterschiedlicher Laufzeiten, aufgeteilt.

Außerhalb der Schaltanlage ist zum Schutz des Prüftransformators ein Wasserwiderstand als Dämpfungswiderstand eingefügt. Da der Dämpfungswiderstand und der Transformator das Verhalten der Anordnung entscheidend beeinflussen, sind sie im Ersatzschaltbild in **Bild 4.36** dargestellt.



**Bild 4.36:** Ersatzschaltbild der Schaltanlage

#### 4.4.6 Berechnung der Ersatzschaltbildelemente

Neben der sorgfältigen Wahl geeigneter Nachbildungsmodelle ist für die Berechnung der Ausbreitung des TE-Signals auch die Genauigkeit der Ersatzschaltbildelemente von großem Einfluß. Die Berechnung der Daten dieser Ersatzschaltbildelemente kann zum Teil nur mit Kenntnis der exakten Schaltanlagenabmessungen erfolgen. Die Bauelemente werden, soweit es sich nicht um konzentrierte Elemente bekannter Größe handelt, aus der Geometrie der Anlagenkonfiguration bestimmt [Lührmann 81]. Im folgenden werden die Nachbildungsmodelle aller Ersatzschaltbildelemente aus Tabelle 4.7 beschrieben und berechnet.

#### Sammelschiene/ Rohrleiter

Die Induktivität der Leiteranordnung besteht aus der inneren Induktivität der Leiter und der äußeren Induktivität des Rohrleiters. Für einen runden Leiter nimmt die Induktivität mit zunehmender Frequenz aufgrund der Stromverdrängung im Leiter schnell ab, d.h. sie wird im Hochfrequenzbereich sehr klein und kann vernachlässigt werden:

$$L_i \approx \frac{R_0}{2\pi f} \left( \frac{r_i}{2\delta} \right)^2. \quad (4.22)$$

mit  $R_0$ : Gleichstromwiderstand  
 $f$ : Frequenz  
 $r_i$ : Leiterradius  
 $\delta$ : Eindringtiefe

Die äußere Induktivität besteht aus einem konstanten Anteil für den Zwischenraum und einem frequenzabhängigen Anteil für den Rohrleiter. Die Auswirkung der Frequenz und des Skineffektes auf den frequenzabhängigen Anteil ist dieselbe wie bei der Leiterinduktivität. Deshalb reduziert sich der frequenzabhängige Anteil mit zunehmender Frequenz auf einem vernachlässigbaren Wert, so daß die gesamte Induktivität als konstant angenommen werden kann [Sun 91]:

$$L \approx \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i}. \quad (4.23)$$

mit  $\mu_0$ : magnetische Feldkonstante  
l: Länge des Rohrleiters  
 $r_a$ : Rohrradius  
 $r_i$ : Leiterradius

Da die Kapazität des Rohrleiters ebenfalls eine frequenzunabhängige Größe darstellt, kann die GIS-Leitung mit einem Wellenwiderstand  $Z_0$  und der dazugehörigen Laufzeit unabhängig von der Frequenz nach Gleichung (4.24) nachgebildet werden [Nührmann 89]. Die Rohrleiter der Schaltanlage bestehen aus einem Rohr, in dem eine flache Sammelschiene verläuft. Sie haben damit einen Wellenwiderstand  $Z_0$  von ca. 95  $\Omega$ . Die Dämpfung ist in gasisolierten Rohrleitern so klein, daß sie nicht berücksichtigt werden muß [Imgrund 88].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \approx 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot D_i}{a + b} \Omega = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 22 \text{ cm}}{9 \text{ cm}} \Omega = 95 \Omega \quad (4.24)$$

mit  $D_i$ : Innendurchmesser des Außenleiters  
a: Höhe der Sammelschiene  
b: Breite der Sammelschiene

Unter der Voraussetzung, daß sich Wellen in Gas mit der Geschwindigkeit  $c_0$ , der Vakuumlichtgeschwindigkeit, ausbreiten, kann die jeweilige Laufzeit mit Gleichung (4.25) berechnet werden.

$$\tau = \frac{l}{c_0} \quad (4.25)$$

mit l: Länge des jeweiligen Rohrleiterabschnittes in [m]  
 $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

## Stützer

Die Kapazität der in der Anlage verwendeten Stützisolatoren wurde mit Hilfe der Schering-Brücke zu  $C = 2,8 \text{ pF}$  bestimmt. Da diese gemessene Kapazität aber nicht alle für das Simulationsverhalten der Schaltanlage wichtigen Einflüsse berücksichtigt, wird die Stützerkapazität mit einer aus der Literatur [Peier 88; Sun 91] bekannten Näherung bestimmt. Danach können die in der Anlage verwendeten Stützer als Scheibenstützer im homogenen Dielektrikum betrachtet werden. Die Scheiben sind von parallelen Ebenen begrenzt und müssen den Leitungsquerschnitt vollständig ausfüllen. In einer solchen Scheibe entspricht das Feldlinienbild dem der übrigen Leitung. Damit kann die Scheibe als verlustfreier Vierpol angesehen werden, und durch eine konzentrierte Kapazität  $C_s$  ersetzt werden.

Wählt man eine mittlere Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  und berechnet damit die Stützerkapazität, so ergibt sich mit Gleichung (4.24) eine Kapazität von etwa  $8,4 \text{ pF}$ .

$$C_s = d \cdot \frac{(\epsilon_r - 1)}{c_0 \cdot Z_0} \approx 8,4 \text{ pF} \quad (4.26)$$

mit  $d = 6 \text{ cm}$   
 $\epsilon_r = 5$   
 $Z_0 = 95 \text{ } \Omega$

## Verzweigungen

An einer Verzweigung treffen mehrere Leitungen zusammen. In Tabelle 4.7 ist als Beispiel das Zusammentreffen von drei konzentrischen Leitungen mit gleichen Wellenwiderständen betrachtet. Das physikalisch zweckmäßige Ersatzschaltbild ist eine einfache Querkapazität, die zwischen Verbindungspunkt und Außenleiter eingesetzt wird. Die Berechnung dieser Querkapazität  $C_v$  erfolgt nach [Peier 88] mit

$$C_v \approx -0,1 \cdot D_a \cdot \frac{\text{pF}}{\text{cm}} \approx -2,5 \text{ pF} \quad (4.27)$$

mit  $D_a$ : Außendurchmesser des Außenleiters in cm.

Das negative Vorzeichen drückt einen "Kapazitätsabschlag" im Verzweigungspunkt aus. Dieser ist nötig, weil der Außenleiter der ankommenden Leitungen im Verzweigungspunkt unvollständig ist, und die Annahme eines konstanten Wellenwiderstandes bis zum Verzweigungspunkt in diesem Bereich auch einen Kapazitätsbelag der homogenen Leitung unterstellt. Da aufgrund des besonderen Versuchsaufbaus die in der Schaltanlage vorkommenden Verzweigungen kaum eine Abweichung von der idealen, zylindrischen Form des Rohrleiters darstellen und die ermittelte Querkapazität  $C_v$  sehr klein ist, kann ihr Einfluß vernachlässigt werden.

### **Winkelstücke**

Winkelstücke dienen dem Richtungswechsel der Leitung und werden als symmetrischer, verlustfreier Vierpol, bestehend aus einer Kapazität, nachgebildet. Ein Winkelstück stellt einen Sonderfall der Verzweigung dar und wird mit einer konstanten Kapazität  $C_w$  nachgebildet, die ebenfalls vernachlässigt werden kann.

### **Dreistellungsschalter, geschlossen**

Ein geschlossener Dreistellungsschalter in einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage kann vereinfacht durch seinen ohmschen Widerstand  $R_{sch}$  dargestellt werden, der die Wellenausbreitung in der Schaltanlage bedämpft [Sun 91]. Der gemessene Widerstandswert dieses Schalters betrug  $R_{sch} = 3 \Omega$ .

### **Kopplungsstelle**

An einer Kopplungsstelle zwischen Schaltanlage und äußerer Beschaltung, z.B. an einer Hochspannungsdurchführung oder an einem Kabelendverschluß, werden die an dieser Stelle ankommenden Wellen vom Innenraum nach außen zum Erdsystem gekoppelt und beeinflussen damit den transienten Verlauf im Inneren der Schaltanlage [Sun 91].

Während ein Kabelanschluß mit dem entsprechenden Wellenwiderstand einfach nachgebildet werden kann, handelt es sich bei der Kopplung über eine z.B. mit Gas gefüllte Durchführung um einen komplizierteren Fall. Die Durchführung selbst besteht aus einem Innenleiter und dem Gehäuse. Die Nachbildung erfolgt dann durch die Induktivität  $L_d$  des Leiters in der Durchführung und die konzentrierte Kapazität  $C_d$  als Erdkapazität der Durchführung. Dadurch werden das Innensystem und das Erdsystem elektrisch miteinander verbunden.

Der Aufbau der Spannungszuführung der untersuchten Schaltanlage stellt keine handelsübliche Ausführung dar, sondern wurde für diese Untersuchung speziell gefertigt. Damit ergibt sich das Problem, daß weder von einem Kabelendverschluß, noch von einer Durchführung im Sinne der Literatur gesprochen werden kann. Beide Modelle bilden das Verhalten an der Kopplungsstelle nicht ausreichend genau nach. Die bestmögliche Nachbildung wird erreicht, wenn die Schottplatten aus Epoxidharzformstoff mit Kapazitäten und der Zwischengasraum mit dem entsprechenden Wellenwiderstand nachgebildet werden. Zur Bestimmung des elektrischen Kennwertes der Schottplatten wurden diese, wie bei den Stützern, als homogene Scheibe betrachtet. Nach Gleichung (4.29) wird dann die Plattenkapazität  $C_p$  berechnet.

$$C_p = h_1 \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{c_0 \cdot Z_0} \approx 9 \text{ pF} \quad (4.29)$$

mit  $h_1 = 4 \text{ cm}$   
 $\epsilon_r = 5$   
 $Z_0 = 60 \text{ } \Omega$

Der Wellenwiderstand des Zwischengasraumes  $Z_i$  berechnet sich nach Gleichung (4.30) zu:

$$Z_i = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 60 \cdot \ln \frac{D_i}{d_1} \text{ } \Omega \approx 60 \text{ } \Omega \quad (4.30)$$

mit  $D_i$ : Innendurchmesser des Außenleiters  
 $d_1$ : Breite des Spannungszuführungsrohres

Die Laufzeit einer Welle im Zwischengasraum kann mit Gleichung (4.31) bestimmt werden.

$$\tau_1 = \frac{h_2}{c_0} = \frac{0,09 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 300 \text{ ps} \quad (4.31)$$

mit  $h_2$ : Länge des Zwischengasraumes

### Hochspannungstransformator

Transformatoren lassen sich in den meisten Fällen durch das einfache R,L,C-Ersatzschaltbild hinreichend genau beschreiben [Imgrund 88]. Dabei werden die Kurzschlußinduktivität  $L_T$ , der Verlustwiderstand  $R_T$  und die an den äußeren Klemmen wirksame Erdkapazität  $C_T$  berücksichtigt. Da der Verlustwiderstand  $R_T$  im Vergleich zur Kurzschlußreaktanz  $X_T$  zu vernachlässigen ist (das Verhältnis  $R/X$  ist sehr klein), ist die Kurzschlußreaktanz näherungsweise gleich der Kurzschlußimpedanz  $Z_T$  und kann mit Gleichung (4.32) aus den Transformatoraten berechnet werden. Mit Kenntnis dieser Größe läßt sich nach Gleichung (4.33) die Kurzschlußinduktivität des Transformators berechnen.

$$X_T \approx Z_T = \frac{u_k}{100 \%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{3,8 \%}{100 \%} \cdot \frac{(100 \text{ kV})^2}{5 \text{ kVA}} = 76 \text{ k}\Omega \quad (4.32)$$

mit  $u_k$ : Kurzschlußspannung  
 $U_N$ : Nennspannung  
 $S_N$ : Nennleistung

$$L_T = \frac{X_T}{\omega} = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{76 \text{ k}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 242 \text{ H} \quad (4.33)$$

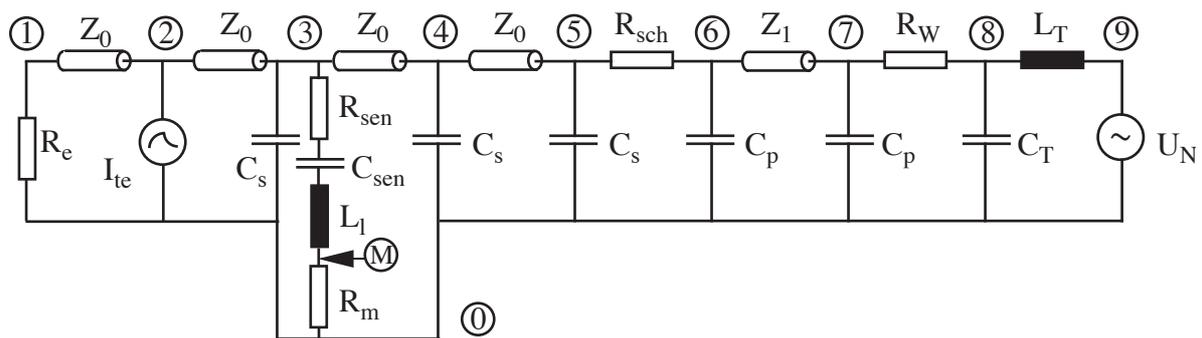
bei 50 Hz Betriebsfrequenz

Die Erdkapazität  $C_T$  des Transformators wurde meßtechnisch ermittelt und beträgt 200 pF. Zur Kurzschluß-Strombegrenzung des Prüftransformators wurde zwischen Hochspannungsdurchführung und Transformator ein Dämpfungswiderstand  $R_w = 50 \text{ k}\Omega$  geschaltet.

#### 4.4.7 Simulation mit dem Netzwerkanalyseprogramm PSpice

Das Netzwerkanalyseprogramm PSpice ermöglicht eine schnelle und effektive Berechnung aller interessierenden Größen einer gegebenen Schaltung sowie deren Umsetzung in eine graphische Darstellung. Für die durchzuführenden Simulationsrechnungen wurden Teilentladungen an einer bekannten ortsfesten Fehlerstelle angenommen. Dieses Vorgehen erleichtert die Zuordnung der Ausgleichsvorgänge zu dem entsprechenden TE-Impuls, der mit Hilfe eines Impulsgenerators (TE-Stromquelle) oder einer am Sammelschienenträger montierten Nadel nachgebildet wird.

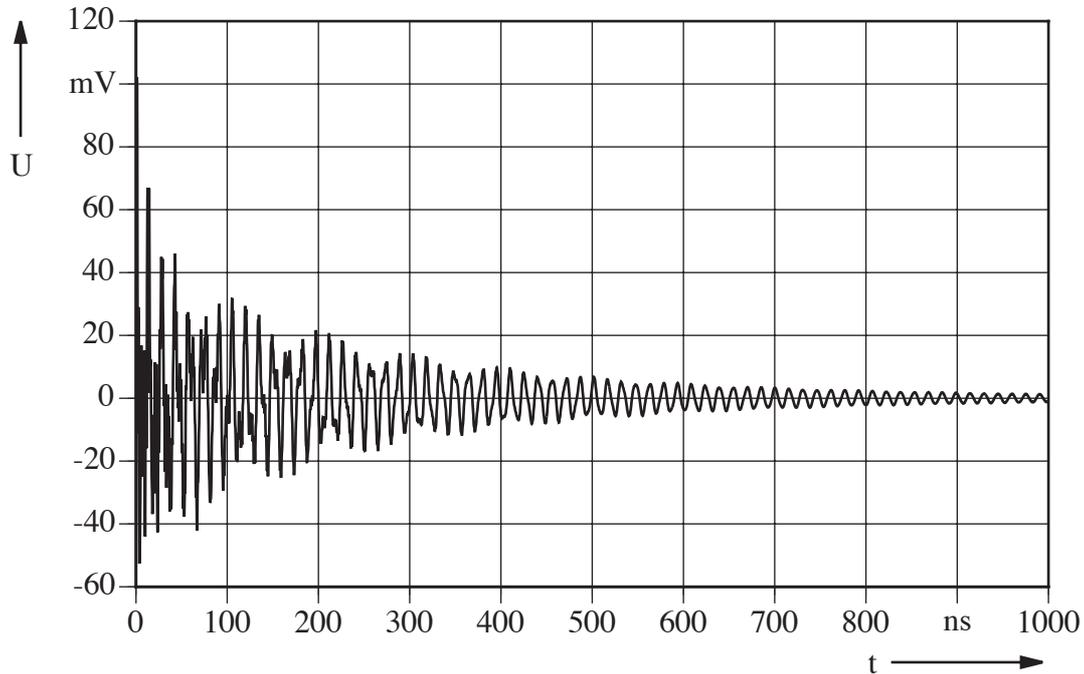
Die Berücksichtigung der eingespeisten Impulse bzw. der Teilentladungen durch die am Sammelschienenträger angebrachte Nadel erfordert eine Veränderung des Ersatzschaltbildes nach Bild 4.36. Die Laufzeit zum zugehörigen Wellenwiderstand  $Z_0$  muß für den entsprechenden Sammelschienenabschnitt links und rechts von der TE-Quelle betrachtet und in zwei Teile aufgeteilt werden. Unter Annahme einer Fehlerstelle am linken Sammelschienenträger ergibt sich das Ersatzschaltbild nach **Bild 4.37**.



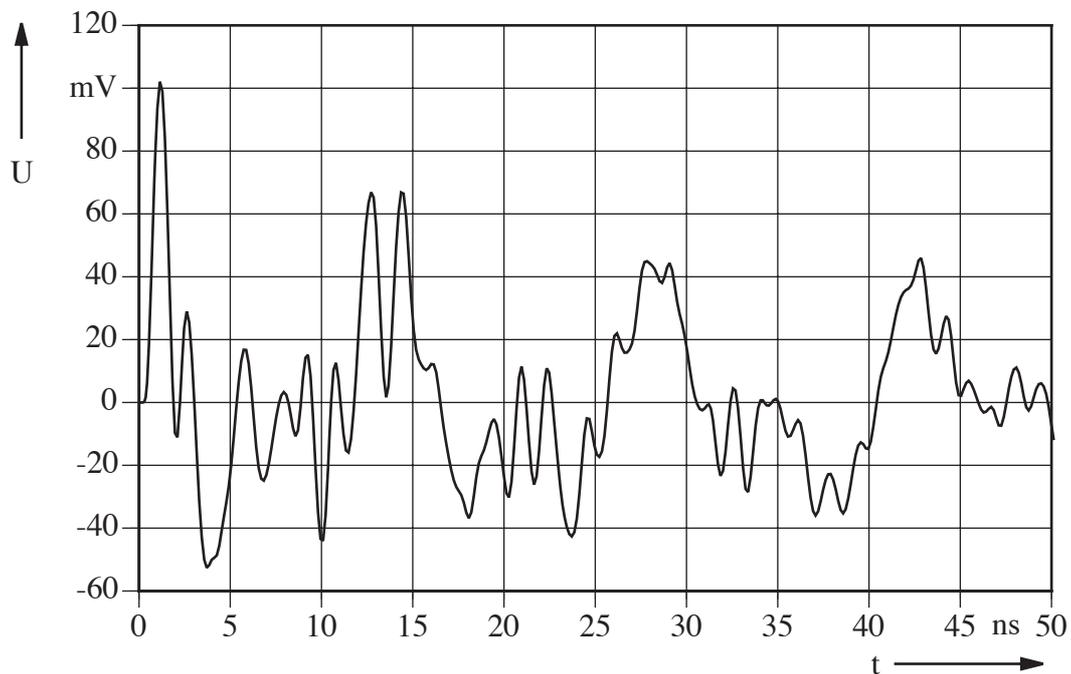
mit	① - ⑨	Netzwerkknoten	$C_p$	Plattenkapazität
	$R_e$	Abschlußwiderstand	$C_T$	Transformatorkapazität
	$I_{te}$	TE-Stromquelle	$Z_0$	Wellenwiderstand Rohrleiter
	$C_s$	Stützerkapazität	$R_{sch}$	Schalterwiderstand
	$R_{sen}$	Sensorwiderstand	$Z_1$	Wellenwiderstand Zwischengasraum
	$C_{sen}$	Sensorkapazität	$R_w$	Wasserwiderstand
	Ⓜ	Meßpunkt	$L_T$	Transformatorinduktivität
	$R_m$	Meßwiderstand		

**Bild 4.37** Ersatzschaltbild der Schaltanlage zur Simulation der Messung von Teilentladungen am linken Sammelschienenträger

In den **Bildern 4.38 a, b** ist der Spannungsverlauf am Punkt M als Antwort auf einen am Punkt 2 injizierten TE-Stromimpuls dargestellt.



**Bild 4.38 a:** Spannungsverlauf am Punkt M

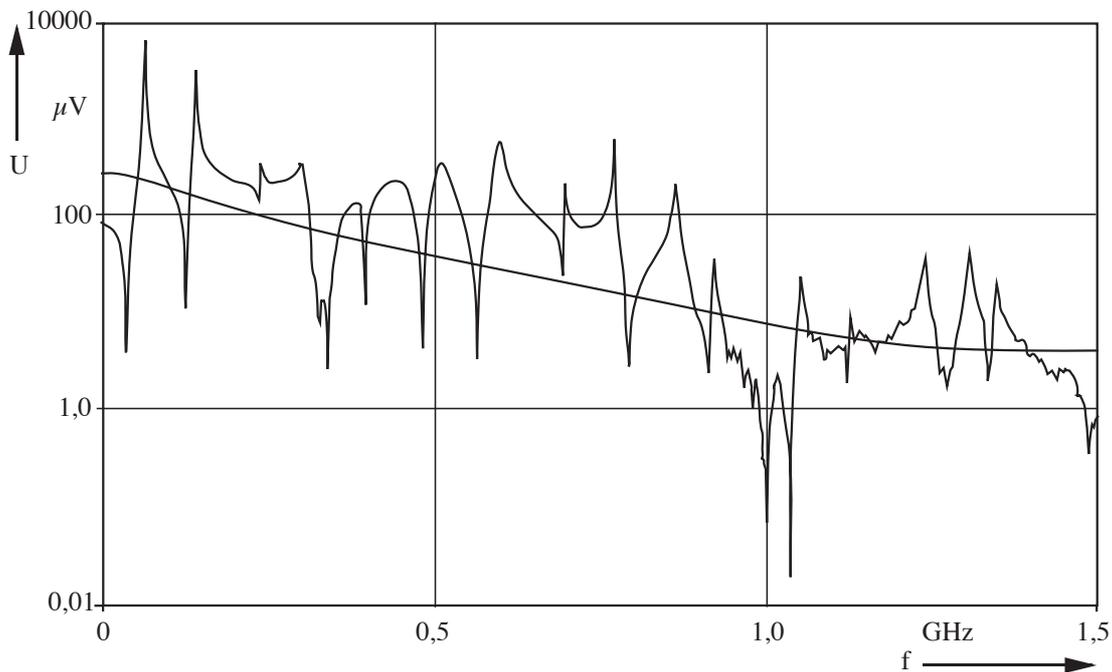


**Bild 4.38 b:** Spannungsverlauf am Punkt M (Ausschnitt der ersten 50 ns)

Anhand des Spannungsverlaufes in Bild 4.38 b lässt sich die Ausbreitung des TE-Signales nachvollziehen. Der am Punkt 2 eingespeiste Impuls erreicht nach einer Laufzeit von 275 ps die Kopplerstelle 3 und verursacht einen ersten Spannungssprung; der nächste findet nach 1,775 ns statt. Während dieser Zeit läuft der Impuls bis zum Schaltanlagenende 1, wird dort reflektiert und erreicht den Punkt 3, hat also insgesamt die Strecke 2-1-2-3 zurückgelegt.

Zeitlich geordnet folgt dann der Impuls mit der Wegstrecke 2-3-2-1-2-3. Die Impulse werden nicht nur am Schaltanlagenende sondern auch an den Stützern reflektiert. Verfolgt man die Wege der Impulse unter Berücksichtigung aller denkbaren Reflektionen, so lassen sich über die Laufzeiten in der Anlage die Zeiten der Sprünge der Meßspannung ermitteln.

Der in Bild 4.38 a dargestellte Spannungsverlauf wurde einer Fourieranalyse (**Bild 4.39**) unterzogen. Zum Vergleich ist das Frequenzspektrum eines unverzerrten Teilentladungsimpulses dargestellt. Die durch Stromimpulse simulierte Teilentladungen verursachen erhöhte Spektralanteile im Bereich 0,5-1 GHz. Diese Spektralanteile ermöglichen eine TE-Detektion im UHF-Bereich.

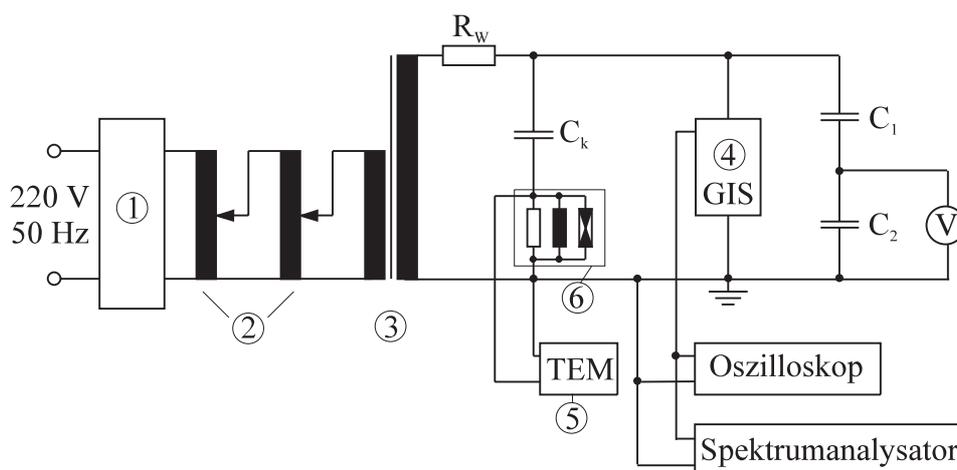


**Bild 4.39:** Frequenzspektrum im Frequenzbereich von 0 - 1,5 GHz

In der Praxis variieren, abhängig vom Fehler in der Schaltanlage, Impulshöhe und -dauer der Teilentladungen. Die verschiedenen Impulsformen haben Auswirkungen auf den Zeitverlauf des simulierten Meßsignals. Die Höhe des eingespeisten Impulse beeinflusst direkt die Amplitude der Meßspannung, verändert den Verlauf selbst jedoch nicht. Beim Vergleich unterschiedlicher Impulslängen wurde deutlich, daß der Einfluß der Überlagerung einzelner Reflexionen um so stärker wird, je länger der eingespeiste Impuls ist. Durch die Überlagerung wird der Verlauf der Meßspannung stark verändert und es entstehen höhere TE-Signalamplituden.

#### 4.4.8 Versuchsaufbau

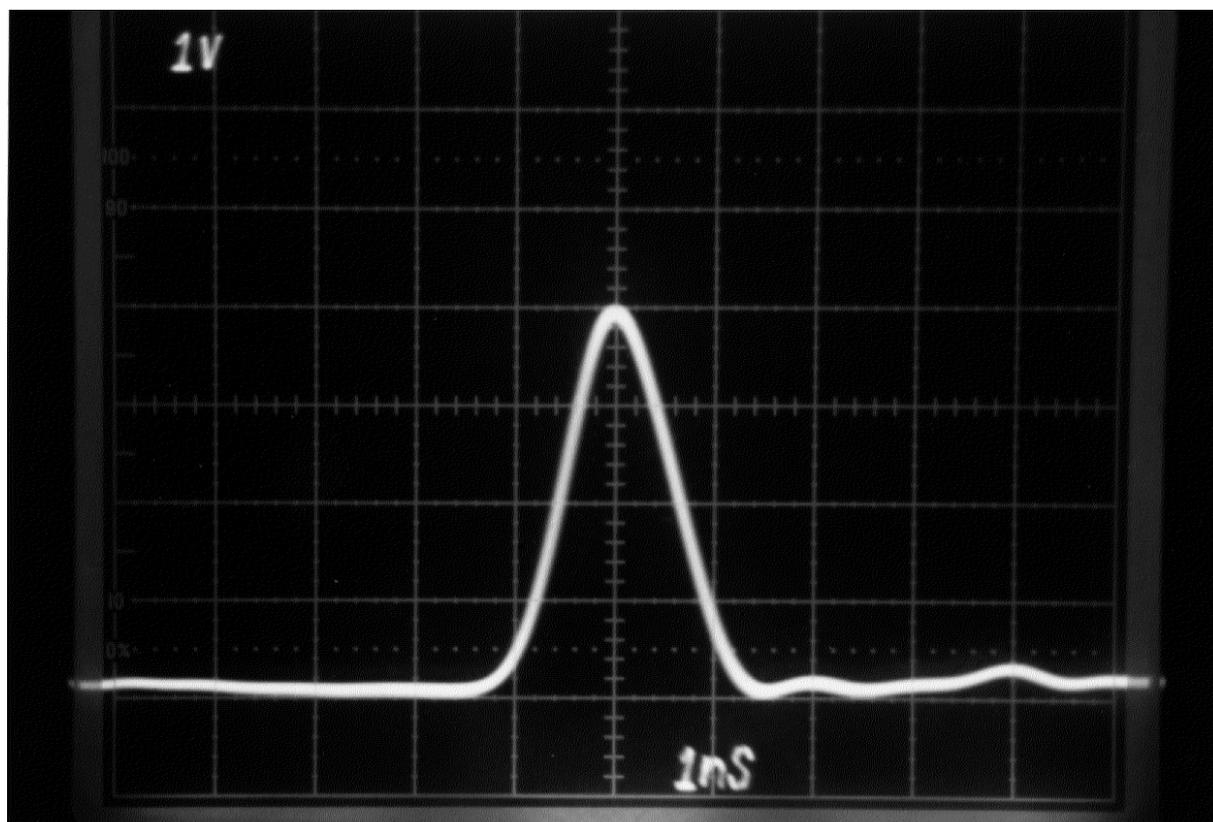
Der Versuchsaufbau entspricht der in Kapitel 4.3.8 beschriebenen Konfiguration. Zur Nachbildung von Teilentladungen innerhalb der Schaltanlage wurde ein Impulsgenerator verwendet. Die Messungen wurden mit einem breitbandigen Oszilloskop und einem Spektrumanalysator vorgenommen. Das Schaltbild des Versuchsaufbaus ist in **Bild 4.40** dargestellt.



- |   |                    |       |                            |
|---|--------------------|-------|----------------------------|
| 1 | Zellenschutz       | 6     | Ankopplungsvierpol         |
| 2 | Stelltrafo         | $R_w$ | Dämpfungswiderstand        |
| 3 | Hochspannungstrafo | $C_k$ | Koppelkondensator          |
| 4 | Schaltanlage       | $C_1$ | Oberspannungskondensator   |
| 5 | TE-Meßgerät        | $C_2$ | Niederspannungskondensator |

**Bild 4.40:** Versuchsaufbau zur TE-Messung im UHF-Bereich

Die in der Schaltanlage auftretenden TE-Impulse haben Anstiegs- und Abfallzeiten im Bereich von 100 ps. Die Nachbildung dieser Signale erfolgte mit einem Impulsgenerator mit einer minimalen Anstiegszeit von 300 ps und einer Amplitude von maximal 45 V. Der in **Bild 4.41** dargestellte Impuls wurde als Standardimpuls für alle Messungen verwendet. Er hat eine Amplitude von 40 V und eine Ladung von 800 pC.



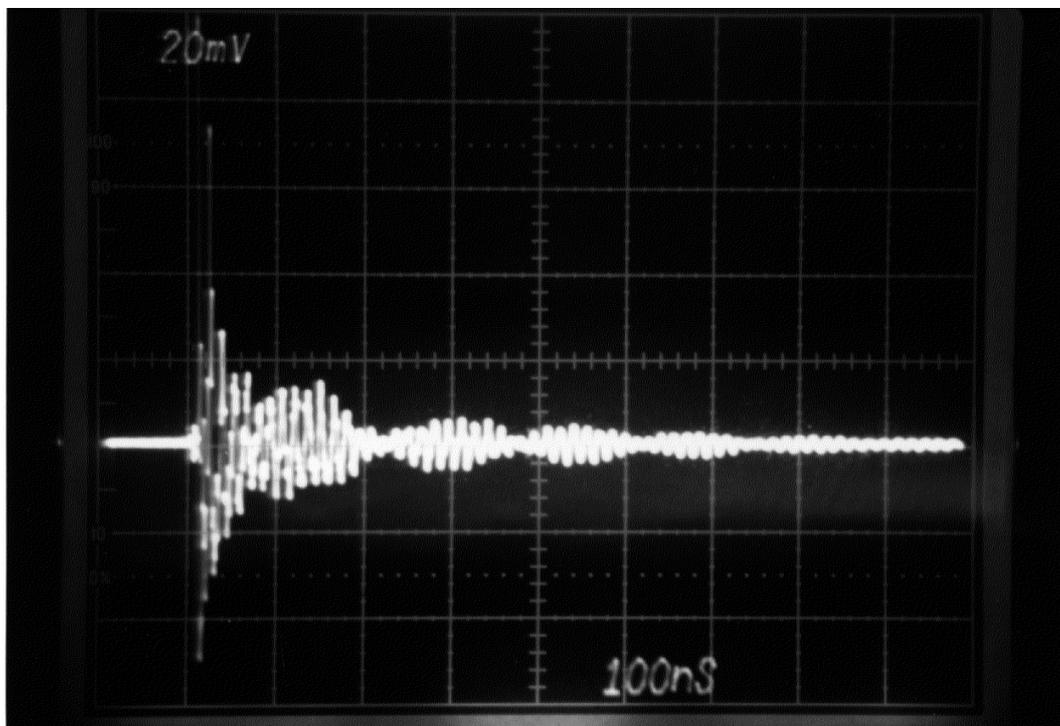
**Bild 4.41:** Einzelimpuls des Impulsgenerators

Das Frequenzspektrum wurde mit einem Spektrumanalysator direkt gemessen. Die folgenden Messungen wurden im Frequenzbereich bis 1,5 GHz bei einer Auflösung von 1 MHz und einem Referenz-Level -30 dBm durchgeführt.

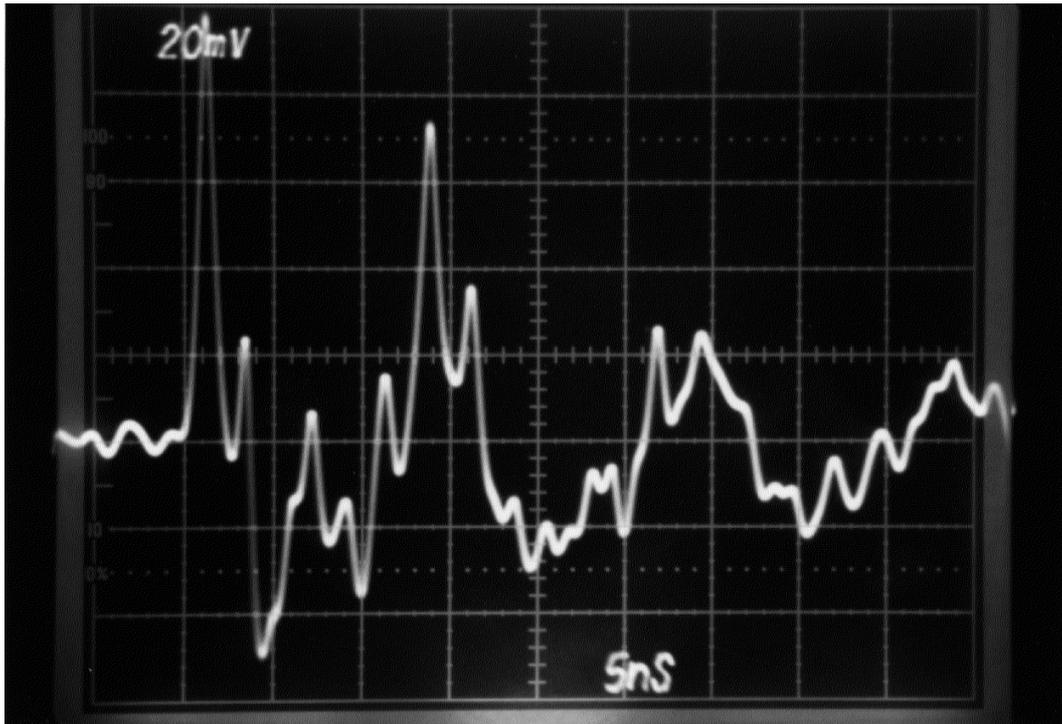
#### 4.4.9 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Messungen der Spannungsverläufe im Zeitbereich sollen Aufschluß über den Verlauf und die maximalen Amplituden der Signalspannung in der Schaltanlage geben. Am Punkt 3 wird das Signal über die Meßsonde ausgekoppelt und mit dem Oszilloskop gemessen. **Bild 4.42 a** zeigt die Systemantwort auf den injizierten Standardimpuls im Zeitbereich von 0 - 1  $\mu$ s; in **Bild 4.42 b** ist derselbe Spannungsverlauf im Bereich von 0 - 50 ns dargestellt, so daß Reflexions- und Brechungsvorgänge nachvollzogen werden können.

Das für die Messungen der Wanderwellenvorgänge verwendete Oszilloskop hat eine Bandbreite von 500 MHz. Damit ergibt sich nach der Beziehung  $\tau = 0,35/B$  die minimale Eigenanstiegszeit von  $\tau = 700$  ps [Wolf 63; Witzmann 87]. Das Oszilloskop ist also nicht in der Lage, die schnellen Impulse des Impulsgenerators mit Anstiegszeiten von 300 ps exakt wiederzugeben. Dennoch wird der prinzipielle Verlauf mit den maximalen Amplituden dargestellt. Daraus kann auf Reflexions- und Brechungsvorgänge in der Schaltanlage geschlossen werden.



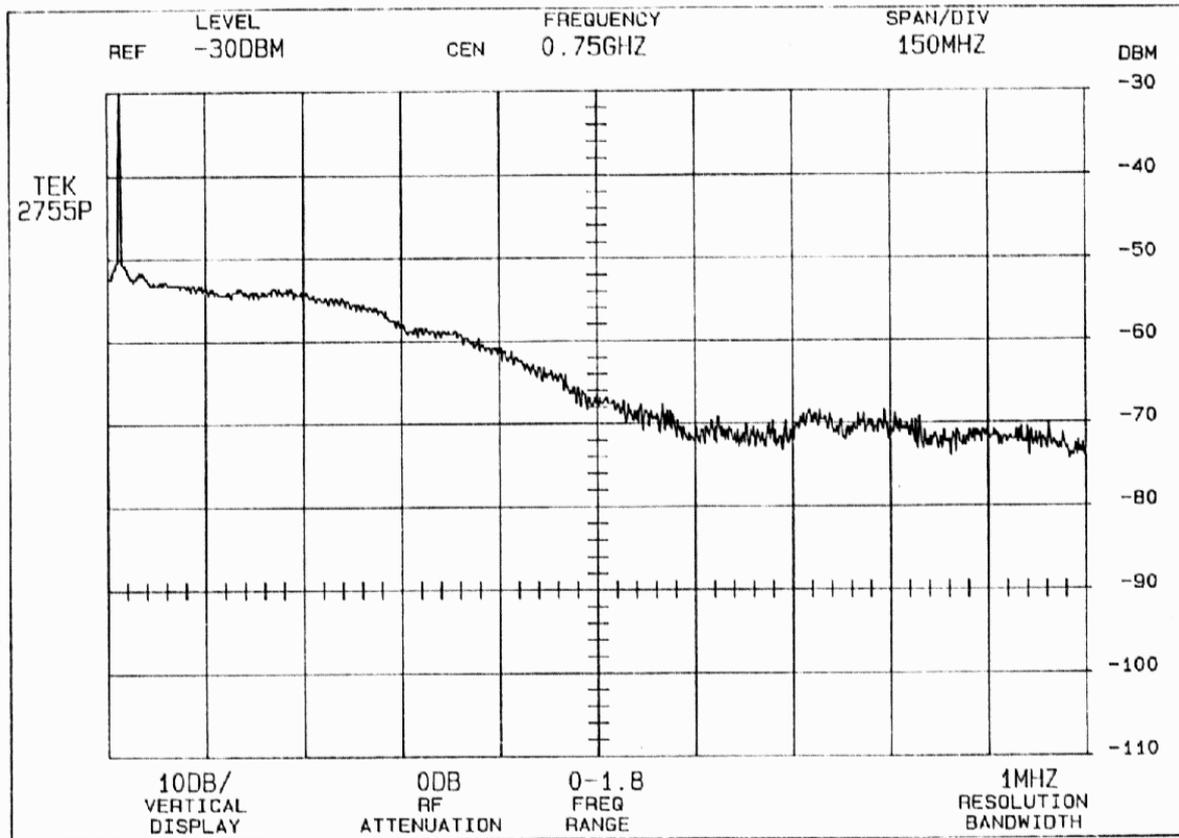
**Bild 4.42 a:** Spannungsverlauf am Punkt M



**Bild 4.42 b:** Spannungsverlauf am Punkt M (Ausschnitt der ersten 50 ns)

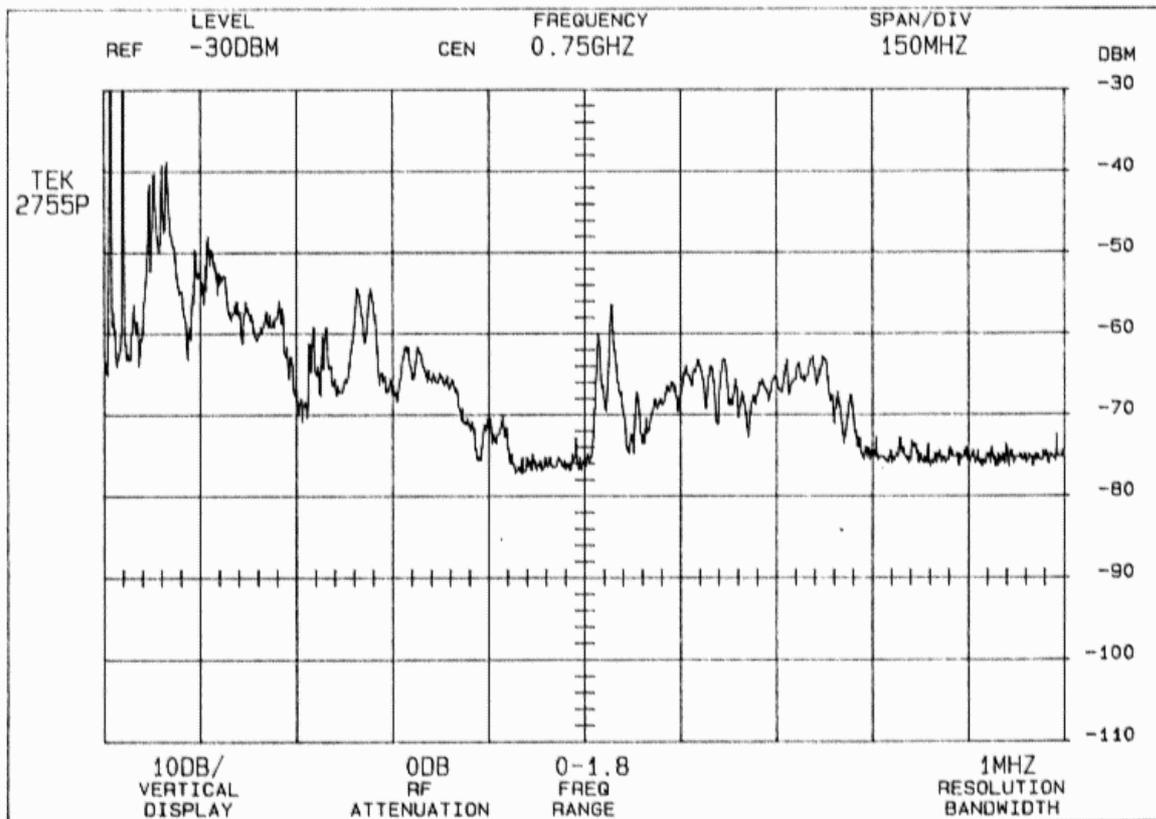
Die Meßergebnisse im Zeitbereich zeigen, daß die Auskopplung der Einschwingvorgänge mit der entwickelten Deckelsonde möglich ist und ein ausreichend starkes Signal übertragen wird. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation im Zeitbereich ergibt eine gute Übereinstimmung der Signalverläufe. Dem ersten Impuls mit einer Amplitude von 100 mV folgt nach 3 ns ein kleinerer von 25 mV, nach etwa 3,5 ns wird das Minimum von -50 mV erreicht. Die Lage der Maxima und Minima stimmt exakt mit der Simulation überein. Die Dämpfung des Signals ist aber bei der Messung etwas größer als bei der Simulation. Die Realität wird durch das einfache Ersatzmodell mit verlustlosen Leitungsabschnitten und Kapazitäten zur Nachbildung der Stützer und Schottplatten nicht genau genug nachgebildet. Eine Verbesserung erfordert die Einführung frequenzabhängiger Dämpfungen für die einzelnen Bauteile, die in PSpice nicht realisierbar ist [Kurrer 96-2].

Zur Überprüfung der Funktion des Frequenzanalysators und als Referenzspektrum für die nachfolgenden Messungen wurde zu Beginn das Frequenzspektrum des eingespeisten Standardimpulses aufgezeichnet (**Bild 4.43**).



**Bild 4.43:** Frequenzspektrum des eingespeisten Standardimpulses (Referenzspektrum)

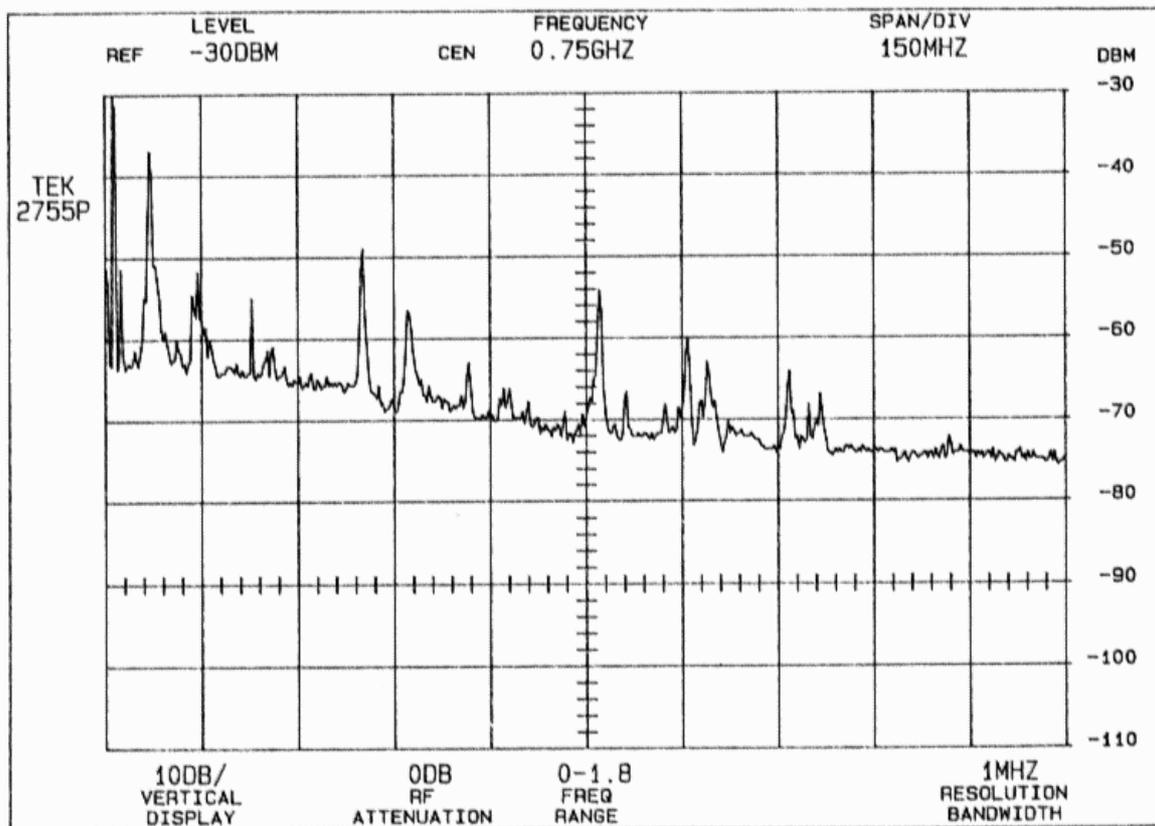
Der Standardimpuls des Impulsgenerators wird an der Nadel am linken Sammelschienenträger eingespeist und das Frequenzspektrum der Anlage über die Meßsonde am Punkt M und den Teiler (Teilverhältnis 100:1) mit Hilfe des Spektrumanalysators aufgenommen. Der Frequenzverlauf der Simulation nach Bild 4.39 weist Unterschiede im gegenüber der Messung auf, die aus den Ungenauigkeiten des Rechenmodells resultieren. Außerdem wird bei der Messung nicht das Frequenzspektrum der Systemantwort eines einzelnen Impulses dargestellt. Mit dem Spektrumanalyser werden nacheinander die Maximalwerte der einzelnen Spektralanteile gemessen („max-hold-Funktion“). Für die Messung des gesamten Spektrums sind also eine Vielzahl von Impulsen einzuspeisen. Dennoch wird das Auftreten signifikanter Spektralanteile im UHF-Bereich bestätigt. Ähnlich wie beim berechneten Frequenzspektrum fallen in **Bild 4.44** besonders die hohen Pegel im Bereich zwischen 0,75 und 1,2 GHz auf, mit denen auch unter vor Ort Bedingungen Teilentladungen in der Schaltanlage sicher nachgewiesen werden können.



**Bild 4.44** Frequenzspektrum bei Einspeisung des Standardimpulses in die spannungsfreie Schaltanlage

Anders als die Messungen in den vorhergehenden Abschnitten wurden die anschließenden Messungen unter Betriebsbedingungen, also unter Hochspannung und mit SF<sub>6</sub>-Füllung, durchgeführt. Als anregende Impulse wurden die an einer künstlichen Fehlerstelle (Nadel am linken Sammelschienenenträger) bei einer Spannung von 40 kV auftretenden TE-Impulse verwendet. Es handelt sich also um echte Teilentladungen mit einer gemessenen Ladung von 8 pC. Die Ladung eines Impulses ist also 100 mal kleiner als die Ladung des Impulsgenerators. Deshalb wurde das mit der Meßsonde ausgekoppelte Signal über einen Verstärker (30 dB, obere Grenzfrequenz 700 MHz) zum Spektrumanalysator geführt. Das Frequenzspektrum der Messung ist in **Bild 4.45** dargestellt.

Wieder sind die durch Teilentladungen verursachten Spektralanteile zwischen 0,75 und 1,2 GHz deutlich zu erkennen. Aufgrund der eingeschränkten Bandbreite des Verstärkers werden die Frequenzen oberhalb von 700 MHz weniger verstärkt, so daß die maximalen Amplituden in diesem Frequenzbereich zu klein sind. Ein Vergleich dieses Meßergebnisses mit der Simulation (Bild 4.39), die über den gesamten Frequenzbereich die vollen Amplituden aufweist, läßt dennoch eine gute Übereinstimmung erkennen.



**Bild 4.45:** Frequenzspektrum bei TE-Erzeugung durch Hochspannung

Beim Vergleich mit dem Frequenzspektrum nach Bild 4.44 (ohne Hochspannung und Isoliergasfüllung) fallen in Bild 4.45 die wesentlich stärker ausgeprägten Spitzen auf. Genau wie bei der Simulationsrechnung gibt es bei der TE-Erzeugung durch Hochspannung je ein Maximum bei 0,8 GHz, 0,9 GHz, 0,95 GHz und 1,1 GHz. Der Verlauf ähnelt dem Ergebnis der Simulationsrechnung mehr als dem Ergebnis bei Einspeisung des Standardimpulses. Die Anlage wird durch das Rechenmodell gut nachgebildet.

#### 4.4.10 Zusammenfassung der Untersuchungen zur UHF-Teilentladungsmessung

Im Rahmen der Untersuchung zur Teilentladungsmessung mit der UHF-Methode wurde ein Simulationsmodell zur Nachbildung von Teilentladungsvorgängen an einer SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen untersucht, bei dem neben der genauen Nachbildung der Ersatzschaltbildparameter auch die sorgfältige Auswahl der TE-Impulsdaten notwendig ist.

- Die als Sensorelektrode eingesetzten Sonden im Verschlußdeckel verhalten sich im UHF-Bereich wie eine Ringspaltantenne und müssen im Rechenmodell mit dem entsprechenden Ersatzschaltbild eingefügt werden.

- Die TE-Impulsform hat einen großen Einfluß auf das Ergebnis der Simulationsrechnung. Teilentladung können durch doppeltexponentielle Stromimpulse nachgebildet werden.

Unter Annahme eines optimierten TE-Impulses erfolgte die Berechnung des Zeit- und Frequenzverlaufes, aus denen folgende grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden konnten:

- Die Analyse im Zeitbereich ermöglicht einen Überblick über den zu erwartenden Spannungsverlauf. Diesem können anhand der auftretenden Extrema und Spannungssprünge die Reflexions- und Brechungsstellen in der Schaltanlage zugeordnet werden.
- Die Höhe des eingespeisten Impulses beeinflusst direkt die Amplitude des Spannungsverlaufes, verändert jedoch den zeitlichen Verlauf nicht.
- Je länger der eingespeiste Impuls ist, desto höher sind die durch Überlagerungen verursachten maximalen Amplituden im zeitlichen Verlauf.
- Die Analyse im Frequenzbereich zeigt, daß die durch Stromimpulse simulierten TE-Impulse durch Spektralanteile im GHz-Bereich nachzuweisen sind.

Für eine Analyse ist die genaue Kenntnis der durch Teilentladungen hervorgerufenen Signalverläufe in der Schaltanlage erforderlich. Deshalb wurden die Zeitverläufe und deren Frequenzspektren in der GIS mit einer Sensorelektrode gemessen. Ein Vergleich der gemessenen und der simulierten Verläufe und Frequenzspektren lieferte folgende Ergebnisse:

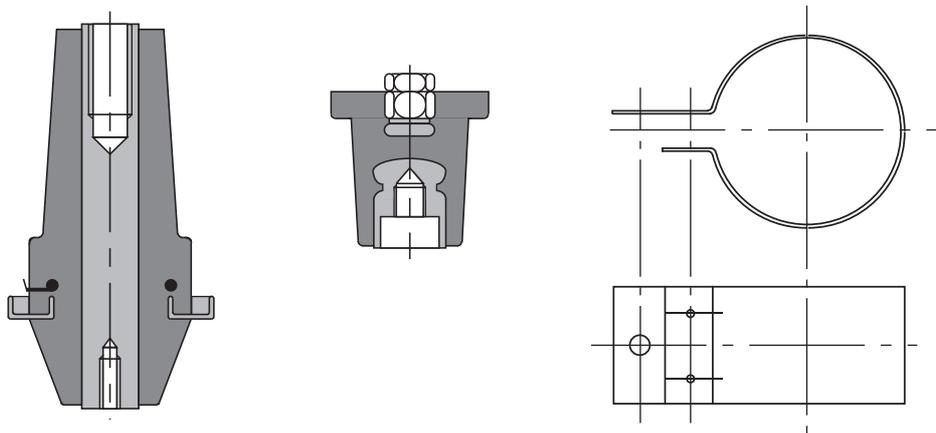
- Die Kalibrierung einer TE-Messung im UHF-Bereich mit einem Impulsgenerator ist nicht allgemein, sondern nur für einen Fehlertyp an einem bestimmten Ort einer Mittelspannungsschaltanlage möglich.
- Die Zeitpunkte der Maxima und Wendepunkte sind identisch, der Verlauf des Meßspannung ist ähnlich. Reflexions- und Brechungsstellen lassen sich aus dem Zeitverlauf des Meßsignals entnehmen.
- Der Teilentladungseinsatz ist im GHz-Bereich deutlich sichtbar. Die TE-Messung im UHF-Bereich kann auch kleinste Teilentladungen in der untersuchten Schaltanlage erfassen.
- Die Amplituden und der Frequenzbereich, in denen Teilentladungen durch Messung des Spektrums nachgewiesen werden können, stimmen mit denen der Simulation überein.
- Die durch Teilentladungen verursachten Spektralanteile sind in der Mittelspannungsschaltanlage höherfrequent als bei Hochspannungsschaltanlagen.
- Die Teilentladungsmessung im UHF-Bereich läßt sich für die untersuchte Mittelspannungsschaltanlage für Inbetriebnahmeprüfungen und zur TE-Überwachung im Betrieb anwenden.

## 4.5 Teilentladungsmessung zur vor Ort Prüfung einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Erfassung von Teilentladungen in einer silikonisolierten Sammelschiene unter vor Ort Bedingungen. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei die Realisierung eines Meßsystems zur Auskopplung der Teilentladungen sowie deren Ortung in der untersuchten Sammelschiene.

### 4.5.1 Beschreibung der Meßgeräte zur differentiellen TE-Messung

Die TE-Signale wurden von in Durchführungen oder Schraubeinsätzen eingearbeitete Sensoren und von extern montierten Schellen erfasst (**Bild 4.46**).



**Bild 4.46:** Sensoren zur TE-Auskopplung

Für die Teilentladungsmessungen an der Sammelschiene unter vor Ort Bedingungen wird zur Verbesserung der Meßempfindlichkeit und zur Unterdrückung äußerer Störungen das Prinzip eines differentiellen Meßaufbaus eingesetzt.

Bei der differentiellen Teilentladungsmessung gehört neben einem Meßzweig, über den die inneren Teilentladungen ausgekoppelt werden, auch ein Vergleichszweig zum Meßaufbau. Der Vergleichszweig, in dem sich eine Vergleichskapazität befindet, muß vor der Messung auf seine Teilentladungsfreiheit überprüft werden. Ist dieser teilentladungsfrei, sind die nach der Differenzbildung von Meß- und Vergleichswert gemessenen Signale Teilentladungen im Prüfling.

Um den Vergleichskondensator dimensionieren zu können, muß zuerst die Koppelkapazität im Meßzweig bestimmt werden. Zur rechnerischen Bestimmung der Koppelkapazität von Durchführungssensor und Schraubeinsatz dient Gleichung (4.32):

$$C = \epsilon_r \cdot \text{Maßstabsfaktor} \cdot C_{LE}. \quad (4.32)$$

Dabei hat  $C_{LE}$  die Bedeutung der sogenannten Lufteinheitskapazität und ist von den geometrischen Abmessungen der Anordnung abhängig. Die Berechnung der Kapazitäten für Kugel- und Zylinderanordnungen erfolgt bei Benutzung der Lufteinheitskapazität  $C_{LE}$  nach den Gleichungen (4.33) und (4.34).

$$\text{- Kugelanordnung} \quad C = \varepsilon_r \cdot r \cdot C_{LE}, \quad (4.33)$$

$$\text{- Zylinderanordnung} \quad C = \varepsilon_r \cdot l \cdot C_{LE}, \quad (4.34)$$

mit  $r$ : Radius der kleineren Kugel,  
 $l$ : Länge der Zylinderanordnung,  
 $\varepsilon_r$ : rel. Dielektizitätszahl des Mediums zwischen den Elektroden.

Für die Durchführung errechnet sich unter der Annahme eines zylinderförmigen Aufbaus die Kapazität der Anordnung zu:

$$C = 5,3 \cdot 1,65 \frac{\text{pF}}{\text{cm}} \cdot 0,5 \text{ cm} = 4,37 \text{ pF}.$$

Für den Schraubeinsatz dient zur Berechnung der Kapazität eine Kugel-Kugel-Ersatzanordnung, so daß sich ein Wert von

$$C = 5,3 \cdot 0,925 \frac{\text{pF}}{\text{cm}} \cdot 1,6 \text{ cm} = 7,84 \text{ pF}$$

errechnet.

Zur Überprüfung der errechneten Werte wurde eine Kapazitätsmessung mit einer Scheringbrücke durchgeführt. Die meßtechnische Bestimmung der Kapazität einer Durchführung ergab einen Wert von:

$$C_x = \frac{100,33 \text{ pF} \cdot \frac{100}{\pi} \Omega}{730 \Omega + 0,8 \Omega} = 4,37 \text{ pF}.$$

Der gemessene Wert für einen Schraubeinsatz beträgt:

$$C_x = \frac{100,33 \text{ pF} \cdot \frac{100}{\pi} \Omega}{405 \Omega + 0,2 \Omega} = 7,88 \text{ pF}.$$

Der Vergleich von rechnerisch ermittelten Werten und den meßtechnisch bestimmten Kapazitäten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Für die Messungen wird ein Vergleichskondensator verwendet, der einer Prüfanordnung für Isolierflüssigkeiten nach VDE 0370 Teil 5 entspricht. Der Vergleichskondensator ist infolge der sehr homogenen Elektrodenanordnung mit einem Schwaigerschen Ausnutzungsfaktor von  $\eta = 0,97$  teilentladungsfrei. Zur Berechnung der Kapazitätswerte des Vergleichskondensators dient wieder die Gleichung (4.33). Der gewünschte Wert für den Vergleichskondensator läßt sich über eine Abstandsänderung der Elektrodenanordnung einstellen. In der nachfolgenden **Tabelle 4.8** sind die Werte der Lufteinheitskapazität  $C_{LE}$ , der Abstand  $s$  und die jeweils gewünschte Kapazität der Anordnung für die Durchführung und den Schraubeinsatz dargestellt.

	Durchführung	Schraubeinsatz
Kapazität pF	4,37	7,84
Lufteinheitskapazität pF/cm	0,795	1,426
Abstand mm	30	2

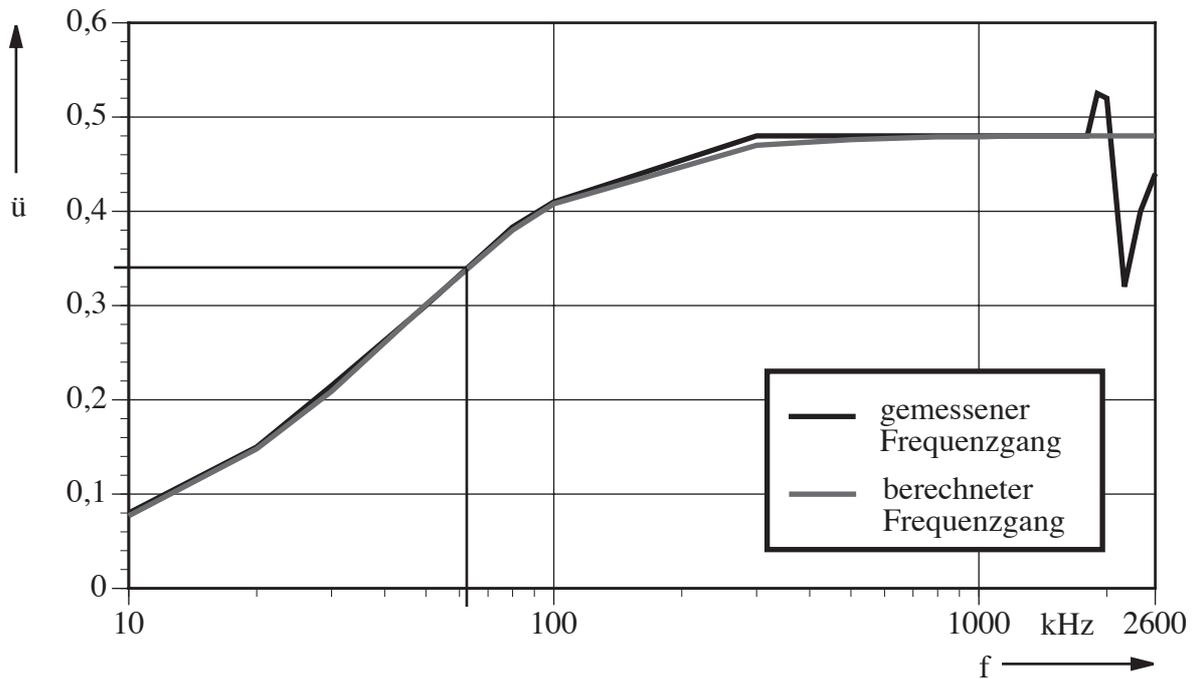
**Tabelle 4.8:** Übersicht über die Schlagweiten der Elektrodenanordnung des Vergleichskondensators

Komplizierter stellt sich die Ermittlung der Ersatzdaten einer extern montierten Schelle dar. Bei dieser Art der Auskopplung kann nicht mehr von einem rein kapazitiven Ersatzschaltbild ausgegangen werden kann. Aus dem bei Speisung mit Wechselspannung bei verschiedenen Frequenzen ermittelten Werten für das Übersetzungsverhältnis und der 3 dB - Grenzfrequenz können die Ersatzdaten für einen Vergleichszweig ermittelt werden:

$$\ddot{u} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (4.35)$$

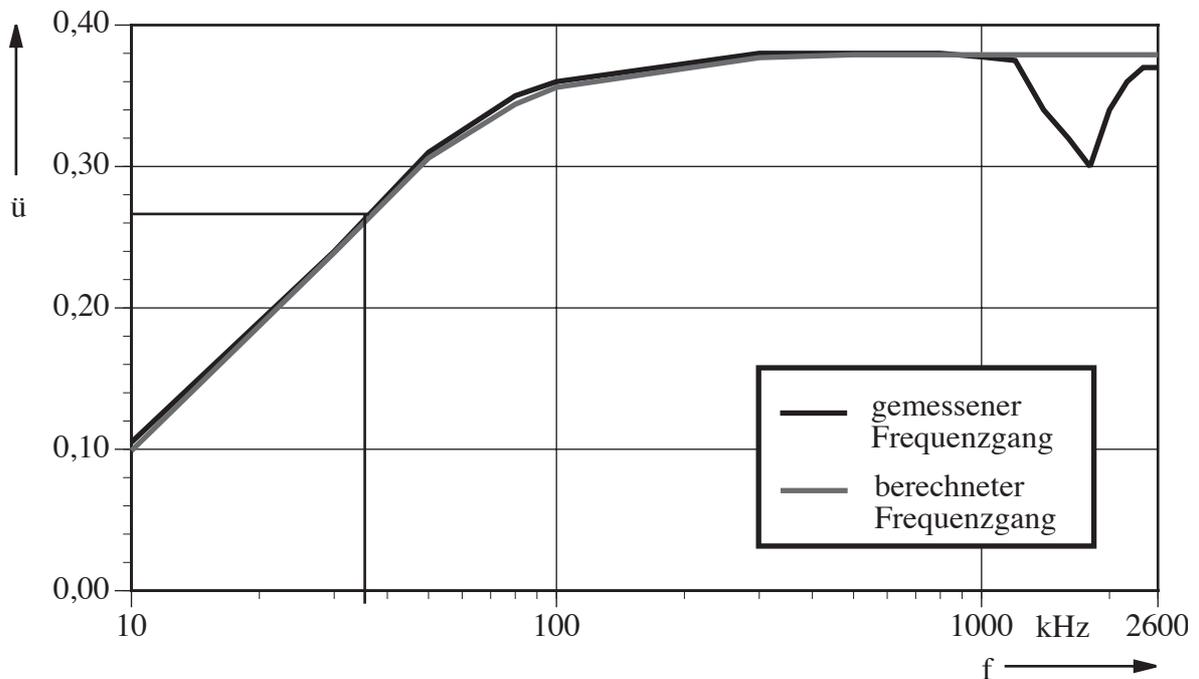
$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2)}. \quad (4.36)$$

Die Messung des Frequenzgangs bei Auskopplung an einem Kreuzadapter mit einer Sekundärkapazität von 170 pF ergibt für den Horizontal verlaufenden Bereich ein Übersetzungsverhältnis von 0,48, die 3 dB - Grenzfrequenz ist 62 kHz (**Bild 4.47a**). Die daraus berechneten Ersatzelemente sind eine Kapazität zwischen der Meßelektrode und dem Leiter von 157 pF und ein Widerstand von 7,85 k $\Omega$ .



**Bild 4.47a:** Frequenzgang der Übersetzung eines Kreuzadapters

Die entsprechende Messung des Frequenzgangs für einen Endadapter ergibt für den horizontal verlaufenden Bereich ein Übersetzungsverhältnis von 0,38 und eine 3 dB - Grenzfrequenz von 37 kHz (**Bild 4.47b**). Daraus ergibt sich rechnerisch eine Kapazität von 104,2 pF und ein Widerstand von 15,7 k $\Omega$ .



**Bild 4.47b:** Frequenzgang der Übersetzung eines Endadapters

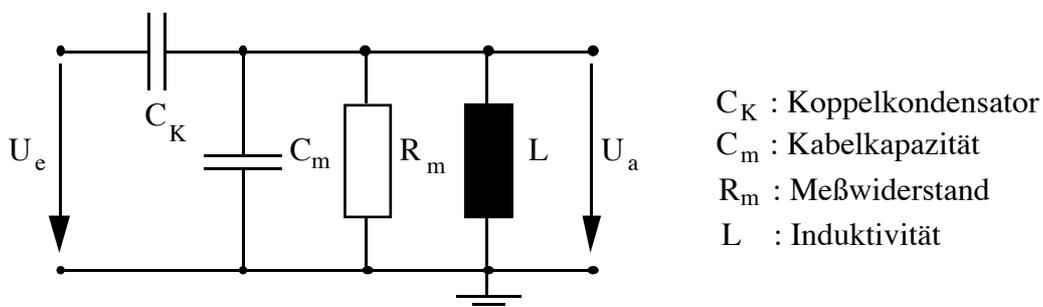
Berechnung und Messung der Frequenzgänge des Übersetzungsverhältnisses stimmen bis zu einer Frequenz von 1 MHz gut überein. Bei höheren Frequenzen treten größere Abweichungen auf, weil die der Theorie zugrundeliegende Voraussetzung, daß das Feld sich quasistationär verhält, nicht mehr gegeben ist. Die Länge des Sensors ist dann größer als  $1/10$  der Wellenlänge des zu messenden Signals.

Die Herstellung einer Vergleichsimpedanz für die Schelle ist prinzipiell möglich. Sie ist aber mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden, der im Vergleich mit den anderen Auskoppelmöglichkeiten nicht zu rechtfertigen ist. Dieser Ansatz wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

Die Auslegung der Ankopplungseinheit erfolgt unter Berücksichtigung der nachfolgend aufgeführten Anforderungen:

- Die Spektralanteile der TE-Impulse müssen im Hinblick auf den Amplituden- und Phasengang möglichst unverzerrt durch die im Ankopplungsvierpol befindlichen frequenzabhängigen Bauelemente übertragen werden.
- Ankopplungsvierpol und Koppelkapazität wirken von der Hochspannungsseite aus gesehen als Hochpaß, der im Betrieb die Hochspannung und deren Harmonische vom Meßgeräteteil der Prüfschaltung fernhalten soll.
- Die Ankopplungseinheit muß durch einen geschirmten Aufbau vor äußeren Störern geschützt werden.

Unter Berücksichtigung der Koppelkapazität  $C_K$  von Durchführung oder Schraubeinsatz und dem Meßabgriff der TE-Signale über ein Koaxialkabel, welches ebenfalls als eine parallel dazu liegende Kapazität  $C_m$  betrachtet werden muß, ist eine genügend hohe Unterdrückung der Hochspannung und deren Harmonische nur mit einer Induktivität im Ankopplungsvierpol zu erreichen. Der Meßwiderstand  $R_m$  vervollständigt den Aufbau. **Bild 4.48** stellt das Ersatzschaltbild des Ankopplungsvierpols dar.

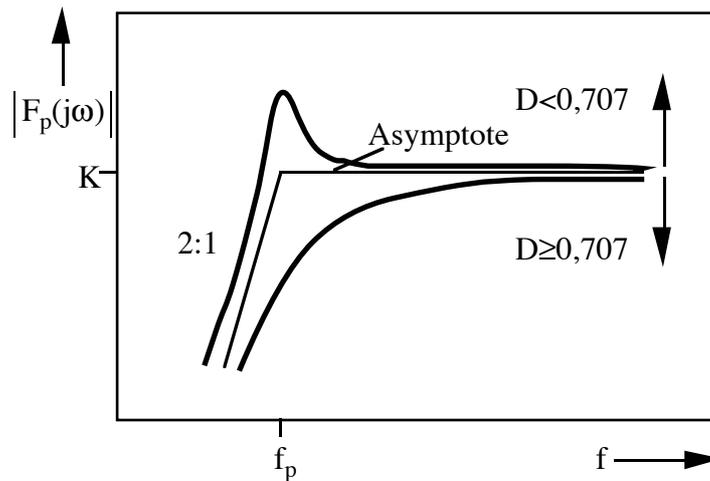


**Bild 4.48:** Ersatzschaltbild des Ankopplungsvierpols

Die Übertragungsfunktion  $F(s)$  berechnet sich dementsprechend zu:

$$F(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)} = \frac{C_K}{C_K + C_m} \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{1}{R_m \cdot (C_K + C_m)} \cdot s + \frac{1}{L \cdot (C_K + C_m)}}. \quad (4.37)$$

Den prinzipiellen Verlauf der in Gleichung (4.37) berechneten Übertragungsfunktion als Bodediagramm zeigt **Bild 4.49**.



**Bild 4.49:** Bodediagramm mit dem Amplitudengang der durch Gleichung (4.37) beschriebenen Übertragungsfunktion

Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, daß das System eine Hochpaßcharakteristik zweiter Ordnung besitzt, deren Kenngrößen Proportionalitätsfaktor  $K$ , Eigenfrequenz  $f_p$  und Dämpfungskonstante  $D$  sich mit den Gleichungen (4.38) - (4.40) berechnen lassen.

$$K = \frac{C_K}{C_K + C_m}, \quad (4.38)$$

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_K + C_m)}}, \quad (4.39)$$

$$D = \frac{1}{2 \cdot R_m} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_K + C_m}}. \quad (4.40)$$

Für die Dimensionierung des Ankopplungsvierpols ist eine geringe untere Grenzfrequenz  $f_u$  bei einer aperiodischen Dämpfung und einem hohen Proportionalitätsfaktor wünschenswert. Zur optimalen Auslegung des Vierpols wurde die Schaltung mit dem Netzwerkanalyseprogramm PSpice nachgebildet.

Dabei wurden die Vierpolparameter so verändert, daß sich eine für die Messung geeignete Bauelemente ergeben. Eine Vergrößerung der Induktivität hat eine kleinere untere Grenzfrequenz bei erhöhter Dämpfung und gleichzeitig schwächerer Unterdrückung der Hochspannung zur Folge. In der **Tabelle 4.9** sind die Daten der realisierten Ankopplungseinheiten für eine Durchführung bzw. einen Schraubeinsatz zusammengestellt.

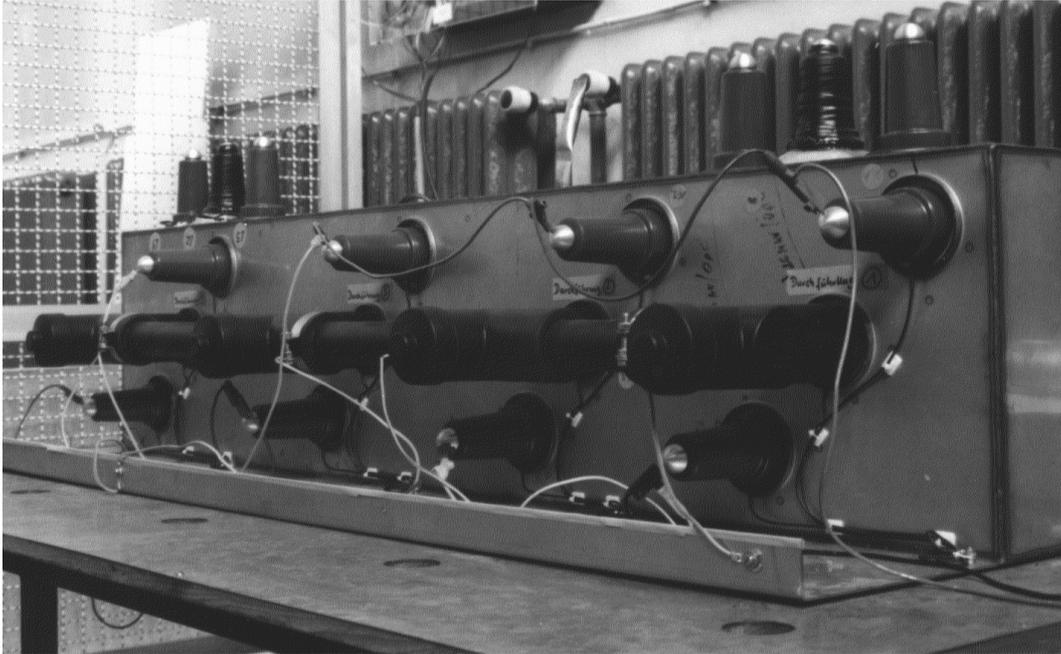
	$C_K$ (pF)	$C_m$ (pF)	L (mH)	$R_m$ (k $\Omega$ )	K	D	$f_p$ (kHz)	$f_u$ (kHz)	$V_{50Hz}$ (dB)
Durchführung	4,37	150	100	18	0,028	0,707	40,51	40,49	147,2
Schraubeinsatz	7,84	150	100	18	0,050	0,699	40,06	40,5	147,2

**Tabelle 4.9:** Daten der Ankopplungseinheit

#### 4.5.2 Versuchsaufbau und Durchführung der Messung

Der SF<sub>6</sub>-Behälter ist bei dieser Schaltanlage eine Schweißkonstruktion aus Edelstahl. In ihn sind Gießharzdurchführungen für den Sicherungsanbau, Ringkabelanschlüsse und Sammelschienenanschlüssen eingeschweißt. Aufgrund der besonderen Formgebung ist der Anlagenbehälter mechanisch sehr stabil. Er nimmt Druckbelastungen von innen wie auch mechanische Belastungen von außen ohne Verformungen auf. Die Verwendung von Edelstahl garantiert, zusammen mit einem besonderen Schweißverfahren, einen zuverlässigen, gasdichten Behälter [Kübler 85]. Über die Durchführungen wird die Sammelschiene mit dem Anlagenbehälter verbunden. Die Montage der Sammelschiene muß dabei sehr sorgfältig erfolgen, damit keine Lufteinschlüsse, Schmutzpartikel oder ähnliches die dielektrische Festigkeit mindern.

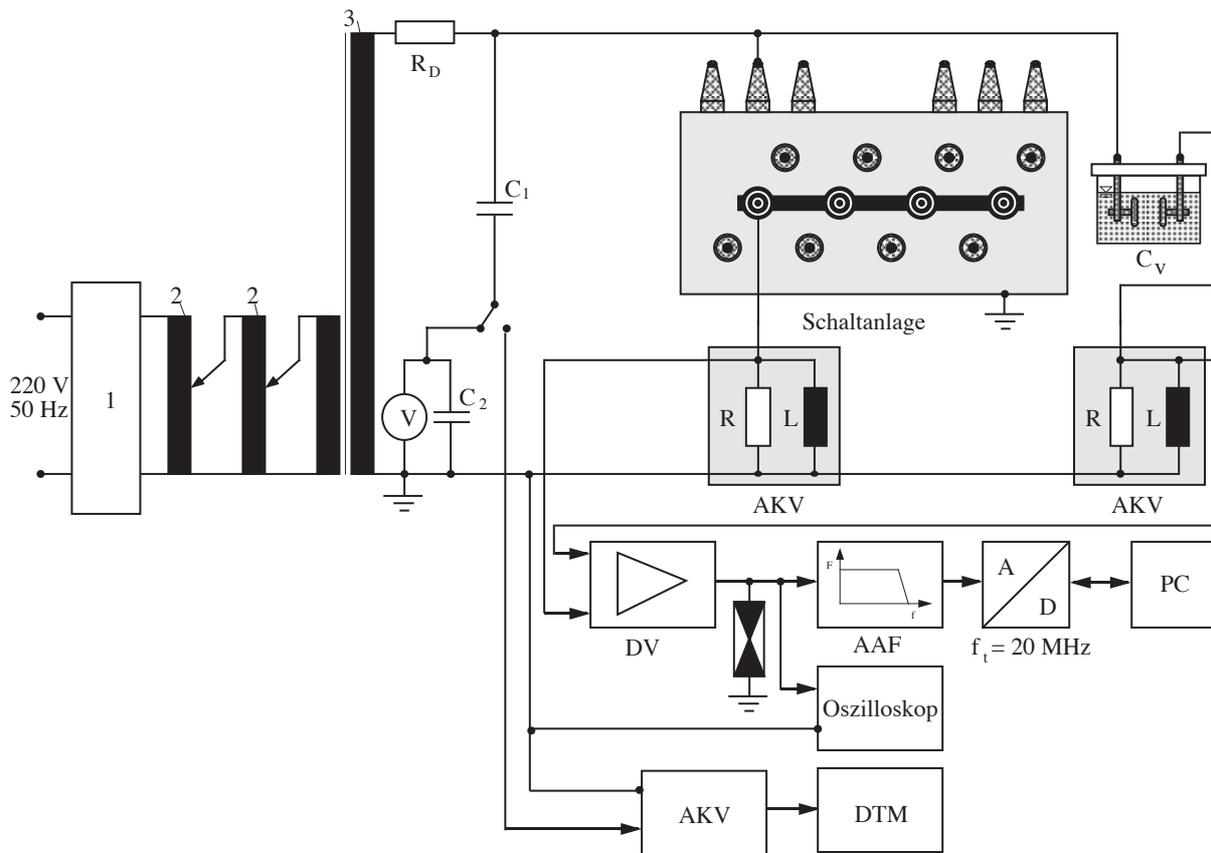
Eine für die Versuche vollständig montierte Sammelschiene setzt sich aus zwei Kreuzadaptern, zwei Endadaptern und drei isolierten Sammelschienenstücken aus Rundkupfer zusammen. Alle Isolierteile bestehen aus Silikonkautschuk. Zur Potentialsteuerung und wegen der größeren Berührungssicherheit ist die Isolierung außen mit einer Leitschicht überzogen und auf Erdpotential gelegt. End- und Kreuzadapter sind zusätzlich mit inneren Feldstueurelementen ausgestattet. Das nachstehende Foto **Bild 4.50** zeigt eine komplett montierte Sammelschiene der Schaltanlage.



**Bild 4.50:** Montierte Sammelschiene

Die TE-Messungen an der silikonkautschukisolierten Sammelschiene finden an einem gegen äußere Störungen ungeschirmten Meßplatz statt.. Auf die Verwendung von Niederspannungsnetzfiltern für die Energieversorgung des Meßstandes wurde verzichtet, so daß die Meßumgebung vor Ort Bedingungen entspricht.

**Bild 4.51** zeigt den Meßaufbau zur Teilentladungsmessung an der Sammelschiene. Der in Reihe zur Hochspannungswicklung liegende Dämpfungswiderstand  $R_D$  begrenzt im Fall eines Durchschlags in der Schaltanlage den Kurzschlußstrom. Die Auskopplung der hochfrequenten Teilentladungsimpulse aus der Sammelschiene durch eine konventionelle Parallelschaltung erfolgt zur Bestimmung der TE-Einsatzspannung und zum Vergleich mit der seriellen kapazitiven TE-Auskopplung. Der Oberspannungskondensator  $C_1$  dient als Koppelkapazität, an die erdseitig ein Ankopplungsvierpol angeschlossen ist. Zur Verstärkung der TE-Impulse und zur Kompensation von Störern werden die Meßsignale auf die Differenzverstärkereinheit gegeben. Deren Ausgangssignal kann mit einem digitalen Speicheroszilloskop angezeigt oder mit einem Transientenrekorder aufgezeichnet und an einen Arbeitsplatzrechner weitergeleitet werden.



**Bild 4.51:** Versuchsaufbau zur TE-Messung an der Sammelschiene

AKV	Ankopplungsvierpol	DTM	Digitales Teilladungs-Meßsystem
DV	Differenzverstärker	AAF	Anti Aliasing Filter
C <sub>v</sub>	Vergleichskapazität		

Dem Transientenrekorder ist ein Anti-Aliasing-Filter vorgeschaltet, der die höheren Frequenzanteile des Eingangssignals stark bedämpft und auf diese Weise die Einhaltung des Shannon'schen Abtasttheorems für die nachfolgende A/D-Umsetzung garantiert. Die Digitalisierung der TE-Signale mit einer Abtastfrequenz von 20 MHz ab und Auflösung von 8 Bit. Mit einem an den Transientenrekorder angeschlossenen Arbeitsplatzrechner und am Schering-Institut entwickelter Steuerungssoftware wurden die aufgezeichneten Meßwerte ausgelesen, weiterverarbeitet oder auf Datenträgern gespeichert. Die Meßdaten werden bei den Teilladungsmessungen an der Sammelschiene mit einer Dateigröße von 512 kByte abgespeichert. Bei einer Abtastfrequenz von 20 MHz wird eine maximale Zeitdauer von

$$T_{\text{ges}} = \frac{524288}{20 \text{ MHz}} = 26,21 \text{ ms} \quad (4.41)$$

erfaßt. Die Aufzeichnungslänge ist also etwas größer als die Periodendauer einer 50-Hz-Schwingung.

### 4.5.3 Durchführung der TE-Messung

Zur Teilentladungserzeugung wurden künstliche Fehlstellen in der Sammelschiene eingebaut. Ein typischer Montagefehler ist z.B. das Zurücklassen des zur Entlüftung benötigten Kabelbinders. Zur Simulation eines derartigen Fehlers wurden Kabelbinderstücke verschiedener Größe im Bereich je eines Sammelschienenadapters eingebracht. Die Maße der Kabelbinderproben sind in der **Tabelle 4.10** aufgeführt.

Probe	Kabelbinder A	Kabelbinder B
Länge	40 mm	20 mm
Breite	5 mm	5 mm
Höhe	1,5 mm	1,5 mm

**Tabelle 4.10:** Maße der als Fehlstelle verwendeten Kabelbinderproben

Zur Untersuchung des Teilentladungsverhaltens wurden außerdem metallische Verunreinigungen im Bereich je eines Sammelschienenadapters eingebracht, um deren Teilentladungsintensität zu untersuchen. Dabei handelt es sich um Kupferstäbe und Eisenkugeln. Die Maße der verwendeten metallischen Proben sind in der nachfolgenden **Tabelle 4.11** zusammengefaßt.

Probe	Stab A	Stab B	Kugel A	Kugel B
Durchmesser	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	0,5 mm
Länge	15 mm	30 mm	-	-

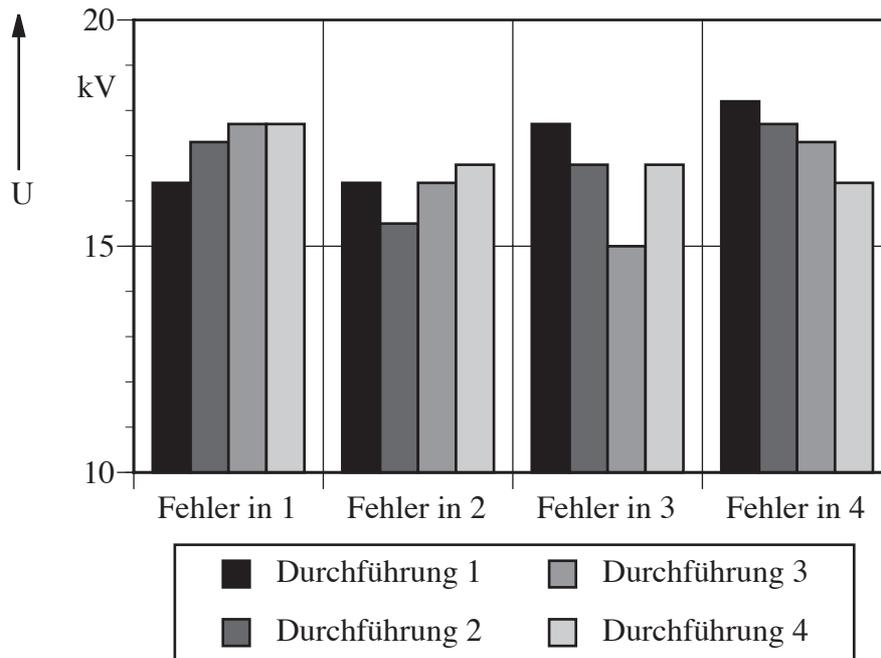
**Tabelle 4.11:** Maße der als Fehlstelle verwendeten Kupferstäbe und Eisenkugeln

Die Messung der Teilentladungen erfolgt nach den in VDE 0670 Teil 6 Anhang FF zusammengefaßten Richtlinien. Die dreiphasige Schaltanlage wird in einem einphasigen Meßkreis geprüft. Die Sammelschiene ist mit der Prüfspannungsquelle verbunden, während die beiden anderen Leiter und der Anlagenbehälter geerdet sind. Die Auskopplung erfolgte nacheinander an den Durchführungen 1-4 und an den Schraubeinsätzen 1-4.

Bei den Messungen wurde zuerst die Teilentladungseinsetzspannung ermittelt und dann die angelegte Wechselspannung auf den 1,3-fachen Wert der Nennspannung gesteigert. Dieser Wert wurde mindestens 10 s aufrechterhalten, bevor eine Bestimmung der Höhe der Teilentladungen stattfand. Anschließend wurde die Spannung ohne Unterbrechung auf den 1,1-fachen und 1-fachen Wert der Nennspannung reduziert. Dabei wurden die Teilentladungsintensitäten ebenfalls nach jeweils 10 s bestimmt.

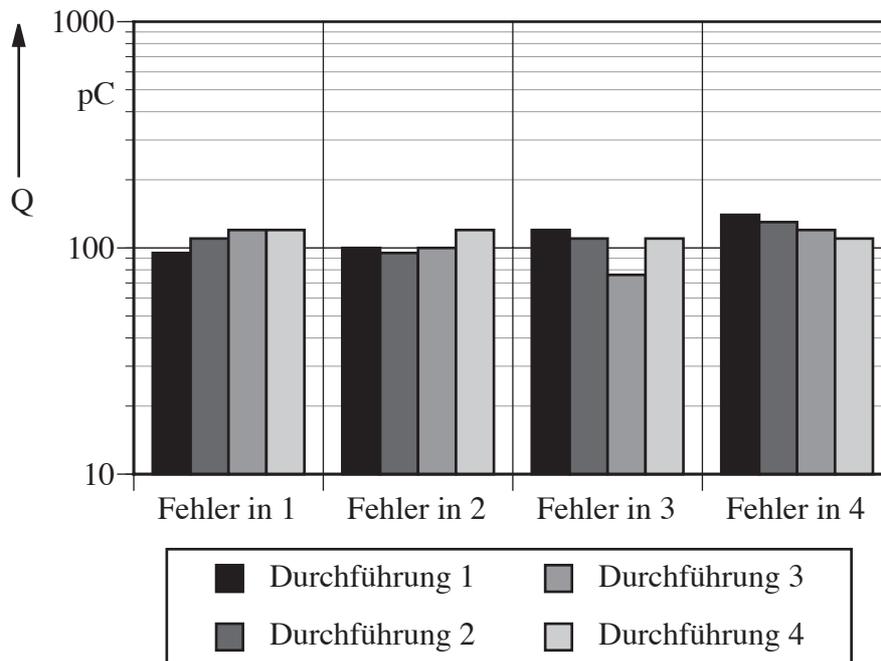
#### 4.5.4 Meßergebnisse bei der Auskopplung von Teilentladungen über die Durchführungen

Zur Auskopplung von Teilentladungen wurden die kapazitiven Sensor-Elektroden in den Durchführungen genutzt. **Bild 4.52** zeigt die Teilentladungseinsetzspannung mit der Fehlstelle Kabelbinderprobe A.



**Bild 4.52:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4.  
Fehlstelle: Kabelbinder A

Je näher der Ort der Auskopplung an der Fehlerstelle liegt, desto geringer sind die Spannungswerte, um einen ersten Teilentladungsimpuls feststellen zu können. Bei der Positionierung der Fehlerstellen 2 bis 4 ist eine stetige Abnahme der Spannungswerte zum Fehlerort hin zu erkennen, während bei der Fehlerstelle 1 bei den nacheinander durchgeführten Messungen gleiche TE-Einsatzwerte für die Auskopplung mit Hilfe der Durchführungen 3 und 4 gemessen wurden. Ein Vergleich mit den in **Bild 4.53** dargestellten Teilentladungsintensitäten bestätigt diese Meßergebnisse. Höhere Einsatzspannungen sind demnach mit einer größeren scheinbaren Ladung verbunden.

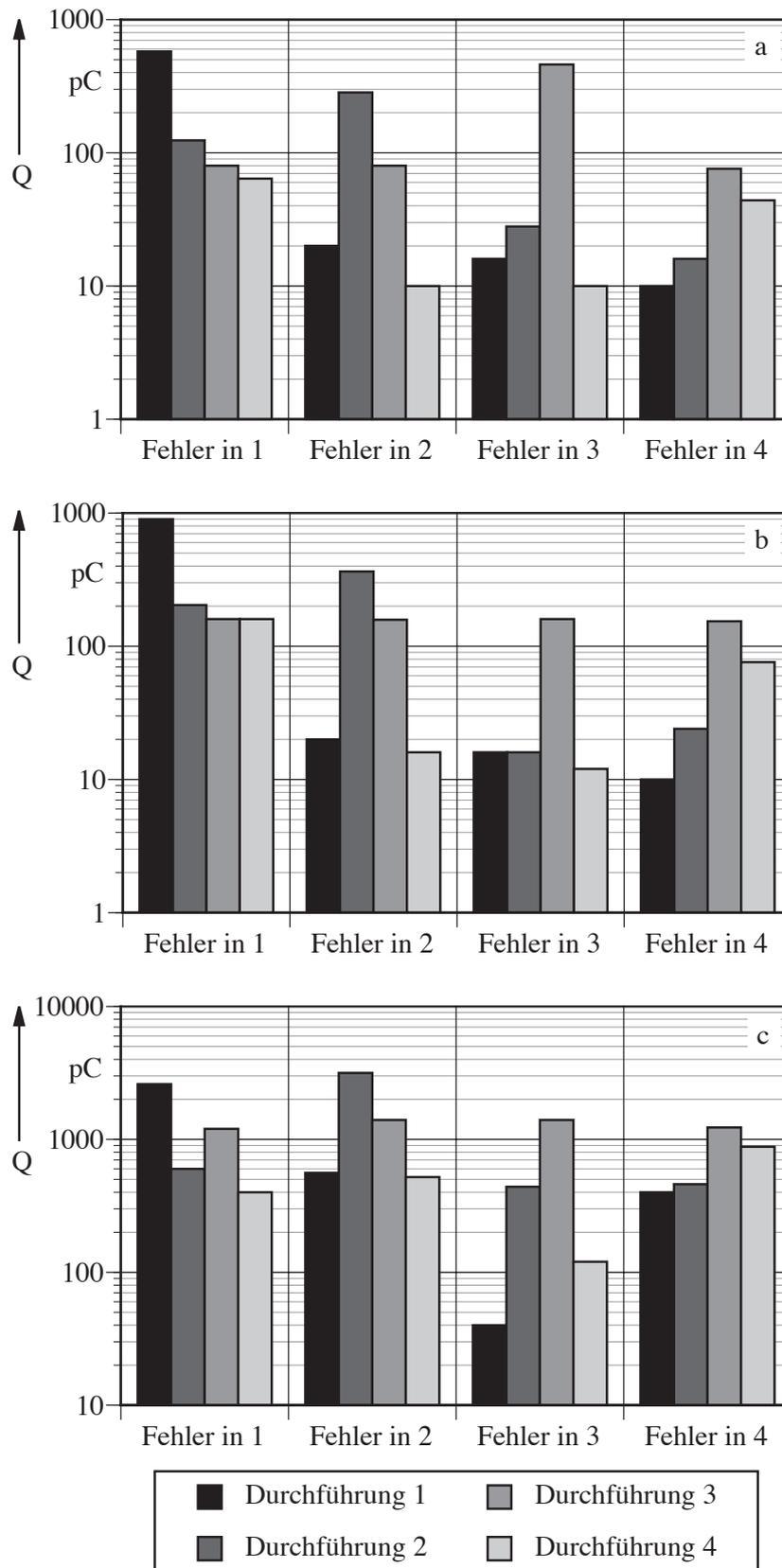


**Bild 4.53:** TE--Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4  
Fehlstelle: Kabelbinder A

Die Teilentladungsmeßwerte für die in VDE 0670 geforderten Spannungswerte werden in den **Bildern 4.54 a-c** auf der nachfolgenden Seite dargestellt.

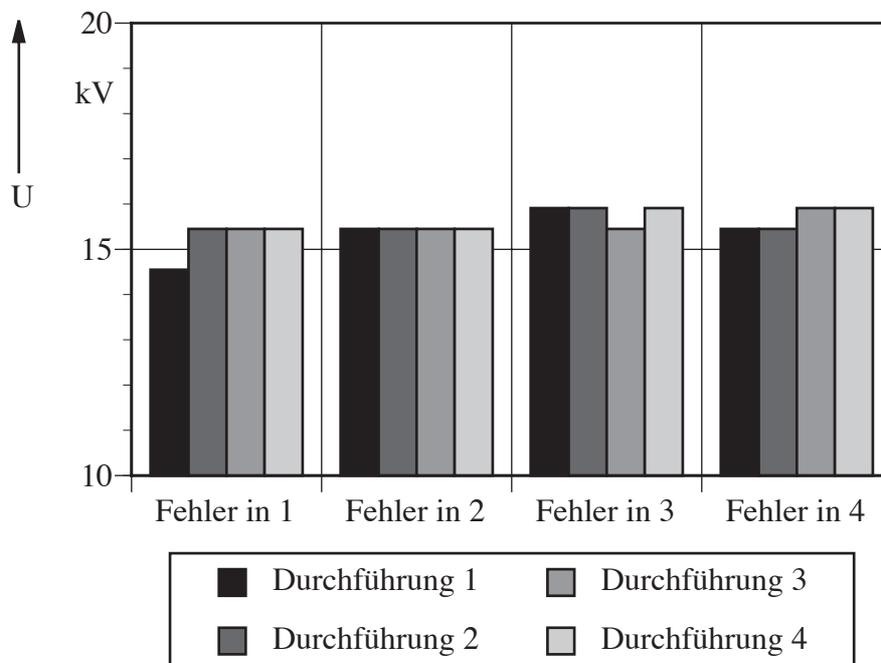
Mit zunehmender Entfernung des Meßortes vom Fehlerort nimmt, mit Ausnahme der Werte für die Durchführung 3, bei allen Prüfspannungen die Ladungsintensität ab. Die höchsten Teilentladungsimpulse sind jeweils an den Durchführungen meßbar, in deren Bereich auch die Fehlstelle plazierte wurde. Bei einer Prüfspannung von  $1,3 \cdot U_N$  wurden Ladungswerte von über 3000 pC ermittelt. Die Teilentladungsintensität nimmt mit kleineren Prüfspannungen ab.

Für die Durchführung 3 ergeben die Prüfungen mit 1,1- und 1,3-facher Nennspannung, unabhängig vom Fehlerort, einen konstanten TE-Pegel. Es ist zu vermuten, daß Teilentladungen gemessen wurden, die nicht allein von der künstlichen Fehlstelle herrühren.

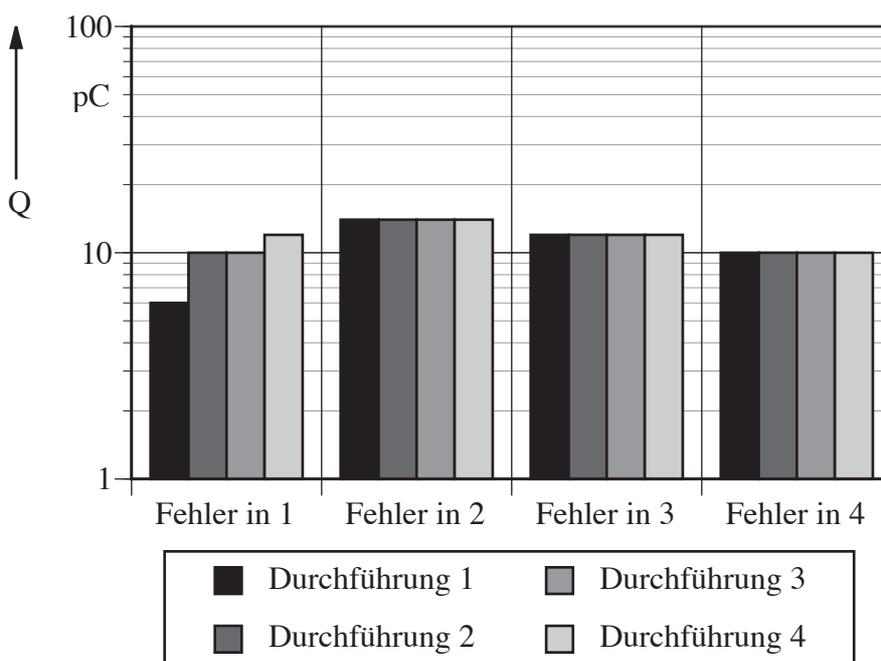


**Bild 4.54:** TE-Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4  
a:  $U_N$       b:  $1,1 \cdot U_N$       c:  $1,3 \cdot U_N$   
Fehlstelle: Kabelbinder A

In **Bild 4.55** ist die TE-Einsatzspannung für eine Kabelbinderprobe vom Typ B dargestellt. Die Verkürzung der Kabelbinderprobe führt trotz geringerer Inhomogenität im Sammelschienenadapter zu einer gleichbleibenden Teilentladungseinsatzspannung. Auffällig sind die vom Meßort unabhängigen Einsatzspannungen, die lediglich für die Messungen mit Fehlstellen in den Durchführungen 1 und 3 leichte Minima erkennen lassen.



**Bild 4.55:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4, Fehlstelle: Kabelbinder B



**Bild 4.56:** TE-Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4, Fehlstelle: Kabelbinder B

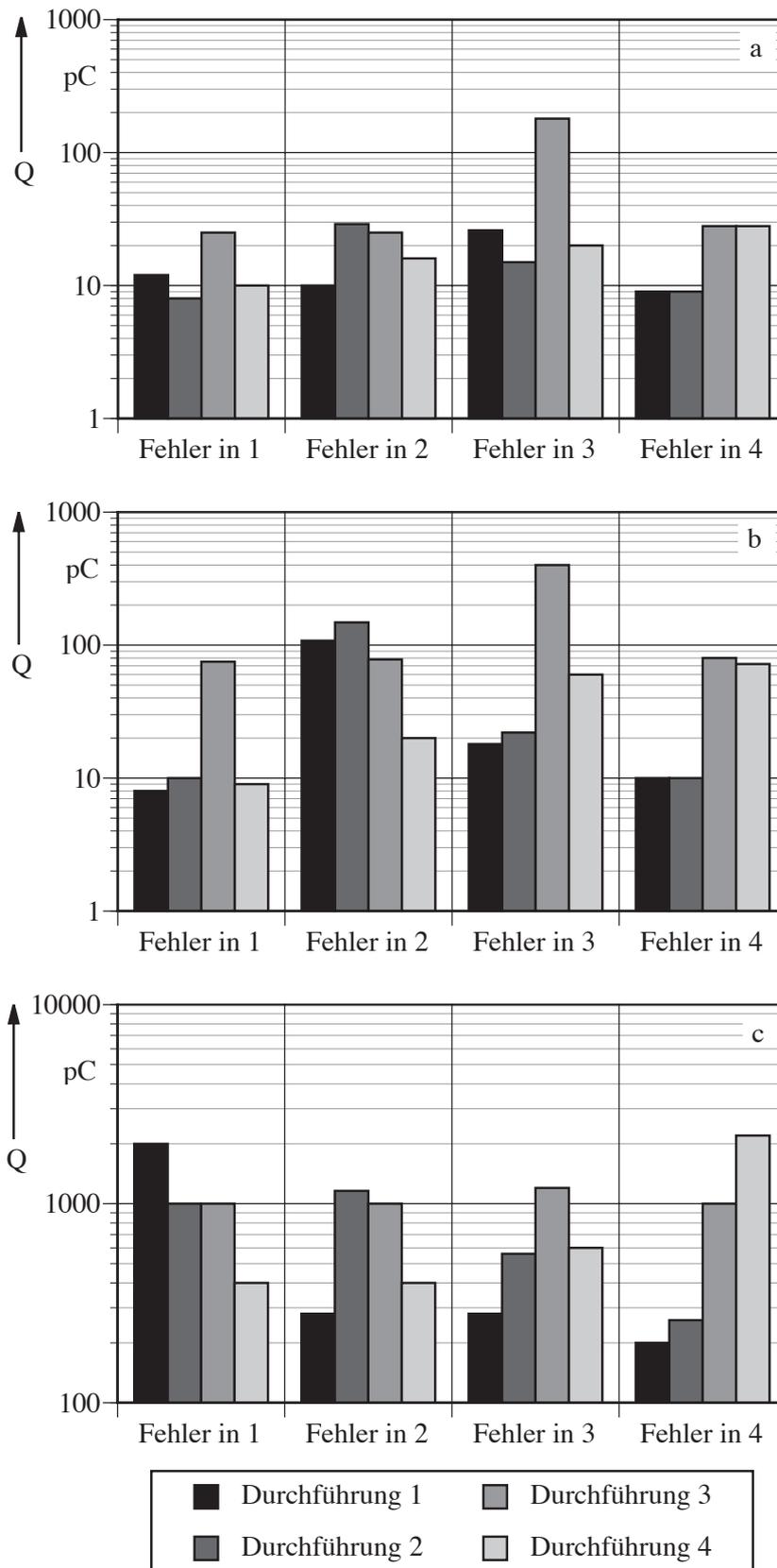
Bei nahezu konstanten Einsatzspannungen wurden konstante scheinbare Ladungen für die verschiedenen Auskopplungsorte ermittelt. Ein Vergleich der Bilder 4.52 und **4.56** zeigt, daß die Werte der bei Einsatzspannung bestimmten TE-Intensitäten für die kürzere Kabelbinderprobe deutlich kleiner sind als für die längere Variante. Es treten Maximalwerte von ca. 15 pC für die kurze Kabelbinderprobe und etwa um den Faktor 10 höhere Werte für die lange Kabelbinderprobe auf.

Ein Unterschied in der TE-Intensität ist auch bei einem Vergleich der Meßwerte der Nennspannungsprüfreihe (Bilder 4.54 a und **4.57 a**) und der Prüfreihe mit der 1,1-fachen Nennspannung (Bilder 4.54 b und **4.57 b**) festzustellen.

Ähnlich wie bei den Messungen in Bild 4.54 fallen auch in Bild 4.57 die Meßwerte der Durchführung 3 aus dem Rahmen. Alle Messungen zeigen gleiche TE-Intensität mit Ausnahme der Messung mit einem Fehler in Durchführung 3. Dieses Verhalten kann daher nicht von der künstlichen Fehlstelle herrühren. Ergänzende Messungen mit dem Transientenrekorder zeigten, daß die erhöhten und für alle Messungen gleichen Werte auf einen Fehler Bereich des Sensors in der Durchführung zurückzuführen sind (**Bild 4.61**). Dieses muß bei der Auswertung und bei der Interpretation der Abhängigkeit der TE-Stärke vom Ort der Auskopplung unbedingt berücksichtigt werden.

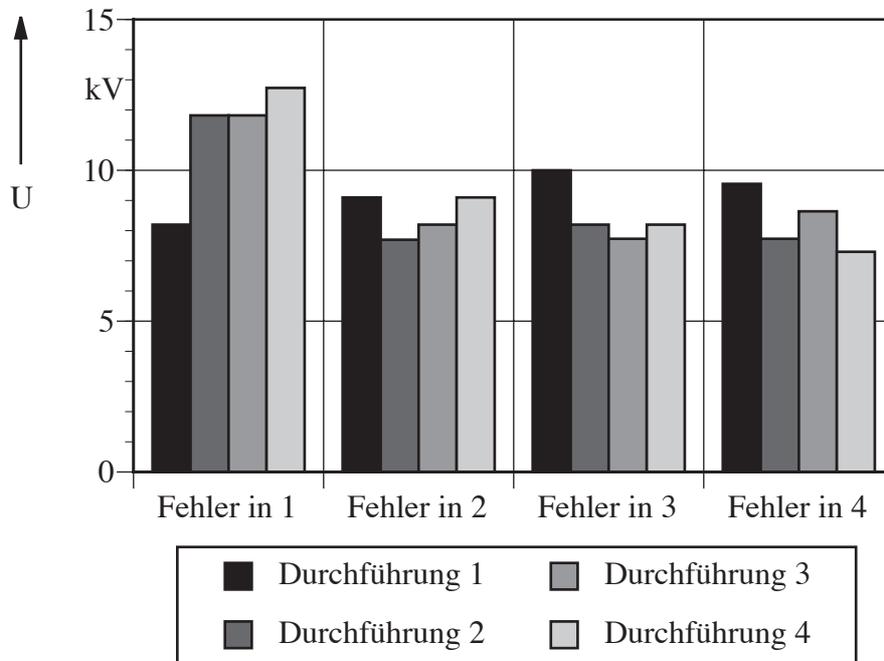
Bei den höheren Prüfspannungen macht sich der Fehler in Durchführung 3 im Verhältnis zu den durch die künstliche Fehlstelle erzeugten Teilentladungsimpulsen weniger bemerkbar, so daß bei den Meßergebnissen der 1,3-fachen Prüfspannung eine Abnahme der TE-Intensität mit der Entfernung der Auskopplung vom Fehlerort noch erkennbar ist.

Bei den Untersuchungen an der Sammelschiene wurden auch Metallkugeln als künstliche Fehlstellen eingebaut. Sowohl für Eisenkugeln mit einem Durchmesser von 0,5 mm als auch für 1,5 mm konnten keine Teilentladungen oberhalb der meßtechnisch erfaßbaren Grenze von 8 pC gemessen werden. Der Grund für das Ausbleiben von Teilentladungen liegt in der homogenen Form der Kugeln, die die Feldverteilung im Bereich der Adapter nicht verändert. Ein Fehler dieser Art führt daher nicht zu einer beschleunigten Alterung und einem vorzeitigen Ausfall einer Schaltanlage.

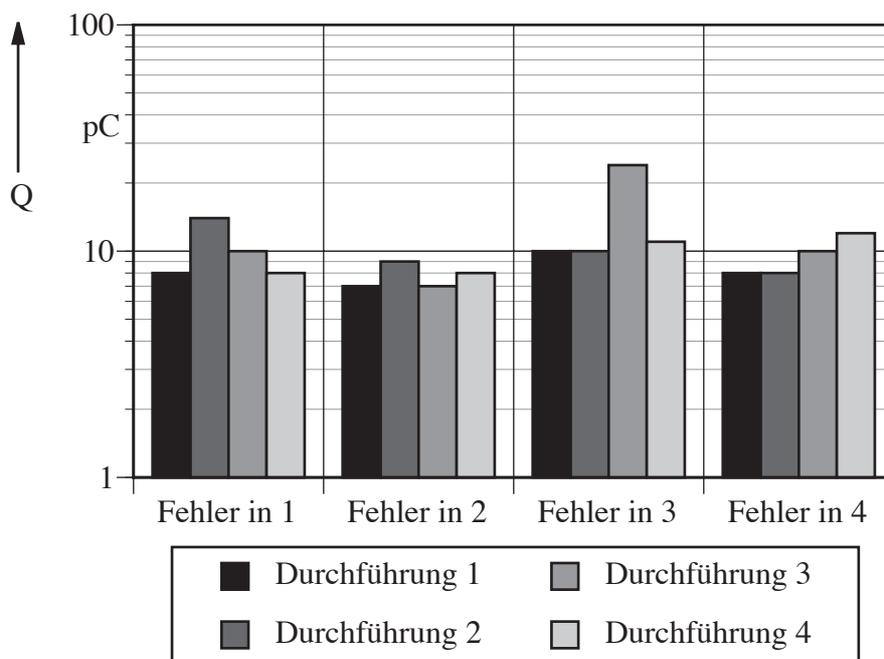


**Bild 4.57:** TE-Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4.  
 a:  $U_N$       b:  $1,1 \cdot U_N$       c:  $1,3 \cdot U_N$   
 Fehlstelle: Kabelbinder B

Eine deutliche Veränderung der Feldverteilung wird durch das Einbringen von Kupferstäben als Fehlstellen in die Sammelschienenadapter hervorgerufen. Die für Kupferstäbe vom Typ A gemessenen TE-Einsatzspannungen sind in **Bild 4.58** dargestellt, **Bild 4.59** zeigt die TE-Intensitäten bei TE-Einsatz.



**Bild 4.58:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4, Fehlstelle: Kupferstab A



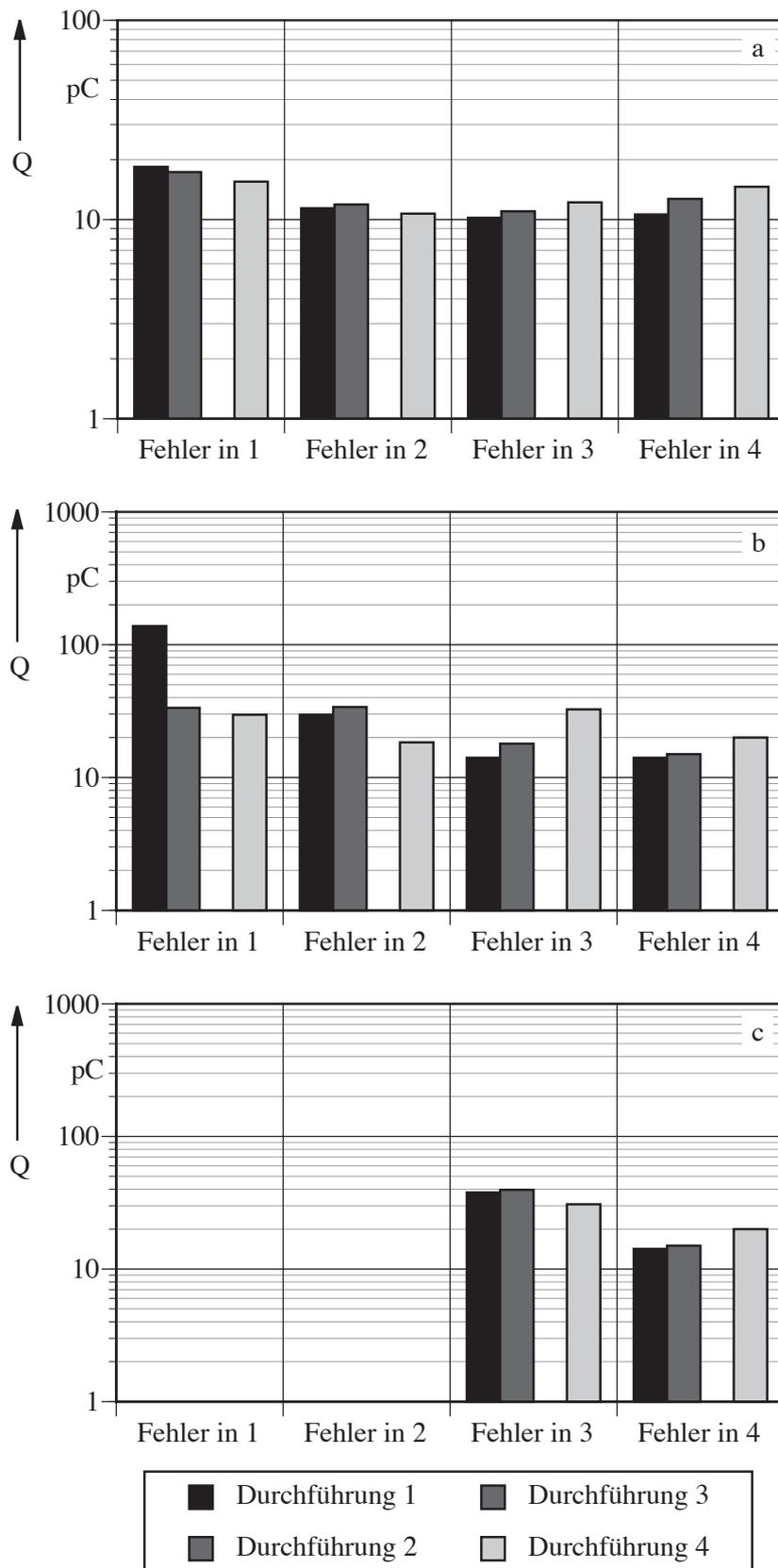
**Bild 4.59:** TE- Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4, Fehlstelle: Kupferstab A

Die TE-Einsatzspannungen liegen bei dieser Fehlstellenart deutlich unter denen, die für die Kabelbinderproben festgestellt wurden. Minimale Einsatzspannungen wurden im Bereich der Fehlstelle gemessen. Ein Vergleich der Bilder 4.58 und 4.59 zeigt, daß mit Ausnahme der Positionierung der Fehlstelle im Bereich der Durchführung 1, die maximalen Werte der scheinbaren Ladungen im Einsetzaugenblick an der fehlerhaften Durchführung auftreten. Gleichzeitig wurden dort auch die geringsten TE-Einsatzspannungen gemessen.

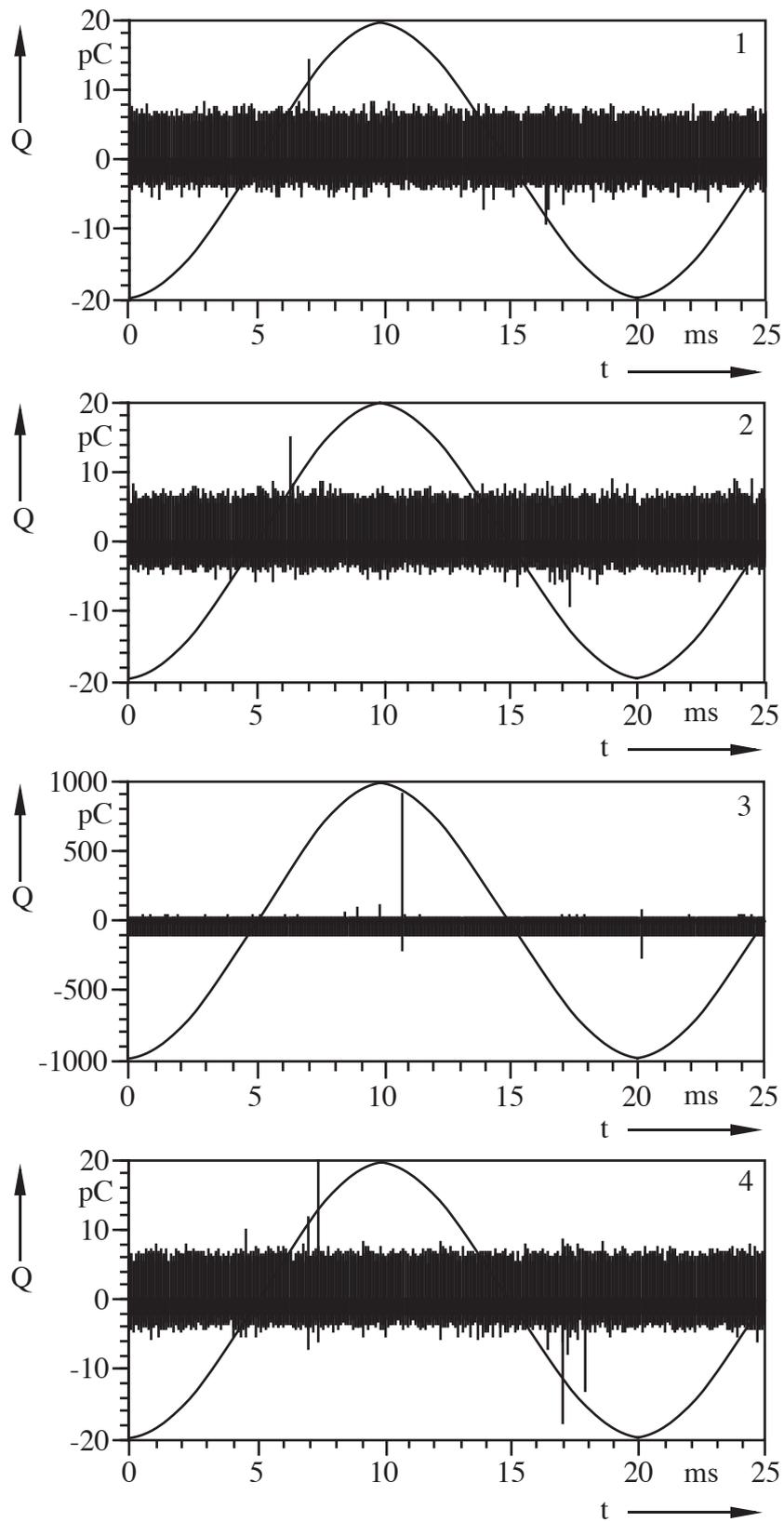
Die Teilentladungswerte der drei Prüfspannungsreihen sind in dem **Bild 4.60 a-c** dargestellt. Die Meßwerte für die fehlerhafte Durchführung 3 bleiben bei der Darstellung unberücksichtigt. Für die Fehlerpositionen 1 und 2 traten bei 1,3-facher Nennspannung sehr hohe Teilentladungsintensitäten im Bereich von 10000 pC auf, so daß aus Sicherheitsgründen auf eine Meßreihe bei dieser Spannungshöhe verzichtet wurde.

Am eindeutigsten ist eine Detektion des Fehlers bei 1,1-facher Nennspannung möglich. Für die im Bereich der Durchführung 1 eingebrachte Fehlstelle werden bei einer Auskopplung über die Durchführung 1 Teilentladungswerte gemessen, die um 115 pC über dem der nebenliegenden Auskoppelstelle liegen.

Der Phasenbezug der Teilentladungsimpulse zur angelegten Spannung ist durch die parallele Aufzeichnung der TE-Signale möglich. In den **Bildern 4.61** sind die ungefilterten Teilentladungssignale der Versuchsreihe mit einem Kupferstab vom Typ A als künstliche Fehlstelle in der Durchführung 4 im Bezug zur angelegten 1,1-fachen Nennspannung exemplarisch dargestellt. In den Diagrammen 1, 2 und 4 sind die Teilentladungsimpulse im Bereich der Spannungsnulldurchgänge zu erkennen. Die Amplitude der ausgekoppelten Teilentladungen nimmt dabei in Richtung auf die Fehlerstelle zu. Die über die Durchführung 3 ausgekoppelten Impulse haben eine sehr viel größere Amplitude und befinden sich im Spannungsmaximum. Der Fehler in dieser Durchführung wird dadurch erkennbar.

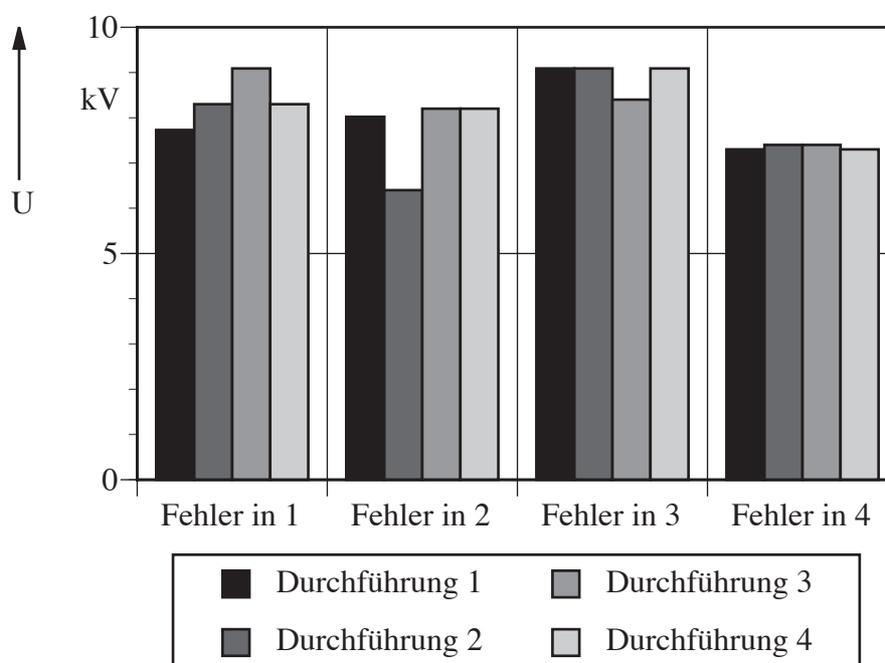


**Bild 4.60:** TE-Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4.  
 a:  $U_N$       b:  $1,1 \cdot U_N$       c:  $1,3 \cdot U_N$   
 Fehlstelle: Kupferstab A



**Bild 4.61(1-4):** TE-Signal in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4 bei  $1,1 \cdot U_N$  und Fehlstelle Kupferstab A  
Durchführung 3 hat einen Fehler im Bereich der Meßsonde

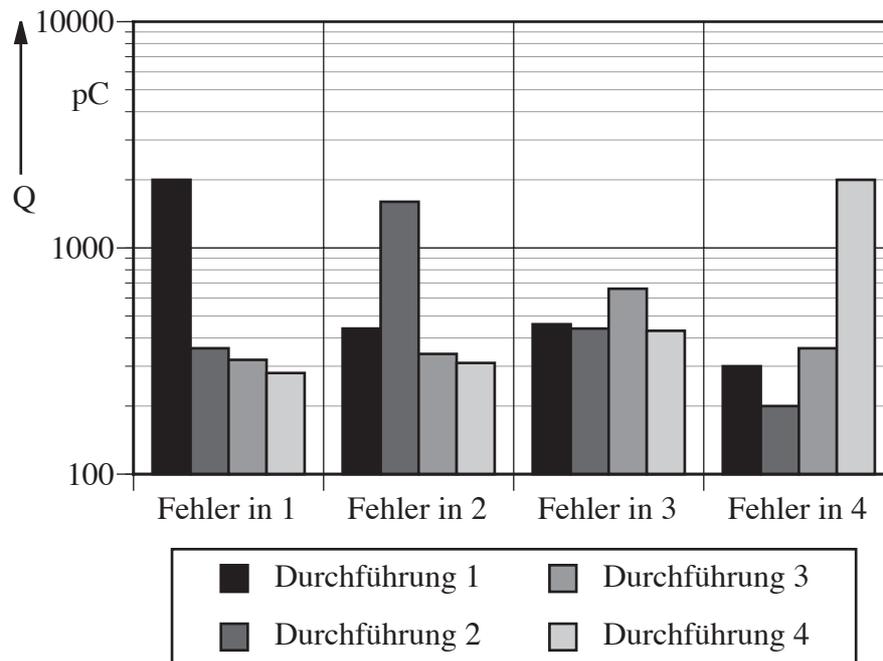
Die folgenden Messungen wurden mit Kupferstäben vom Typ B als künstlicher Fehlstelle in den Sammelschienenadaptern durchgeführt. Nachfolgend sind in **Bild 4.62** die TE-Einsatzspannungen und in **Bild 4.63** die TE-Intensitäten im Einsetzaugenblick dargestellt.



**Bild 4.62:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4.  
Fehlstelle: Kupferstab B

Die Einsatzspannungen liegen bei diesem Fehlerfall niedriger als bei einer Fehlstelle mit dem kürzeren Kupferstab vom Typ A (Vergleich der Bilder 4.57 und 4.61). Es wurden keine Einsatzspannungen von  $U_{TE} > 10$  kV gemessen. Der kleinste Spannungswerte von 6,4 kV wurde bei einer Fehlstelle in Bereich der Durchführung 2 gemessen, die maximale Einsatzspannung betrug 9,1 kV. Die Unterschiede der Einsatzspannungen an den verschiedenen Meßorten sind sehr gering. Bei allen Fehlerpositionen wurden die niedrigsten Werte in der Nähe der Fehlstelle gemessen. Die Einsatzspannungen steigen mit wachsender Entfernung zum Fehlerort.

Die höchsten TE-Intensitäten bei TE-Einsatz werden im Bereich der Fehlerstelle ausgekoppelt (**Bild 4.63**). Bereits bei Spannungswerten von weniger als 10 kV wurden TE-Impulse von bis zu 2000 pC gemessen. Die Amplitude der Teilentladungen der Meßreihe mit Kupferstäben vom Typ B lag deutlich über denen aller anderen Störstellen, da die Feldverzerrung durch die eingebaute Fehlstelle am größten ist.

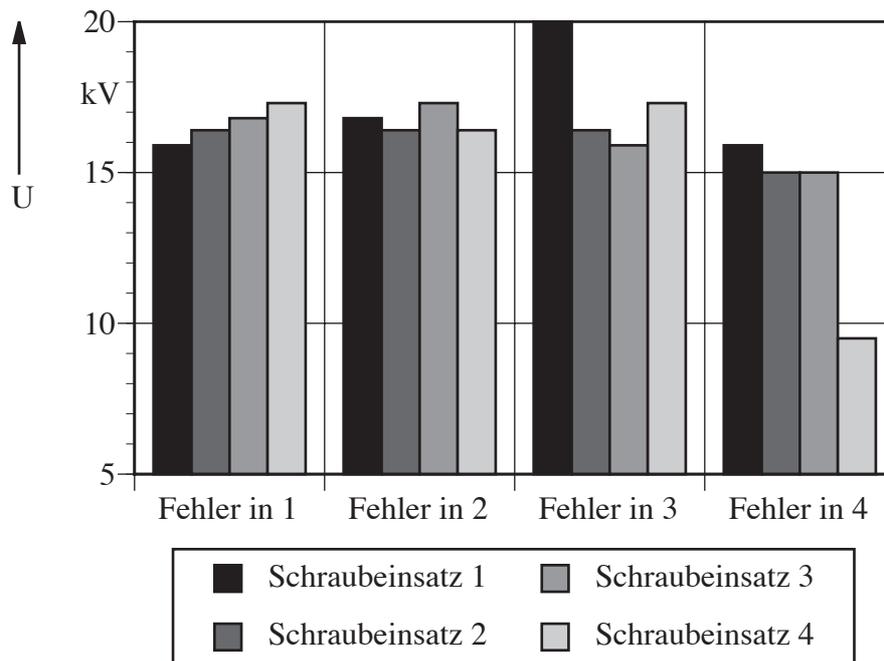


**Bild 4.63:** TE-Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Durchführungen 1-4.  
Fehlstelle: Kupferstab B

Nach dem Einbau des Kupferstabes B traten bereits unterhalb der Nennspannung Teilentladungen von 10000 pC auf. Eine Steigerung der Prüfspannung auf den 1,3-fachen Wert der Nennspannung mit einem Fehler in Durchführung 2 führte zu einem Durchschlag in der Trennfuge zwischen dem Epoxidharzschraubeinsatz und dem Kreuzadapter aus Silikongummi. Der Durchschlagkanal verlief dabei von der Spitze des Kupferstabes zur auf Erdpotential liegenden Abdeckkappe. Die Kanalspuren waren deutlich als Riefen im Epoxidharzschraubeinsatz sichtbar. Im Gegensatz dazu ließ die Silikonisolierung des Kreuzadapters keine Spuren von Materialzerstörung erkennen. Auf die Durchführung der Meßreihen bei verschiedenen Spannungen mit Kupferstab B wurde daher verzichtet

#### 4.5.5 Meßergebnisse der Auskopplung von Teilentladungen über die Schraubeinsätze

Als zweite Variante zur Auskopplung von Teilentladungen wurden die Schraubeinsätze der Sammelschiene verwendet. Da nicht alle Schaltanlagen Durchführungen mit einer eingegossenen Ringelektroden aufweisen, bieten sich die metallischen Flächen in den Schraubeinsätzen als kapazitive Sensoren zur Auskopplung an. Ein TE-Messung ist damit auch an älteren Anlagen ohne große Schwierigkeiten zu realisieren. Entsprechend den in Kapitel 4.5.4 beschriebenen Meßergebnissen wurden für diese Auskopplungsvariante Messungen mit den Kabelbinderproben A und B und einem Kupferstab vom Typ A als künstliche Fehlstellen durchgeführt.

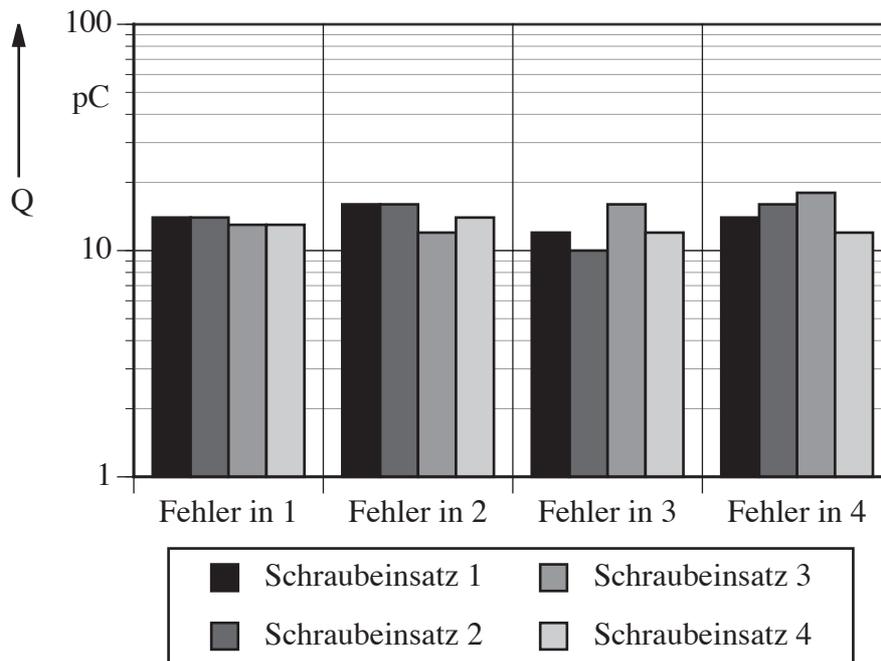


**Bild 4.64:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4.  
Fehlstelle: Kabelbinder A

Die geringsten Einsatzspannungen wurden über den Schraubeinsätzen gemessen, in deren Bereich sich die Fehlstelle befand. Ein sehr kleiner Wert von 9,5 kV trat für eine Auskopplung über den Schraubeinsatz 4 auf. Dieser Wert lag 37 % unter den an den nebenliegenden Durchführungen gemessenen Spannungen. Da die TE-Einsatzspannung sehr stark von der Position der künstlichen Fehlstelle abhängt und die Position nur schlecht zu reproduzieren ist, können die gemessenen Werte verschiedener Meßreihen nur bedingt verglichen werden.

Allen Meßreihen gemeinsam ist eine Zunahme der Spannungshöhe bei zunehmender Entfernung der Auskopplung vom Fehlerort. Bei einem Vergleich der Bilder 4.52 und 4.64 ist zu erkennen, daß bei gleicher Fehlerquelle auch etwa gleiche Einsatzspannungen für eine Auskopplung über die Durchführung oder den Schraubeinsatz gemessen wurden. Die mit den Schraubeinsätzen gemessenen Werte für die scheinbare Ladung der TE sind jedoch wesentlich kleiner als die vergleichbaren Meßwerte mit den Durchführungen. Die höhere Kapazität des Schraubeinsatzes führt somit zu einer geringeren Empfindlichkeit der TE-Messung.

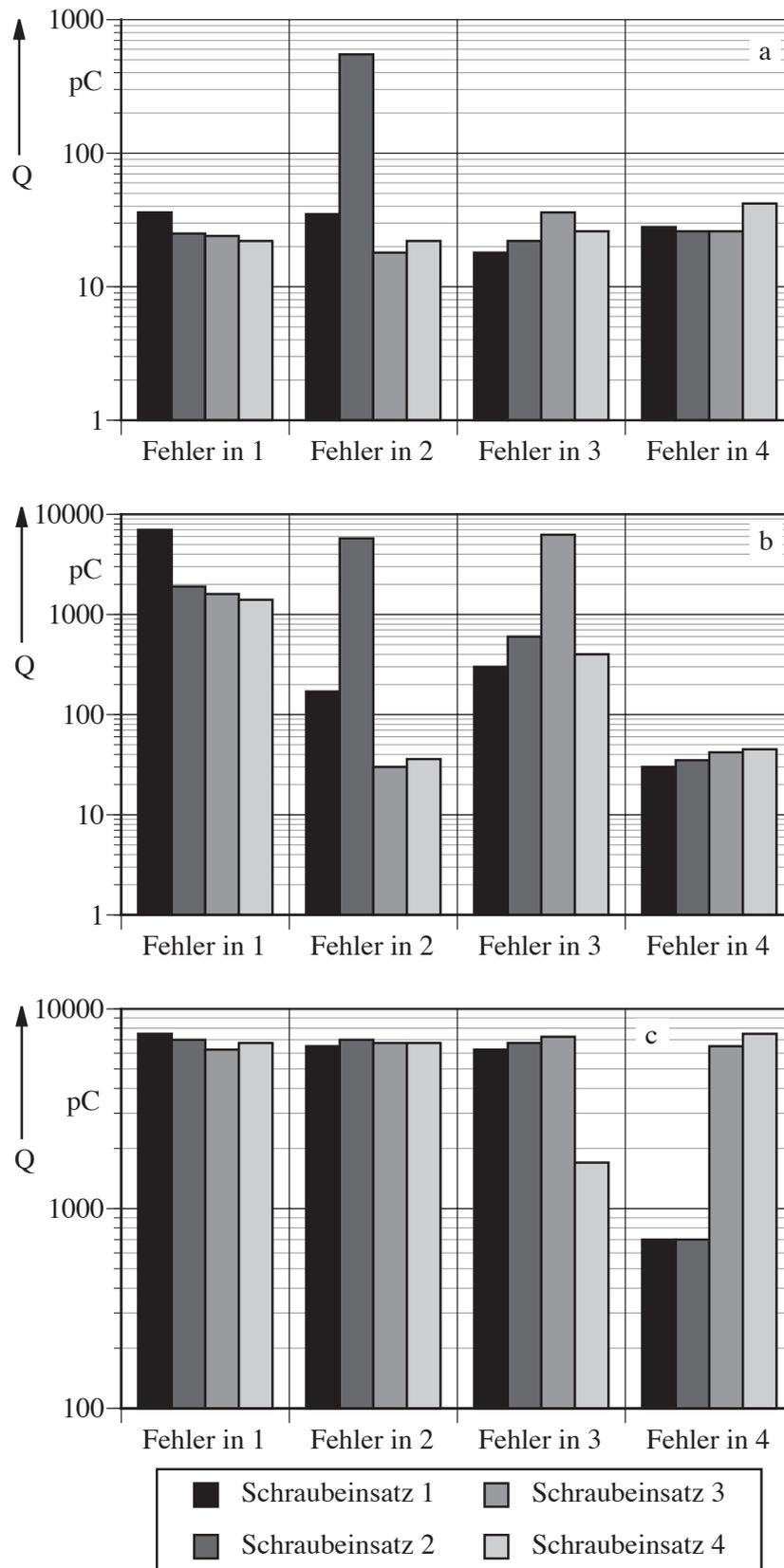
In **Bild 4.65** werden die mit den Schraubeinsätzen gemessenen Werte der scheinbaren Ladung bei TE-Einsatz für eine Kabelbinderprobe vom Typ A dargestellt.



**Bild 4.65:** TE-Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4. Fehlstelle: Kabelbinder A

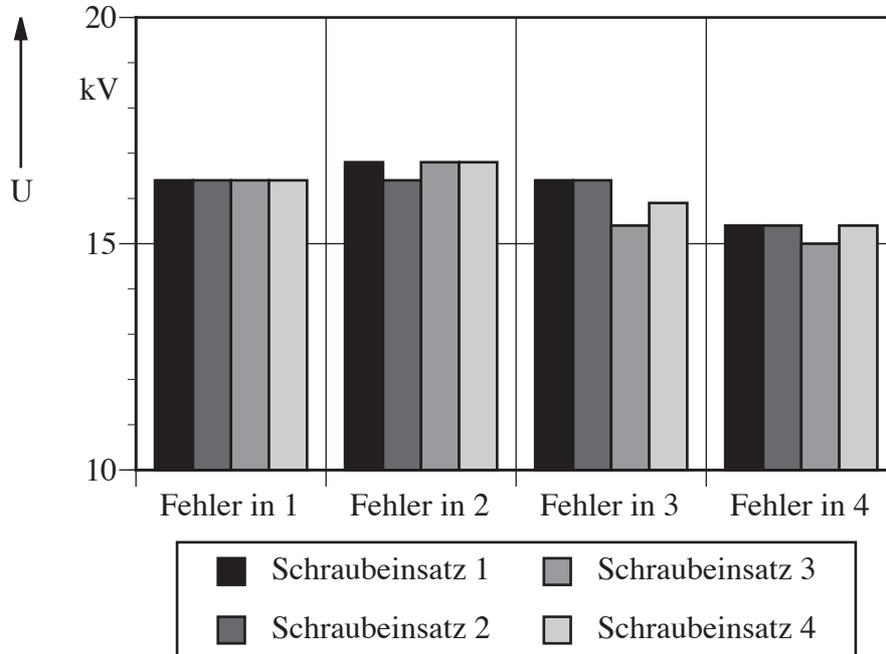
Die im Bild 4.64 dargestellten TE-Intensitäten sind etwa um den Faktor 10 kleiner als die in Bild 4.52 gezeigten Meßergebnisse für eine Auskopplung über die Durchführungen. Die Methode der TE-Auskopplung über die Durchführung ist in diesem Fall deutlich empfindlicher.

Die **Bilder 4.66 a-c** zeigen die Meßergebnisse mit 1-, 1,1- und 1,3-facher Nennspannung. Auch bei dieser Auskopplungsvariante ist eine Zunahme der TE-Intensität mit Annäherung des Meßortes zum Fehlerort hin zu erkennen. Dabei treten die deutlichsten Unterschiede bei den Messungen mit der 1,1-fachen Nennspannung auf. Teilentladungsmessungen mit 1,3-facher Nennspannung lassen keine genaue Ortung der Fehlstelle zu. Eine Tendenz zu größeren Ladungen im Bereich der Fehlerquelle läßt sich aber auch aus dieser Meßreihe noch erkennen.

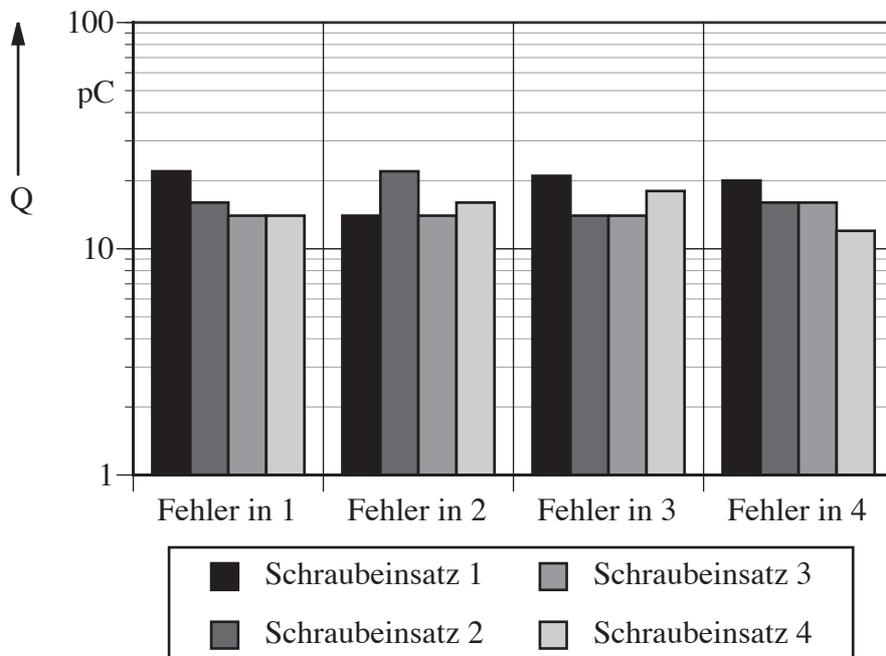


**Bild 4.66:** TE-Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4.  
a:  $U_N$                       b:  $1,1 \cdot U_N$                       c:  $1,3 \cdot U_N$   
Fehlstelle: Kabelbinder A

Messungen mit einer kürzeren Kabelbinderprobe vom Typ B ergaben für die TE-Einsatzspannung ein ähnliches Ergebnis wie für den Typ A. Im folgenden **Bild 4.67** ist zu sehen, daß bei den Meßergebnissen des Typs B maximale Spannungsdifferenzen von etwa 1 kV auftreten.



**Bild 4.67:** TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4. Fehlstelle: Kabelbinder B



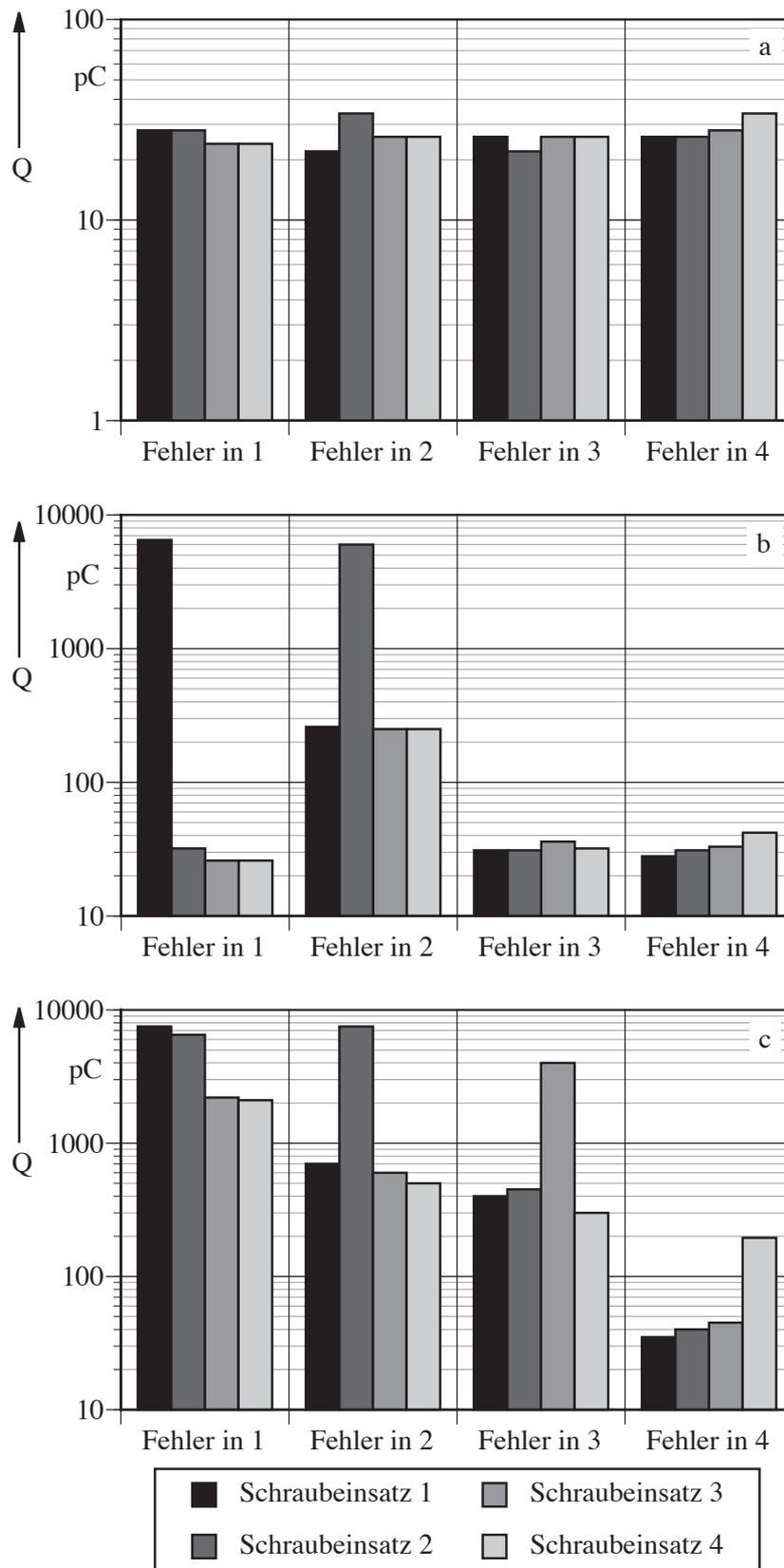
**Bild 4.68:** TE-Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4. Fehlstelle: Kabelbinder B

Auch die in **Bild 4.68** dargestellten TE-Intensitäten bei TE-Einsatz sind nicht sehr unterschiedlich. Bei einem Vergleich der Bilder 4.64 und 4.67 fällt auf, daß eine Verkürzung des Kabelbinders geringere Werte der scheinbaren Ladung zur Folge hat. Kleinere Fehler sind mit Hilfe der bei Einsetzspannung bestimmten TE-Werte infolge geringer Ladungsunterschiede schlecht zu lokalisieren. Eine verbesserte Ortung der Fehlstelle wird durch das Anlegen einer höheren Prüfspannung möglich.

Die Genauigkeit der Lokalisierung der Fehlstelle nimmt mit einer Steigerung der Prüfspannung zu (**Bild 4.69 a-c**). Bei 1,1-facher Nennspannung lassen sich bei den Fehlerpositionen 1 und 2 die Störstellen leicht bestimmen. Bei 1,3-facher Nennspannung sind alle vier Fehlerpositionen durch ausgeprägte Maxima der Amplitude im Bereich der Fehlstellen zu erkennen.

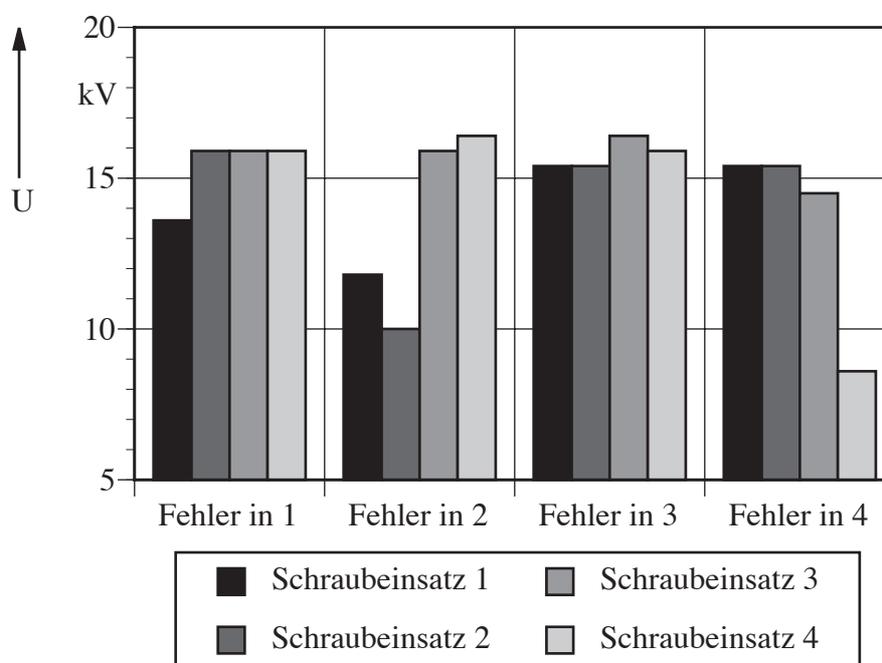
Ursache für die Unterschiede bei den Amplituden der Ladungen ist die Montage der künstlichen Fehlstelle. Ein Kabelbinderstück wird in den Spalt zwischen Schraubeinsatz und Silikonkautschukisolierung eingelegt. Anschließend wird der mit Gleitmittel bestrichene Schraubeinsatz eingeschraubt. Beim Einschrauben kann sich die Position des Kabelbinderstückes im Spalt verändern. Hohlräume können mit Gleitmittel oder mit Luft gefüllt sein. Die künstlichen Fehlstellen können somit unterschiedlich sein.

Die geringen Unterschiede der Einsetzspannung (Bild 4.67) zeigen jedoch, daß die Fehlstellen ungefähr gleich positioniert wurden. Die Amplitude der Teilentladungen bei den verschiedenen Testspannungen sind stark von der jeweiligen Hohlraumgeometrie abhängig, so daß die Aussagekraft der Messergebnisse in Bild 4.69 lediglich auf die Eignung des Meßsystems unter vor Ort Bedingungen beschränkt.



**Bild 4.69:** TE-Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4.  
 a:  $U_N$                       b:  $1,1 \cdot U_N$                       c:  $1,3 \cdot U_N$   
 Fehlstelle: Kabelbinder B

Als dritte Störstellenvariante wurden Teilentladungen für Kupferstäbe vom Typ B mit den Schraubeinsätzen ausgekoppelt. Die gemessenen TE-Einsetzspannungen sind im folgenden **Bild 4.70** dargestellt.

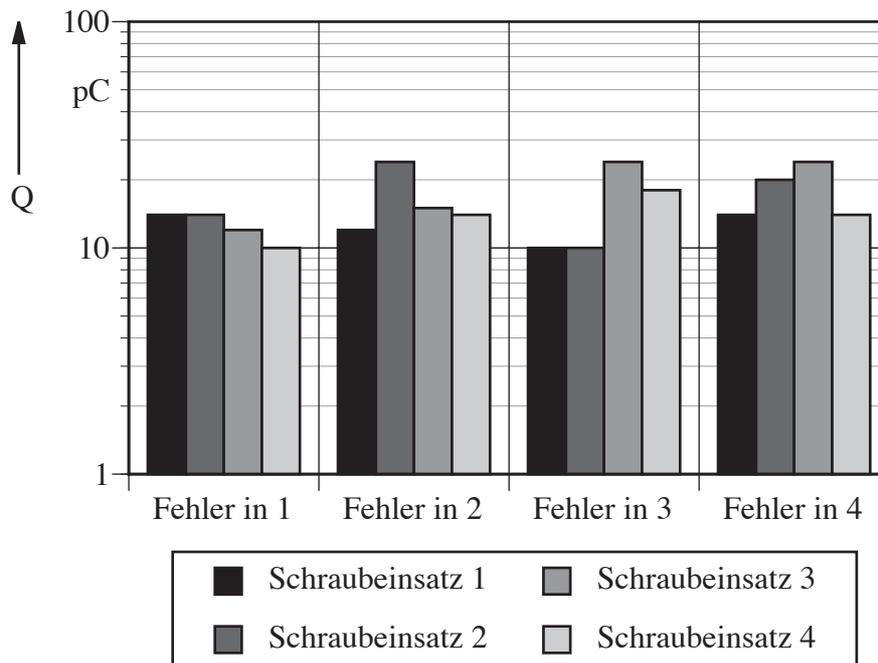


**Bild 4.70:** TE-Einsetzspannung in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4.  
Fehlstelle: Kupferstab B

Im Gegensatz zu den nahezu konstanten Einsetzspannungen der Kabelbinderproben sind bei den Meßergebnissen mit dem Kupferstab größere Schwankungen zu erkennen. Die kleinsten Einsetzspannungen werden am Fehlerort ausgekoppelt. Am deutlichsten ist der Unterschied im Fehlerfall 4. Dort setzen die ersten Teilentladungen bei 8,6 kV ein, was etwa 60 % der Einsetzspannung der drei anderen Meßstellen entspricht. Eine Ausnahme stellt die Fehlerposition 3 dar, bei der eine korrekte Lokalisierung der Fehlerstelle allein über die Interpretation der Werte der TE-Einsetzspannung schwierig ist.

Vergleicht man die Bilder 4.70 und 4.62 miteinander, so liegen bei gleichem Fehlerfall die mit den Durchführungen ermittelten Einsetzspannungen im Durchschnitt etwa 25 % unter den mit den Schraubeinsätzen gemessenen Werten.

Im **Bild 4.71** sind die TE-Intensitäten bei Einsetzspannung für den Fehler mit Kupferstab B dargestellt. Ein Vergleich der Bilder 4.71 und 4.63 zeigt die höhere Empfindlichkeit der Auskopplung über die Schraubeinsätze, da die Amplituden der Ladung durchschnittlich 6 pC über den mit den Durchführungssensoren gemessenen Werten liegen.

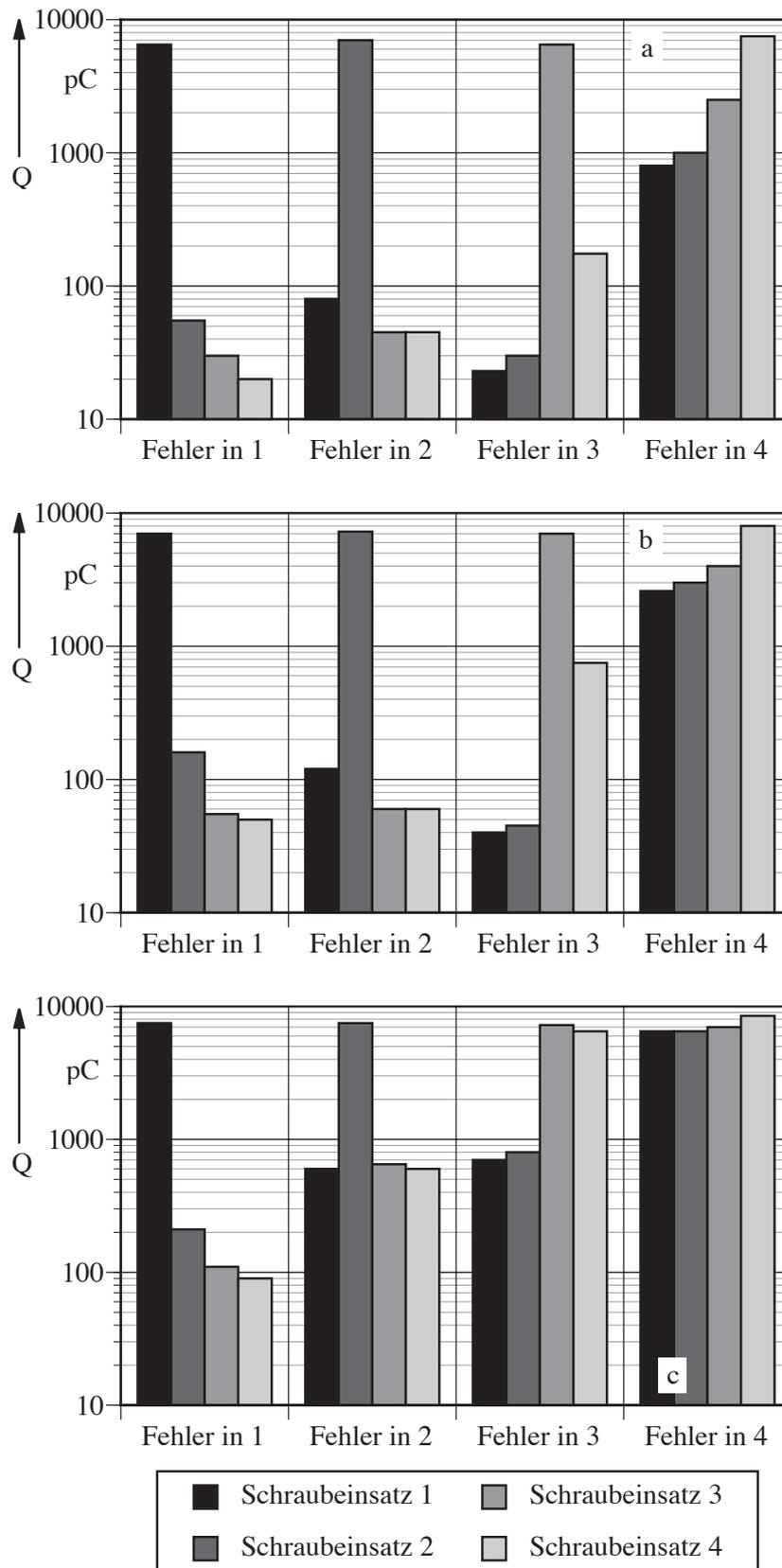


**Bild 4.71:** TE-Intensität bei TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4. Fehlstelle: Kupferstab B

Die in den **Bildern 4.72 a-c** zusammengefaßten Ergebnisse der drei Prüfspannungsreihen zeigen alle höhere TE-Werte in der Umgebung der Fehlstellen. Die höchste Amplitude der Ladung wird mit dem Schraubeinsatz ausgekoppelt, in dessen Bereich die Störquelle liegt. Die Ladungswerte steigen bei einer Erhöhung der Prüfspannung zwar nicht proportional an, aber es ist eine stetige Zunahme der Ladung zu erkennen. Auffällig ist der hohe Absolutwert der Ladungen, der durch die starke Feldinhomoginität der künstlichen Fehlstelle verursacht wird. Bei allen drei Spannungsreihen wurden Ladungswerte über 6000 pC für die Messung unmittelbar an der Fehlerstelle ermittelt.

#### 4.5.6 Bewertung der Meßergebnisse der TE-Einsatzspannungen

Von entscheidender Bedeutung für die Aussagefähigkeit von Teilentladungsmessungen unter vor Ort Bedingungen ist die Meßempfindlichkeit des Systems. Übertragungsverhalten und Grundstörpegel stellen dabei die wichtigsten Faktoren zur Verbesserung des Meßergebnisses dar. Besonders die Ermittlung der TE-Einsatzspannung ist unter vor Ort Bedingungen nur durch zusätzliche Maßnahmen zur Störunterdrückung durchzuführen.



**Bild 4.72:** TE--Intensität in Abhängigkeit vom Fehlerort für die Schraubeinsätze 1-4.  
 a:  $U_N$       b:  $1,1 \cdot U_N$       c:  $1,3 \cdot U_N$   
 Fehlstelle: Kupferstab B

Die zur Bestimmung der Teilentladungseinsetzspannung ausgewählte Bandmittenfrequenz von 2,1 MHz weist unter den gegebenen Bedingungen mit einem Grundstörpegel von ca. 6 pC die besten Voraussetzungen für eine Messung der Einsetzspannungen auf. Für alle Meßreihen gilt, daß die geringsten Spannungswerte im Bereich der Fehlerstellen gemessen wurden. Die kapazitiven Sonden habe die höchste Meßempfindlichkeit in der Nähe der Meßflächen. Die Abnahme der Meßgenauigkeit führt zu einer schlechteren Detektion der Teilentladungen, so daß die Einsetzspannungen scheinbar mit größer werdender Entfernung vom Auskopplungsort ansteigen.

Ein weiterer Faktor für die Höhe der Einsetzspannung stellt die Art der Störstellen dar. Längliche, metallische Fremdkörper führen zu einem früheren TE-Einsatz als Störstellen aus Isolierstoff. Längenunterschiede der Isolierstofffehler fallen dabei weniger ins Gewicht als die der metallischen Fehler. Die Inhomogenität der metallischen Fehlstellen führt zu einer starken Feldüberhöhung und verursacht einen Einsatz der Teilentladungen bei niedrigeren Spannungen. Eine genau definierte Platzierung der Fehlstellen ist aufgrund der Montage schwer möglich. Es kommt daher zu unterschiedlichen Abständen und Lagen der Fehlstellen in der Fuge zwischen Epoxidharz- und Silikonkautschukteilen der Steckadapter, die zu einer unvermeidlichen Varianz der Meßergebnisse führen [Bärsch 91].

Beim Vergleich der Meßsensoren wurden keine bedeutenden Unterschiede festgestellt. Für die in Durchführungen und in Schraubeinsätze eingearbeiteten kapazitiven Sonden wurden gleiche TE-Einsatzspannungen bei gleichem Fehler ermittelt. In die Schraubeinsätze integrierte kapazitive Sonden sind zur Teilentladungsmessung geeignet. Mit geringem Aufwand können somit Teilentladungen detektiert und die Montagequalität der Steckadapter überprüft werden. Durch eine Optimierung der metallischen Flächen in den Schraubeinsätzen für die Teilentladungsmessung ist, bei entsprechender Anpassung der Ankopplungsvierpole und der Vergleichskapazität, eine Erhöhung der Empfindlichkeit möglich.

#### **4.5.7 Bewertung der Meßergebnisse der TE-Intensität bei TE-Einsatz**

Als weitere Größe wurde die Ladung der ersten Impulse bei der jeweiligen TE-Einsatzspannung bestimmt. Die Ladungswerte weisen keine prägnanten Unterschiede bei einer Veränderung des Auskopplungsortes auf, treten aber in den meisten Fällen deutlich aus dem Grundrauschen hervor. Ausgeprägte Maxima sind nur im Bild 4.63 zu erkennen, wo als Fehlerstelle ein Kupferstab vom Typ B verwendet wurde. Die Feldüberhöhung ist bei diesem Fehler so ausgeprägt, daß es schon bei niedrigen Spannungen zu starken Teilentladungen mit Ladungswerten von über 1000 pC kommt.

Eine Ortung der Fehlstelle mit Hilfe des Ladungswertes bei TE-Einsatz ist mit Ausnahme des eben genannten Fehlerfalls bei geringen Prüfspannungen nicht möglich. Für die Kabelbinderproben und den Kupferstab A wurden gleiche Ladungswerte ermittelt. Die Höhe der gemessenen scheinbaren Ladung hängt von der Art der Störstelle ab. Für längliche, metallische Fehlstellen wurden größere Werte gemessen als für Störstellen aus Isolierstoff. Bei Fehlstellen des selben Typs treten für die größeren Abmessungen höhere TE-Impulse auf. Gefährliche Fehler sind anhand der höheren Amplitude der Teilentladungen zu erkennen.

#### **4.5.8 Bewertung der Meßergebnisse bei verschiedenen Prüfspannungen**

Für die Prüfspannungen  $U_N$ ,  $1,1 U_N$  und  $1,3 U_N$  wurden Teilentladungsmessungen durchgeführt. Die Teilentladungsmeßwerte zeigen in den meisten Fällen deutliche Maxima im Bereich der Fehlstelle. Differenzen treten bei den Ergebnissen der defekten Durchführung 3 auf. Aufgrund der hohen scheinbaren Ladung der durch den Fehler verursachten Teilentladungen konnten die Meßwerte der durch die künstliche Fehlstelle erzeugten Teilentladungen nur mit einer Auflösung von 2 Bit aufgezeichnet werden (Bild 4.61), und sind daher nur schwer im Grundrauschpegel zu erkennen. Eine genau Bestimmung ihrer Impulshöhe ist nicht möglich. Fehler bei der Montage der Sammelschienenadapter können nur dann diagnostiziert werden, wenn die Auskopplungseinheiten teilentladungsfrei sind.

Eine Ortung der Störquelle ist über den Vergleich der scheinbaren Ladung der TE-Impulse an den Auskoppelstellen realisierbar. Für alle drei Spannungshöhen ergibt sich ein Ladungsmaximum im Bereich der Fehlstelle.

Bei 1,1-facher Nennspannung ist ein Fehler besonders einfach zu detektieren, da der Unterschied des Ladungsmaximums zu den an den benachbarten Durchführungen gemessenen Werten am deutlichsten ist. Die höchste Ablesegenauigkeit wird erreicht, wenn die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen mit einem Transientenrekorder protokolliert werden (Bild 4.61). Die Diagnose kann durch die Auswertung mit einem Arbeitsplatzrechner erleichtert und automatisiert werden.

Für die Auskopplung von Teilentladungen in den Steckadaptern sind in die Schraubeinsätze integrierte Sensoren genau so gut geeignet wie in die Durchführung eingegossene Sensoren. Für 1,3-fache Nennspannung werden mit den Schraubeinsätzen unabhängig von der Fehlerart sehr hohe TE-Signale ausgekoppelt. Für die Kabelbinderproben und für den Kupferstab vom Typ A werden Amplituden von bis zu 10000 pC gemessen.

Eine Ortung der Störstelle ist bei dieser Höhe der Prüfspannung schwierig. Signifikantere Ladungsunterschiede treten bei den Messungen mit 1,1-facher Nennspannung auf, so daß eine genaue Aussage über den Fehlerort getroffen werden kann.

#### **4.5.9 Bewertung des Meßsystems für vor Ort Prüfungen**

Das entwickelte Diagnosesystem hat ein geringes Gewicht und ein geringes Bauteilvolumen. Es besteht aus wenigen, einfach aufgebauten robusten Modulen und ist leicht zu transportieren. Durch die Verwendung von in der Sammelschienenkonstruktion vorhandenen Elektroden als Sensoren zur Teilentladungsauskopplung kann das Meßsystem auch bei älteren Schaltanlagen angewendet und nachgerüstet werden. Die an vor Ort Prüfungen gestellten Bedingungen werden erfüllt.

#### **4.5.10 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Teilentladungsmessung an einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene**

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Untersuchungen an einer Sammelschiene für Mittelspannungs-Schaltanlagen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

##### **Ergebnisse der Messung der TE-Einsetzspannung:**

- Die geringsten TE-Einsetzspannungen wurden im Bereich der Fehlstellen gemessen. Je näher die zur Auskopplung verwendete kapazitive Sonde an der Fehlerstelle liegt, desto geringer sind die Einsetzspannungen.
- Die TE-Einsetzspannung ist von der Art der Störstelle abhängig. Je stärker die Feldverzerrung durch die Fehlstelle ist, desto niedriger ist die TE-Einsetzspannung.
- Beide verwendeten kapazitiven Sonden zeigen gleiche TE-Einsetzspannungen bei gleichen Fehlern. Die Durchführungssensoren und die in die Schraubeinsätze integrierten Sensoren sind somit hinsichtlich ihrer Meßempfindlichkeit gleichwertig.

##### **Ergebnisse der Messungen der TE-Intensitäten bei TE-Einsetzspannung:**

- Eine Ortung der Fehlerstelle mit Hilfe der Amplitude der scheinbaren Ladung bei TE-Einsetzspannungen ist nicht möglich. Es werden gleiche Ladungswerte bei einer Variation des Auskopplungsortes und gleichbleibender Fehlerquelle ermittelt.
- Die Amplitude der ausgekoppelten scheinbaren Ladung ist unabhängig vom verwendeten Sensor.

### **Ergebnisse der Messungen bei verschiedenen Prüfspannungen:**

- Mit dem Meßsystem können ohne digitale Nachbearbeitung Teilentladungen mit einer scheinbaren Ladung von 8 pC erkannt werden.
- Bei den Messungen wurde eine defekte Durchführung entdeckt, so daß die Meßmethode sehr empfindlich bei Fertigungsfehler im Bereich der Sonden ist. Das Meßsystem eignet sich daher gut zur Prüfung der Fertigungsqualität der Durchführungen im Rahmen der Qualitätssicherung.
- Die Ortung von Fehlstellen ist durch einen Vergleich der scheinbaren Ladung möglich. Maximale Ladungswerte werden in der Umgebung der Fehlstelle gemessen. Die untersuchten Sensoren weisen die größte Meßempfindlichkeit im Bereich des Einbauortes auf. Bei einer Vergrößerung des Abstandes zwischen Auskopplungssensor und Fehlstelle verringern sich die gemessenen scheinbaren Ladungen.
- Die Meßempfindlichkeit der beiden kapazitiven Sonden ist gleich. Bei den drei untersuchten Spannungshöhen wurden für die Sonden in den Durchführung und im Schraubeinsatz gleiche Amplitude der Teilentladungen ermittelt.

## 5 Ausblick

Die 110-jährige Geschichte der Mittelspannungs-Schaltanlagentechnik führte zu immer zuverlässigeren und wartungsärmeren Geräten mit dem Ziel einer wartungsfreien Schaltanlage auf kleinstem Raum, wobei die Möglichkeit der Steigerung der Verfügbarkeit durch Überwachung der Schaltanlagen im Betrieb mit Hilfe der technischen Diagnostik immer mehr an Bedeutung gewinnt. Bereits im Jahre 1983 wurde eine Einrichtung zur Kontrolle der Betriebsfähigkeit von Schaltgeräten zum Patent angemeldet [Dörfler 83]. Das Hauptaugenmerk galt dabei der Bestimmung der verbleibenden Schaltkapazität durch die Erfassung der Ströme und der Schaltanzahl und deren Integration mit Hilfe eines Rechners. Außerdem wurden Erfassungseinrichtungen für den Isolationszustand der Löschkammer, den Zustand der Schaltkontakte und der Mechanik sowie der Temperaturverteilung am Schaltgerät und den Anschlußleitungen genannt, ohne hierfür eine technische Realisierungen vorzuschlagen.

Eine Fehleranalyse von Mittelspannungs-Schaltanlagen zeigt, daß die Überwachung der Schaltermechanik für eine bedarfsgerechte Wartung störungsfreien Betrieb von großer Bedeutung sind. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Meßsystem zur Überwachung der Mechanik eines Vakuum-Leistungsschalters entwickelt.

Gasisolierte gekapselte Mittelspannungs-Schaltanlagen werden bevorzugt in Gebieten mit tropischem Klima eingesetzt. Das Problem der Permeation von Feuchte in gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen ist konstruktiv zu lösen, da besonders durch gummielastische Dichtungen Feuchte in die Kapselung gelangen. Dieser Vorgang hängt vom Wasserdampfpartialdruck ab, so daß auch bei Überdruck in der Kapselung Feuchtigkeit eindringen kann. Es müssen daher besonders ausgewählte Dichtungsmaterialien mit geringer Permeationsleitfähigkeit ausgesucht und ausreichende Mengen Trockenmittel in die Anlage eingebaut werden. Wenn sich die Permeation von Wasserdampf in Mittelspannungs-Schaltanlagen mit vertretbarem Aufwand nicht verhindern läßt, muß zur Diagnose eine Feuchteüberwachung des Isoliergases vorgesehen werden. Spiegel-Hygrometer sind unempfindlich gegenüber aggressiven Zersetzungsprodukten und altern zeigen keine Alterungserscheinungen.

Ein wichtiges Mittel zur technischen Diagnostik von Mittelspannungs-Schaltanlagen ist die Teilentladungsmessung. Im Hochspannungsbereich wurde dafür die UHF-TE-Meßtechnik entwickelt. Durch die Messung im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 2 GHz sind empfindliche vor Ort Messungen möglich, da die meisten Störquellen in diesem Frequenzbereich wirkungsvoll unterdrückt werden.

Es wurde gezeigt, daß diese Technik auch für Mittelspannungs-Schaltanlagen geeignet ist. Durch eine Simulation ließ sich das TE-Verhalten der untersuchten Schaltanlage gut vorherbestimmen. Messungen bestätigten die berechneten Zeit und Frequenzverläufe.

Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit untersuchten „konzentrischen“ Schaltanlagen, haben die meisten Mittelspannungs-Schaltanlagen eine „quaderförmige“ Kapselung. Um die UHF-Methode hier einsetzen zu können muß die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in diesen Geometrien untersucht werden. Gerade für diese Anlagentypen könnte sich auch die TE-Auskopplung über andere Sensoren anbieten.

Sollen ausgedehntere Meßobjekte mit nur einem Sensor überwacht werden, so muß die breitbandige VHF- oder die UHF-TE-Meßmethode angewendet werden. Im Fall der VHF-TE-Messung ist die Signalstärke bei ausreichender Bandbreite unabhängig vom Fehlerort. Die UHF-TE-Messung erfordert die aufwendigsten Geräte. Sie wird deshalb besonders bei Hochspannungs-Schaltanlagen eingesetzt. Wie die Untersuchungen zur UHF-TE-Messung und -Simulation an einer SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlage zeigen, läßt sich die Methode auch in der Mittelspannungs-Ebene anwenden. Der hohe technische und finanzielle Aufwand steht jedoch dem Einsatz zur Überwachung von Mittelspannungs-Schaltanlagen entgegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb preisgünstige Alternativen aufgezeigt. Es wurde ein breitbandiges Meßsystem mit einer Störunterdrückung nach dem Differenzprinzip entwickelt. Die TE-Sensoren sind kapazitive Sonden, die entweder in der Konstruktion bereits vorhanden sind oder mit geringem Aufwand implementiert werden können. Messungen wurden an Schaltanlagen mit künstlichen Fehlstellen unter Vor-Ort-Bedingungen durchgeführt. Die Auswertung der Meßergebnisse zeigte, das sich viele Fehler bei der Montage der Geräte bereits ohne den Einsatz von Rechnern zur Nachbearbeitung der Daten sicher diagnostizieren lassen. Es sollten schon im Prüffeld Vergleichsmessungen mit dieser TE-Meßmethoden durchgeführt werden. Die Ergebnisse bilden die Wissensbasis für die Interpretation der Vor-Ort gemessenen Daten. Die Auswertung kann mit Hilfe eines Rechners automatisiert werden.

Die Möglichkeit einer Teilentladungs-Überwachung von Mittelspannungs-Schaltgeräten sollte schon bei der Planung einer Anlage mit berücksichtigt werden. Die Implementation zusätzlicher Sensoren in eine Anlage ist oft ohne großen Mehraufwand möglich und läßt sich wirtschaftlich schon durch einen vermiedenen Störfall mit anschließender längerer Reparatur- und Stillstandszeit rechtfertigen. Auch die Überprüfung einer bestehenden Schaltanlage ist möglich, jedoch nur mit erheblichem konstruktivem und finanziellen Aufwand. Die Bewertung der Messungen ist in bestehenden Anlagen mit großen Unsicherheiten verknüpft, da keine Referenzwerte aus Entwicklungs- und Qualitätssicherungsprüfungen vorliegen.

Die breitbandige TE-Messung mit einer Störunterdrückung nach dem Differenzprinzip wird für den Vor-Ort-Einsatz in den meisten Fällen die günstigste Variante darstellen. Sie erfordert einen vergleichsweise kostengünstigen Aufbau, der einfach an die Schaltanlage angepaßt werden kann.

Durch die breitbandige Signalauskopplung ist eine Auflösung im Zeitbereich auch für die Messung an SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen möglich, so daß im Gegensatz zur schmalbandigen TE-Messung Einzelimpulse detektiert werden können und damit keine fehlerhafte TE-Diagnose zu erwarten ist. Über die ortsabhängige Meßempfindlichkeit der kapazitiven Feldsonden läßt sich zusätzlich eine einfache Ortung des Fehlerortes durchführen.

Durch den Einsatz nicht konventioneller Wandler ergeben sich zukünftig bessere Möglichkeiten zur Teilentladungs-Überwachung. Rogowskispulen werden bereits in einzelne Schaltanlagen zur Strommessung fest eingebaut. Sie eignen sich auch hervorragend zur Auskopplung von Teilentladungen [z.B. Hartje 89]. Optische Spannungs- und Stromwandler könnten sich ebenfalls zur Messung transienter Vorgänge eignen.

Überwachungssysteme zur technischen Diagnostik von Mittelspannungs-Schaltanlagen lassen sich preisgünstig realisieren. Die technischen Möglichkeiten dazu sind derzeit größer als der Bedarf bei den Energieversorgungsunternehmen. Durch die bevorstehende Öffnung der Märkte für elektrische Energie und dadurch steigenden ökonomischen Druck kann sich dieser Bedarf jedoch verändern. Bei Mittelspannungs-Schaltanlagen sollte daher auf die Nutzung der Möglichkeiten der technischen Diagnostik zur Verbesserung der Verfügbarkeit und bedarfsgerechten Wartung von Mittelspannungs-Schaltanlagen nicht verzichtet werden.

## **6 Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurde über Möglichkeiten der Überwachung und Diagnose von Schaltern und Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich berichtet. Ein historischer Rückblick zeichnet die Entwicklung der Schaltanlagentechnik seit ihrer Entstehung nach und verdeutlicht die Problemstellungen und die Lösungen, die zu den Bauformen moderner Mittelspannungs-Schaltanlagen führten.

Eine Auswertung der VDEW-Störungs- und Schadensstatistik für Deutschland lieferte die Basis für die Ermittlung der Schaltanlagenbauteile, für die eine Entwicklung von Methoden und Geräten zur Überwachung und Diagnose sinnvoll ist. Weitere Fragestellungen ergaben sich aus den Betriebserfahrungen unter schwierigen tropischen Umweltbedingungen. Mit Systemen zur

- Überwachung von Schaltern,
- Überwachung der Isoliergasfeuchte in gekapselten gasisolierten Schaltanlagen und
- Teilentladungsmessung in Mittelspannungs-Schaltanlagen

läßt sich eine erhöhte Zuverlässigkeit und die bedarfsgerechte Wartung von Mittelspannungs-Schaltanlagen realisieren. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Lösungen und entwickelten Geräte lassen sich mit geringem Engineering-Aufwand derzeit existierende Schaltanlagen im Mittelspannungs-Bereich integrieren.

### Überwachung von Schaltern

Verschleiß oder Schäden der Schaltermechanik sind die häufigste Ausfallursache in Mittelspannungs-Schaltanlagen. Deshalb wurde ein System zur Überwachung und Diagnose der Schaltermechanik entwickelt und getestet. Das Überwachungssystem basiert auf einer inkrementalen Winkelmessung der Antriebswelle. Die Auswertung der Winkelmessung erfolgt rechnergestützt mit Hilfe eines selbstentwickelten Programms.

Änderungen der Schaltermechanik verursachen typische Änderungen des Drehwinkelverlaufs und der Drehwinkelgeschwindigkeit. Schäden am Antriebssystem der Schaltkontakte sind anhand der Veränderungen bei den Verläufen der Einschaltvorgänge erkennbar. Besonders gut eignen sich die maximale Winkelgeschwindigkeit und die Einschaltgeschwindigkeit als Vergleichsgrößen zur Charakterisierung des Einschaltvorganges bei Änderungen der Antriebsmechanik.

Defekte des Dämpfungssystems lassen sich aus veränderten Ausschaltverläufen ablesen. Sie können deshalb unabhängig von Änderungen im Bereich der Antriebsmechanik detektiert werden. Schäden am Schalter sind dadurch zu erkennen, daß sich die Schwingungsamplitude und damit die maximale positive Winkelgeschwindigkeit deutlich erhöhen. Durch das System zur Schalterdiagnose lassen sich solche Änderungen aber leicht diagnostizieren, so daß ein Totalausfall des Schalters durch gezieltes Eingreifen vermieden werden kann.

Zur Automatisierung der Schalterdiagnose bietet sich eine Fourier-Analyse der Zeitsignale an. Die typischen Änderungen in den Zeitverläufen korrespondieren mit entsprechenden Spektralanteilen im Frequenzbereich. Wenn die Schwellwerte dieser Frequenzen für einen Schaltertyp bekannt sind, kann eine einfache und kostengünstige automatische Überwachung und Diagnose der Schaltermechanik vorgenommen werden.

#### Überwachung der Isoliergasfeuchte in gekapselten gasisolierten Schaltanlagen

Die Feuchte des Isoliergases ist ein wichtiger Parameter für die Betriebssicherheit von Schaltanlagen. Beim Einsatz unter feucht-tropischen Verhältnissen können durch Permeation große Mengen Wasserdampf in die gekapselte Schaltanlage eindringen, so daß eine Überwachung der Isoliergasfeuchte dringend zu empfehlen ist, damit die Trocknung des Isoliergases bedarfsgerecht geplant und vorgenommen werden kann.

Am Beispiel einer SF<sub>6</sub>-gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen wurde der Einfluß der Gasfeuchte auf die Teilentladungseinsetzspannung und das Überslagverhalten bei Wechselspannungsbeanspruchung untersucht. Dabei ist das Grenzschichtverhalten der in der Schaltanlage eingesetzten Epoxidharzteile von entscheidender Bedeutung.

Teilentladungen setzten in der mit feuchtem SF<sub>6</sub>-Gas befüllten Schaltanlage schon unterhalb der Nennspannung ein, wenn die Taupunkttemperaturen des Gases zwischen 17 und 18 °C ( $w_{\text{rel}} = 66 - 72 \%$ ) liegen. Die niedrigste Taupunkttemperatur, bei der ein Überslag bei 2,6-facher Nennspannung stattfand, betrug 19,7 °C ( $w_{\text{rel}} = 80 \%$ ). Oberhalb von 94 % relativer Gasfeuchte sank die Überslagspannung nicht unter 1,5-fache Nennspannung. Ein sicherer Dauerbetrieb ist jedoch bei diesen hohen Gasfeuchten nicht mehr möglich, da sich die Überslagspannung in einer gekapselten Schaltanlage bei TE-Dauerbeanspruchung stark vermindert.

## Teilentladungsmessung in Mittelspannungs-Schaltanlagen

Teilentladungsmessungen sind das wichtigste Hilfsmittel bei der Überwachung und Diagnose von Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei wichtige Anwendungsfälle genauer untersucht:

- Konventionelle Teilentladungsmessung an gasisolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen,
- UHF-Teilentladungsmessung an einer SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlage,
- Teilentladungsmessung an einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene.

Für die Teilentladungsmessung im Frequenzbereich von 40 kHz bis 1 MHz wurde ein einfaches und kostengünstiges Meßsystem entwickelt. Das differentielle Meßprinzip sorgt für die Störunterdrückung. Als Sensoren zur Erfassung von Teilentladungen kommen kapazitive Feldsonden oder speziell entwickelte Sensorstützer zum Einsatz. Sensorstützer sind die einfachere und kostengünstigere Alternative für eine Mittelspannungs-Schaltanlage. Das Meßsystem hat den großen Vorteil, daß es seine größte Meßempfindlichkeit in der Umgebung der Sensoren besitzt. Gefährliche Teilentladungen im Bereich der Stützeroberfläche können deshalb besonders gut detektiert werden. Weil die Meßempfindlichkeit mit der Entfernung vom Sensor abnimmt, ist eine Kalibrierung nicht mit extern eingespeisten Impulsen nicht möglich.

Eine Alternative stellt die ebenfalls nicht kalibrierbare UHF-Teilentladungsmessung dar. Mit dieser Methode können größere Anlagenabschnitte mit einer Sonde überwacht werden. Es wurde ein Simulationsmodell zur Nachbildung von Teilentladungsvorgängen in einer SF<sub>6</sub>-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlage untersucht. Die Berechnung des Zeit- und Frequenzverlaufes eines Teilentladungssignals wurde mit gemessenen Verläufen verglichen. Die gute Übereinstimmung bestätigt die Gültigkeit des entwickelten Modells. Auch geringe Amplituden der Teilentladungsimpulse lassen sich durch Spektralanteile im GHz-Bereich nachweisen. Die Teilentladungsmessung im UHF-Bereich kann auch für Inbetriebnahmeprüfungen und Teilentladungs-Überwachung von Mittelspannungs-Schaltanlagen angewendet werden. Der hohe Preis der benötigten Geräte steht jedoch derzeit der Verwendung im Mittelspannungsbereich entgegen.

Für die Teilentladungsmessung an einer mit Silikonkautschuk isolierten Sammelschiene für Mittelspannungs-Schaltanlagen konnte das differentielle Meßsystem erfolgreich adaptiert werden. Vorhandene Durchführungen und in die Schraubeinsätze integrierten Sonden wurden als Sensoren verwendet.

Beide Möglichkeiten sind hinsichtlich ihrer Meßempfindlichkeit gleichwertig. Bereits ohne digitale Nachbearbeitung können Teilentladungen mit einer scheinbaren Ladung von 8 pC diagnostiziert werden. Da die Meßmethode sehr empfindlich auf Fertigungsfehler im Bereich der Sensoren reagiert, wurde bei den Messungen eine defekte Durchführung entdeckt. Das Meßsystem eignet sich deshalb nicht nur zur Überwachung der Sammelschiene im Betrieb, sondern auch zur Überprüfung der Fertigungsqualität der Durchführungen im Rahmen der Qualitätssicherung.

Durch die in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren und Geräte kann die Zuverlässigkeit von Schaltern und Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich deutlich gesteigert werden. Bei entsprechender Nachfrage können kostengünstige Diagnosesysteme von den Herstellern angeboten werden. Für den Anwender läßt sich durch die Überwachung und Diagnose der Schalter und Schaltanlagen eine bedarfsgerechte Wartung und Instandhaltung realisieren.

## 7 Literaturverzeichnis

- [Achatz 96] *Achatz, N.; Gorablenkow, J.; Hücker, T.; Koch, H.:* Den Teilentladungen auf der Spur, EV-Report 3/96, Siemens, S. 4-5
- [Albiez 89] *Albiez, M.; Zaengl, W.; Meppelink, J.; Diederich, K.J.:* Design and Calibration of an Universal Sensor fo the Maesurement of Partial Discharges and Very Fast Transients in GIS, 6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), New Orleans, 1989, Paper No. 42.28
- [Albiez 91] *Albiez, M.; Leijon, M.:* PD-Measurement in GIS with Electric Field Sensor and Acoustic Sensor, 7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Dresden, 1991, Paper No. 75.08
- [Albiez 92] *Albiez, M.:* Teilentladungsmessung an SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen, Diss. ETH Nr. 9694, ETH Zürich, 1992
- [Algermissen 88] *Algermissen, W.; Lübben, W.; Kübler, B.:* SF<sub>6</sub>-isolierte Lasttrennschalteranlagen - Eine Technik für die Netzstation von morgen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 87, 1988, Heft 16/17, S. 770-774
- [Ambrosch 82] *Ambrosch, H.; Gorgius, D.; Hippmann, N.:* Teilentladungserfassung und -ortung in SF<sub>6</sub>-isolierten Hochspannungsschaltanlagen unter Anwendung der Rauschanalyse, Elektrie 36, 1982, Heft 2, S. 63-67
- [Arakelyan 93] *Arakelyan, G.:* Preventing Condensation in SF<sub>6</sub> Electrical Equipment, Elektrotechnika, Vol. 64, 1993, No. 4, pp. 54-57
- [Bach 96] *Bach, R.; Than, S.:* Untersuchungen an luft-feststoffisolierten Mittelspannungs-Drehlasttrennern, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95, 1996, Heft 8, S. 484-494
- [Bachelier 93] *Bachelier, E.; Schaffarczyk, A.:* Entscheidungskriterien für gasisolierte Mittelspannungsschaltanlagen, ETZ 1993, Bd. 114, Heft 16, S. 992-999
- [Bärsch 91] *Bärsch, R.; Hoffmann, J.; Schmuck, F.:* Accelerated Ageing Tests and Diagnostic Methods of Housing Materials for Composite Insulators, 7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Dresden, 1991, Paper No. 25.05
- [Baltzer 94] *Baltzer, M.; Bürger, J.; Lorenz, D.:* Verfahren und Einrichtung zum Überwachen einer Schaltstange, Deutsche Patentanmeldung DE 4440423, 07. 11. 1994
- [Balzer 97] *Balzer, G.:* Störungsanalyse der Betriebsmittel einer Schaltanlage, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96, 1997, H. 4, S. 142-144

- [Bargigia 92] *Bargigia, A.; Kulonowicz, W.; Pignini, A.:* Detection of Partial Discharges in GIS, IEEE Trans., PD, Vol. 7, No. 3, 1992, pp. 1239-1246
- [Barkan 89] *Barkan, P.; Howard, J.:* Automatic Trend Analysis in an On-Line Condition Monitoring Device for Intermittently Operated Electromechanical Systems, IEEE Proc., Annual Reliability and Maintainability Symposium, Atlanta, 1989, pp. 458-464
- [Baumbach 95] *Baumbach, J.I.; Klockow, D.; Kurrat, M.; Soppart, O.; Alberti Segundo, S.M.:* Verfahren zur Überwachung des Qualitätszustandes des Füllgases Schwefelhexafluorid in gasgefüllten Anlagen, PCT-Anmeldung WO 97/05635, 2. August 1995
- [Baumgartner 91] *Baumgartner, R.; Fruth, B.; Lanz, W.; Petterson, K.:* Partial Discharges - Part IX: PD in Gas-Insulated Substations - Measurement and Practical Consideration, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1991, Vol. 7, No. 6, pp. 5-13
- [Baumgartner 92] *Baumgartner, R.; Fruth, B.; Lanz, W.; Petterson, K.:* Partial Discharges - Part X: PD in Gas-Insulated Substations - Measurement and Practical Consideration, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, Vol. 8, No. 1, pp. 16-27
- [Becher 70] *Becher, W.; Massonne, J.:* Beitrag zur Zersetzung von Schwefelhexafluorid in elektrischen Lichtbögen und Funken, ETZ-A 1970, Bd. 91, H 11, S. 605-610
- [Beierl 95] *Beierl, O.; Müller, A.; Wüst, B.; Vester, M.:* Online-Diagnose und Monitoring für Schaltanlagen?, ETZ 1995, Bd. 116, H 10, S. 8-16
- [Benken 68] *Benken, H.-G.:* Über die elektrische Festigkeit von Fugen zwischen festen Isolierstoffen, ETZ-A, 1968, Bd. 89, Heft 15, S. 356-361
- [Bertram 00] *Bertram, H.A.:* Ueber moderne Hochspannungsapparate, ETZ, 1900, Heft 32, S. 667-674 und H. 33, S. 697-699
- [Bewerungen 26] *Bewerungen, N.:* Der Aufbau der Hochspannungsschaltanlagen, Diss. TH Darmstadt, 1926
- [Beyer 86] *Beyer, M.; Boeck, W.; Möller, K.; Zaengl, W.:* Hochspannungstechnik, Springer Verlag, 1986
- [Beyer 91] *Beyer, M.:* Elektrisches und dielektrisches Verhalten von Epoxidharzformstoffen, Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen, Uni. Hannover, 1991
- [Biermanns 29] *Biermanns, J.:* Hochleistungsschalter ohne Öl, ETZ, 1929, Bd. 50, H. 30, S. 1073-1079

- [Biermanns 30] *Biermanns, J.*: Hochleistungsschalter ohne Öl, ETZ, 1930, Bd. 51, H. 9, S. 299-303
- [Binns 90] *Binns, D.F.; Muhfti, A.H.; Malik, N.H.*: Optical Discharge Detection in SF<sub>6</sub>-Insulated Systems, IEEE Trans., EI, Vol. 25, No. 2, 1990, pp. 405-414
- [Böhme 76] *Böhme, H.*: Betauung von Isolierungen innerhalb von Mittelspannungs-Schaltzellen bei Raumklimaänderungen, Elektrische 30, 1976, Heft 2, S. 94-95
- [Böhme 92] *Böhme, H.*: Mittelspannungstechnik, Verlag Technik, Berlin · München, 1992
- [Borsi 95] *Borsi, H.; Gockenbach, E.; Wenzel, D.*: Separation of Partial Discharges from Pulse Shaped Noise Signals with the Help of Neural Networks, IEE Proc., Vol. 142, No. 1, 1995, pp. 69-74
- [Boucher 75] *Boucher, K.*: Global Climate, The English Universities Press Ltd., 1975
- [Braun 87] *Braun, J.M.; Gonzales, L.A.; Chu, F.Y.*: A Model of Moisture Ingress and Distribution in Gas Insulated Switchgear, CIGRÉ-Symposium, Vienna, 1987, paper 400-04
- [Brockmann 81] *Brockmann, R.*: Über das Grenzschichtverhalten von definiert verunreinigten Epoxidharzisolatoren in Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) bei hohen Wechselspannungen, Diss. Uni. Hannover, 1981
- [Browne 60] *Browne Jr., T.E.; Leeds, W.M.*: A New Medium for Circuit Interruption, CIGRE, 1960, Report No. 111
- [Brückner 65] *Brückner, P.; Flöth, H.*: Vollisolierte gekapselte Schaltanlagen für Reihe 110 mit sehr kleinem Raumbedarf, ETZ-A, 1965, Bd. 86, Heft 7, S. 198-204
- [Brüggemann 97] *Brüggemann, G.*: Alternative in der Mittelspannung - Leistungsschalter in SF<sub>6</sub>-Technik, ETZ, 1997, Heft 23-24, S. 14-16
- [CIGRÉ 72] *CIGRÉ WG 23.03*: The Compilation of the International Experience on Installation and Operation with Metalclad Substations, CIGRÉ, 1972, Paris, Report 23-04
- [CIGRÉ 92] *CIGRÉ WG 15.03*: Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems, CIGRÉ, 1992, Paris, Paper 15/23-01
- [Cohn 30] *Cohn, A.; Ulbrich, V.*: Vielfachfunkenkammer für Luftschalter nach Dolivo-Dobrowolski, in *Petersen, W.*: Forschung und Technik, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1930, S. 333-339

- [Cooper 38] *Cooper, F.S.*: Elektrische Isoliermittel, DBP 976 201 US Prior., 9. Juli 1938 und U.S. Patent 2 221 671, 12. November 1940
- [de Kock 96] *de Kock, N.; Coric, B.; Pietsch, R.*: Teilentladungsmessung an gasisolierten Schaltanlagen bei ultrahohen Frequenzen, Bull. SEV/VSE, 1996, Heft 11, S. 39-44
- [Diercke 74/1] Deutschland - Klima, in Diercke Weltatlas, Georg Westermann Verlag, Braunschweig, 1974, S. 24
- [Diercke 74/2] Erde - Klima, in Diercke Weltatlas, Georg Westermann Verlag, Braunschweig, 1974, S. 176
- [Doege 89] *Doege, R.*: Untersuchung an koaxialen Schirmstrukturen mit innerer transients Erregung am Beispiel einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage, Diss. Uni. Dortmund, 1989
- [Dörfler 83] *Dörfler, R.; Moermann, B.; Voigt, R.; Krause, K.; Schnabel, R.; Weidner, G.; Kummerow, G.; Schröther, G.; Zentgraf, L.*: Einrichtung zur Kontrolle der Betriebsfähigkeit von Schaltgeräten, Deutsches Patent DE 3347185, 27. 12. 1983
- [Drescher 93] *Drescher, G.; Karrenbauer, H.*: Technische Diagnose in Mittelspannungs-Schaltanlagen, VDE Kurpfalz Seminar Mittelspannungsschaltanlagen, 1993, Vortrag 6, S. 1-30
- [Drescher 96] *Drescher, G.; Späck, H.*: Alterungsprüfung für Mittelspannungsanlagen für erschwerte Umgebungsbedingungen nach IEC-Report 932, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95, 1996, Heft 17/18, S. 1171-1176
- [Dullni 95] *Dullni, E.; Fink, H. Hörner, G.*: Steuerung moderner Leistungsschalter, ETZ, 1995, Heft 11, S. 8-14
- [Dullni 97] *Dullni, E.; Fink, H. Hörner, G.; Leonhardt, G.; Reuber, Ch.*: Neu: Vakuumeistungsschalter mit permanent-magnetischem Antrieb, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96, 1997, H. 21, S. 1205-1208
- [Edelmann 69] *Edelmann, K.; Wyden, H.*: Einfluß von Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften von Epoxidharzen, Kunststoffe, Bd. 59, 1996, Heft 1, S. 43-45
- [Elzner 90] *Elzner, J.*: Winkelmessung mit kapazitivem Winkeldreh, SENSOR report, Heft 1, 1990, S. 19-20
- [Einsele 64] *Einsele, A.*: Der Siemens-F-Schalter 220 kV, 15 GVA, Siemens Zeitschrift, 38. Jahrg., 1964, Heft 4, S. 225-228
- [ETG 89] *ETG SEV/ASE*: Präventives Messen in elektrischen Anlagen, Reihe ETG, Bd. 8d, Zürich, 1989

- [Feld 93] *Feld, H.; Fredrich, K.; Niemeyer, M.; Reinert, M.; Trapp, N.:* Optical Travel Recorder Used in High Voltage Engineering, 8th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Yokohama, 1993, Paper No. 68.04
- [Fleischer 93] *Fleischer, L.:* Gasisolierte Mittelspannungs-Schaltanlagen, VDE Kurpfalz Seminar Mittelspannungsschaltanlagen, 1993, Vortrag 5, S. 1-66
- [Frazer 29] *Frazer, J.H.:* An Optical Study of Absorbed Films, *Phys. Rev.*, Vol. 33, 1929, pp. 97-104
- [Frewe 72] *Frewe, W.:* Neues Hochspannungs-Vakuumschütz 3 TL 5, *Siemens Zeitschrift*, Jahrgang 46, 1972, Heft 4, S. 260-261
- [Gerer 94] *Gerer, A.; Gorablenkow, J.; Schmitt, H.:* Premiere für Feldsonden, *EV-Report*, Siemens, 1994, Heft 1, S. 4-6
- [Giesenbauer 76] *Giesenbauer, J.:* Über das Grenzschichtverhalten von Epoxidharzisolatoren bei hohen Wechselspannungen, *Diss. TU Hannover*, 1976
- [Gockenbach 95] *Gockenbach, E.; Straßburg, K.:* PD-Measurement and Localization in High Voltage Switchgears, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 5602
- [Grosse 38] *Grosse, V.:* Lichtbogenlöschmittel für elektrische Apparate, *DBP 977 250*, 6. September 1938
- [Groth 93] *Groth, R.; Steingraber, W.:* Diagnose an Hochspannungs-Leistungsschalter, *ETZ*, 1993, Heft 19, S. 1214-1218
- [Habermann 69] *Habermann, W.; Lindmayer, M.:* Untersuchung über die Beständigkeit von Isolierstoffen in durch Lichtbogenentladungen zersetztem Schwefelhexafluorid, *Calor-Emag-Mitteilungen*, Heft I/II, 1969, S. 30-34
- [Hampton 85] *Hampton, B.F.; Meats, R.J.; Pryor, B.; Watson-Jones, B.:* The Application of Partial Discharge Measurement to GIS, *Int. Symp. on GIS*, paper 33, Toronto, 1985
- [Hampton 88] *Hampton, B.F.; Meats, R.J.:* Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations, *IEE Proc.*, Vol. 135, Pt. C, No. 2, 1988, pp. 137-144
- [Hampton 90] *Hampton, B.F.; Pearson, J.S.:* Monitoring Gas Insulated Substations, *PCT-Anmeldung WO 92/06385*, 3. Januar 1990
- [Hampton 92] *Hampton, B.F.; Pearson, J.S.; Jones, C.J.; Irwin, T.; Welch, I.M.; Pryor, B.M.:* Experience and Progress with UHF Diagnostics in GIS, *CIGRÉ*, 1992, Paris, Paper 15/23-03

- [Hartje 89] *Hartje, M.:* Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb, Diss. Uni. Hannover, 1989
- [Hathaway 75] *Hathaway, G.H.; Sparks, W.W.:* Installation of Detroit Edison Gas Insulated Substation, IEEE Trans., PAS, Vol. 94, No. 2, 1975, pp. 1608-1617
- [Heiß 87] *Heiß, W.; Sattler, J.; Stolz, W.:* Schadensrisiko von Mittelspannungsschaltanlagen durch Überspannungen bei betrieblicher Alterung der Isolation, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86, 1987, H. 9, S. 344-350
- [Heiß 90] *Heiß, W.; Hartmann, E.; Hollmann, F.; Lekies, R.; Niegel, M.:* Betriebserfahrungen mit gasisolierten Mittelspannungsschaltanlagen, in: Gasisolierte Schaltanlagen für Mittel- und Hochspannungsnetze, ETG Fachber. 32, VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1990, S. 149-169
- [Held 97] *Held, M.; Frank, R.; Baumbach, J.I.; Kurrat, M.; Soppart, O.; Trindade, E.M.; Alberti, S.M.; Klockow, D.:* Versuchsaufbau zur Analyse von Zersetzungsprozessen im Isoliergas SF<sub>6</sub> durch Teilentladungen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96, 1997, Heft 7, S. 290-293
- [Henry 58] *Henry, E.B.; Friedrich, R.E.; Reese, F.L.:* Service Experience and Staged Field Tests on the 115 kV, 1.000.000 kVA Gas-Filled Power Circuit Breaker, AIEE Trans., Vol. 77, PT. III, 1958, pp. 318-325
- [Hilliard 08] *Hilliard, J.D.; Parsons, C.E.:* D.R.Patent Nr. 211074, 12. 05 1908
- [Holloway 59] *Holloway, F.L.; Mears, W.H.:* A Review of Gaseous Dielectric Development, El. Eng., Vol. 78, 1959, pp. 137-140
- [Imgrund 88] *Imgrund, G.:* Untersuchungen zum Schalt- und Löschverhalten SF<sub>6</sub>-isolierter metallgekapselter Hochspannungstrennschalter im 110-kV-Energieversorgungsnetz und im Hochspannungslaboratorium, Diss. TH Darmstadt, 1988
- [Imhof 81] *Imhof, A.:* Aus der Geschichte der Hochspannungstechnik, Bull. ASE/UCS 72, 1981, Heft 13, S. 690-697
- [Janker 77] *Janker, M.; Prohl, R.:* Vakuumschalttechnik in Mittelspannungsschaltanlagen, Siemens Zeitschrift, Jahrg. 51, 1977, Heft 4, S. 276-278
- [Jeanjean 88] *Jeanjean, R.; Landry, M.; Chénier, A.; Demissy, D.:* Electronic System for Monitoring the Mechanical and Electrical Integrity of HV Circuit-Breakers, CIGRÉ, Paris, 1988, paper 13-11
- [Jeszensky 96] *Jeszensky, S.:* History of Transformers, IEEE Pow. Eng. Rev., December 1996, pp. 9-12

- [Jones 89] *Jones, G.R.; Lewis, E.; Kwan, S.; Glover, M.; Henderson, P.; Beavan, C.; Kerkshaw, D.; Moghisi, M.; Holmes, R.:* Optical Fibre Monitoring of Power Circuit Breakers, SPIE, Vol. 1120, Fibre Optics, 1989, pp. 224-235
- [Judd 95] *Judd, M.D.; Hampton, B.F.; Farish, O.:* Partial Discharge Excitation of UHF Modes in a Cylindrical Cavity, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 4561
- [Judd 96] *Judd, M.D.; Farish, O.; Hampton, B.F.:* The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS, IEEE Trans. El. Ins., Vol. 3, No. 2, 1996, pp. 213-228
- [Judd 97] *Judd, M.D.; Farish, O.; Pearson, J.S.:* UHF Couplers for Gas-Insulated Substations: a Calibration Technique, IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 144, No. 3, 1997, pp. 117-122
- [Kaehne 67] *von Kaehne, P.:* Die Verminderung der Schaltgeräusche bei Hochleistungs-Freistrahlschaltern, AEG-Mitteilungen 57, 1967, S. 373-380
- [Kaminaris 93] *Kaminaris, S.D.; Machias, A.V.; Papadias, B.C.; Souflis, J.L.:* Substation Component Risk Index Using Fuzzy Set Theory, CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, paper 230-05
- [Kathrein 97] *Kathrein, W.; Kehne, H.:* Saugen unter Strom, engineering & automation 1-2, 1997, S. 50-51
- [Kawasaki 61] *Kawasaki, K.:* On the Variation of Electrical Resistance of a Polymer as a Function of the Extent and Nature of Sorbed Water, J. Coll. Sc. Japan, Vol. 16, 1961, pp. 405-410
- [Kesselring 30] *Kesselring, F.:* Der Expansionschalter, ETZ, 1930, Bd. 51, H. 14, S. 499-508
- [Kesselring 33] *Kesselring, F.:* Die Freiluft-Expansionschalter, Siemens-Zeitschrift, 1933, Bd. 13, H. 6, S. 309-315
- [Kesselring 39] *Kesselring, F.:* Schaltertechnik und Innenraumschaltanlagen, in *Schumann, W.O.:* Fortschritte der Hochspannungstechnik, Akademische Verlagsgesellschaft Becker&Erler, 1944, S. 400-466
- [Kimura 93] *Kimura, T.; Harunami, T.; Konma, N.; Takata, K.; Saitou, K.:* GIS Insulation Monitoring System Using External Antenna, CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, paper 130-05
- [Kimura 96] *Kimura, T.; Harunami, T.; Konma, K.; Saitoh, K.:* Diagnostic Methods for GIS-Insulated Switchgear Insulation Using External Antenna, El. Eng. in Japan, Vol. 117, No. 3, 1996, S. 25-40

- [König 73-1] *König, D.; Meier, A.:* Akustische Teilentladungsmessung an metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen mit Isoliergasfüllung, Calor-Emag-Mitteilungen, 1973, Heft I/II, S. 28-32
- [König 73-2] *König, D.:* Probleme der Isoliergasfeuchte in metallgekapselten Hochspannungs-Schaltanlagen, ETZ-A, 1973, Heft 7, S. 384-390
- [Kohl 97] *Kohl, T.; Müller, A.; Scharnewski, D.; Werner, S.:* Meßwandler im Wandel, ETZ, 1997, H. 3, S. 22-25
- [Krohne 35] *Krohne, E.:* 50 Jahre Schaltanlagenbau der BEWAG 1884 bis 1934, ETZ 1935, Bd. 56, H. 24, S. 665-668 und H. 26, S. 736-740
- [Kübler 85] *Kübler, B.; Lübben, W.:* Betriebserfahrungen und neue Schaltgeräte als Basis für neue Mittelspannungs-Schaltkonzepte, Siemens Energie & Automation, Bd. 7, 1985, Heft 2, S. 96-99
- [Küchler 85] *Küchler, A.; Dams, J.; Dunz, T.; Schwab, A.:* Kapazitive Sensoren zur Messung transienter elektrischer Felder und Spannungen, Archiv für Elektrotechnik, Bd. 68, 1985, S. 335-344
- [Kuffel 84] *Kuffel, E.; Zaengl, W.S.:* High Voltage Engineering, Pergamon Press, Oxford·New York·Toronto·Sydney·Paris·Frankfurt, 1984
- [Kurrer 94] *Kurrer, R.; Feser, K.; Herbst, I.:* Calculation of Resonant Frequencies in GIS for UHF Partial Discharge Detection, Gaseous Dielectrics VII, Plenum Press, New York, 1994, pp. 557-563
- [Kurrer 95-1] *Kurrer, R.; Feser, K.:* TE-Messung an SF<sub>6</sub>-Anlagen im UHF-Bereich, ETG-Fachberichte 56, VDE-Verlag, Berlin·Offenbach, 1995, S. 123-128
- [Kurrer 95-2] *Kurrer, R.; Feser, K.:* Die UHF-Methode zur dielektrischen Überwachung von SF<sub>6</sub>-Anlagen, 7. Haefely Trench-Symposium, Stuttgart, 1995
- [Kurrer 95-3] *Kurrer, R.; Feser, K.; Krauß, T.:* Antenna Theory of Flat Sensors for Partial Discharge Detection at Ultra-High-Frequencies in GIS, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 5615
- [Kurrer 96-1] *Kurrer, R.; Klunzinger, K.; Feser, K.; de Kock, N.; Sologuren, D.:* Sensitivity of the UHF-methode for Defects in GIS with Regard to On-line Partial Discharge Detection, IEEE Int. Symp. on El. Ins. (ISEI), 1996, pp. 95-98
- [Kurrer 96-2] *Kurrer, R.:* Teilentladungsmessung im Gigahertz-Frequenzbereich an SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen, Diss. Uni. Stuttgart, 1996

- [Landry 93] *Landry, M.; Mercier, A.; Giraldeau, R.; Zelingher, S.; Schwabe, R.; Bennett, R.; Lebow, M.; Spindle, H.:* A Microprocessor-Based Condition Monitoring System for SF<sub>6</sub> High-Voltage Circuit-Breakers, CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, paper 120-01
- [Leber 67] *Leber, R.:* Die Technik der Druckgas-Leistungsschalter, AEG-Mitteilungen 57, 1967, S. 362-367
- [Lemke 84] *Lemke, E.:* Diagnose an elektrotechnischen Betriebsmitteln auf der Grundlage sehr breitbandiger Teilentladungsmessungen, Elektrie 38, 1984, Heft 10, S. 387-389
- [Lemke 87] *Lemke, E.:* A New Procedure for Partial Discharge Measurements on the Basis of an Electromagnetical Sensor, 5th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Braunschweig, 1987, Paper No. 41.02
- [Lemke 89] *Lemke, E.; Friese, G.:* Teilentladungssonde M 4202 - Aufbau, Wirkungsweise und Anwendungsmöglichkeiten, Elektrie 43, 1989, Heft 12, S. 61-62
- [Lightle 89] *Lightle, D.; Hampton, B.F.; Irwin, T.:* Monitoring of GIS at Ultra High Frequency, 6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), New Orleans, 1989, Paper No. 23.02
- [Link 74] *Link, W.D.:* Überschlag von Stützisolierungen in Luft in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte, Diss. Uni. Stuttgart, 1974
- [Lingal 51] *Lingal, H.J.; Browne, Jr., T.E.; Strom, A.P.:* Circuit Interrupters, U.S. Patent 2.757.261, 19. Juli 1951
- [Lingal 53] *Lingal, H.J.; Owens, J.B.:* A New High Voltage Outdoor Interrupter Switch, AIEE Trans., Vol. 72, PT. III, 1953, pp. 293-297
- [Lockwood 74] *Lockwood, J.G.:* World Climatology, An Environmental Approach, London, Arnold, 1974
- [Lorenz 94] *Lorenz, D.; Baltzer, M.; Bürger, J.:* Verfahren und Einrichtung zum Überwachen einer Feder, Europäische Patentanmeldung EP 0709672, 26. 10. 1994
- [Lührmann 81] *Lührmann, H.:* Ausgleichsvorgänge beim Schalten, ETZ Archiv, Bd. 3, 1981, Heft 7, S. 209-215
- [Lummermeier 89] *Lummermeier, T.:* Rechnergestütztes System für die Diagnose an Hochspannungs-Leistungsschaltern, Diss. (A), TH Ilmenau, 1989
- [Lundgaard 90] *Lundgaard, L.E.; Runde, M.; Skyberg, B.:* Acoustic Diagnosis of Gas Insulated Substations; A Theoretical and Experimental Basis, IEEE Trans. PD, Vol. 5, No. 4, 1990, pp. 1751-1759

- [Luxa 92] *Luxa, A.; Piper, H.; Reinert, W.; Vester, M.:* Kennwertermittlung von Vakuumleistungsschaltern zur Qualitätssicherung, ETZ 1992, Heft 13, S. 806-810
- [Mainka 85] *Mainka, M.; Kumar, A.:* Rechnergestützte Leittechnik in 110-/20-kV-Umspannwerken, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 84, 1985, Heft 11, S. 405-412
- [Masaki 94] *Masaki, K.; Sakakibara, T.; Murase, H.; Akazaki, M.; Uehara, K.; Menju, S.:* On-Site Measurement for the Development of On-Line Partial Discharge Monitoring System in GIS, IEEE Trans. PD, Vol. 9, No. 2, 1994, pp. 805-810
- [Meiß 94] *Meiß, M.; Reuter, E.; Vogl, F.:* Einsatz von optoelektronischen Lichtbogenerfassungssystemen in gasisolierten Schaltanlagen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93, 1994, Heft 25, S. 1598-1602
- [Meixner 51] *Meixner, J.; Kloepfer, W.:* Theorie der ebenen Ringspaltantenne, Zeitschrift für angewandte Physik, Bd. 3, H. 5, 1951, S. 171-178
- [Miller 87] *Miller, G.E.:* Fiber Optic Control of Jet Aircraft Engines, ISA Transactions, Vol. 26, No. 1, 1987, pp. 11-17
- [Mosch 79] *Mosch, W., Hauschild, W.:* Hochspannungsisolierung mit Schwefelhexafluorid, VEB Verlag Technik, Berlin, 1979
- [Moscicka 91] *Moscicka-Grzesiak, H.; Siodla, K.; Ziomek, W.:* Relation of Breakdown Voltage and the Parameters Characterizing Prebreakdownstate in Vacuum in a Wide Range of the Electrode Distance, 7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Dresden, 1991, Paper No. 30.05
- [Müller 85] *Müller, B.:* Untersuchungen zum Oberflächenverhalten von stabförmigen Isolatoren aus Epoxidharzformstoff bei simultaner Beanspruchung durch Feuchte und hohe Wechselspannung, Dissertation, TH Darmstadt, 1985
- [Nel 93] *Nel, H.H.:* Maintenance Diagnostic by Interpretation of Performance Statistics, CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, paper 220-01
- [Neumann 92-1] *Neumann, C.:* Teilentladungs-Messungen an fabrikfertigen Schaltanlagen vor Ort, Kap. 14 in *König, D.; Narayana Rao, Y.:* Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik, VDE-Verlag, Offenbach, 1992
- [Neumann 92-2] *Neumann, C, Heiß, W. Lekies, R.:* Diagnostische Methoden zur Überwachung des Gaszustandes von SF<sub>6</sub>-Schaltgeräten und -Anlagen, ETG-Fachber. 40, VDE-Verlag, 1992, S. 297-307
- [Niethammer 20] *Niethammer, F.:* Schaltanlagen in elektrischen Betrieben Bd. 1, Sammlung Göschen, Bd. 796, Verein. wiss. Verl., Berlin, 1920

- [N.N. 93] Hochpräzise Drehwinkelgeber, Elektrische Maschinen, 1993, Heft 9, S. 231-234
- [Noack 88] *Noack, F.; Gärtner, J.; Heider, T.; Schwarz, J.*: Comptuer-Aided Diagnostic System for High-Voltage Circuit-Breakers, CIGRÉ, Paris, 1988, paper 13-10
- [Nührmann 89] *Nührmann, D.*: Das große Werkbuch Elektronik, Franzis, 1989, S. 2120-2132
- [Oesterheld 95] *Oesterheld, J.*: Dielektrisches Verhalten von Silikonelastomer-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken, Diss. TU Dresden, 1995
- [Osvath 85] *Osvath, P.; Zaengl, W.; Weber, H.*: Teilentladungsmessung: Probleme und deren Lösung mit einem flexiblen Meßsystem, Bull. SEV 76, 1985, Heft 9, S. 1137-1143
- [Pack 93] *Pack, S.; Dießner, A.; Gorablenkow, J.*: PD Signal Propagation in GIS Considering Frequencies up to GHz, 8th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Yokohama, 1993, Paper No. 63.05
- [Patrunky 93] *Patrunky, H.; Richter, R.*: A Diagnostic for SF<sub>6</sub> Gas Insulated Switchgear, CIGRE-Symp., Berlin, 1993, paper 130-09
- [Pearson 91] *Pearson, J.S.; Hampton, B.F.; Sellars, A.G.*: A Continous UHF Monitor for Gas-insulated Substations, IEEE Trans. El. Ins., Vol. 26, No. 3, 1991, pp. 469-478
- [Peier 87] *Peier, D.; Malejczyk, M.; Klockow, D.*: Chemische Untersuchungen zur Luftzersetzung durch elektrische Teilentladungen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86, 1987, H. 23, S. 1153-1156
- [Peier 88] *Peier, D.; Schwarz, H.*: Verfahren zur Ermittlung hochfrequenztauglicher Ersatzschaltbilddaten für SF<sub>6</sub>-Anlagen, ETZ-Archiv, Bd. 10, 1988, H. 12, S. 397-400
- [Peter 96] *Peter, H.; Sartorius, R.*: SF<sub>6</sub> - ein Umweltproblem?, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95, 1996, Heft 8, S. 512-514
- [Pettinga 93] *Pettinga, J.A.J.*: Vochtmeting in SF<sub>6</sub>, Energietechniek, Jaargang 71, 1993, H. 2, S. 116-120, H. 3, S. 188-193
- [Petit 93-1] *Petit, A.; Maulat, C.*: GIS Monitoring by the UHF Method, CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, paper 130-07
- [Petit 93-2] *Petit, A.*: Contribution to the 2nd Discussion Meeting , CIGRÉ-Symp., Berlin, 1993, Proc. p. 89

- [Piemontesi 95] *Piemontesi, M.; Zaengel, W.:* Analysis of Decomposition Products of Sulfur Hexafluoride by Spark Discharges at Different Spark Energies, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 2283
- [Praehauser 72] Lokalisierung von Teilentladungen in Hochspannungsapparaten - Schwierigkeiten und Aufwand, Bull. SEV 63, 1972, Heft 16, S. 893-905
- [Probst 28] *Probst, H.:* Die Entwicklung der ausziehbaren und gekapselten Schaltfelder für größere Hochspannungsschaltanlagen, ETZ 1928, Bd. 49, H. 35, S. 1285-1289
- [Probst 31] *Probst, H.:* Entwicklung der Hochspannungsschaltanlagen, in *Biermanns, J.; Mayr, O.:* Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis, Springer-Verlag, 1931, S. 361-384
- [Quint 93] *Quint, I.:* Untersuchungen zum Einfluß von schwach leitenden Fremdschichten auf das Oberflächen-Alterungsverhalten wechsellastungsbelasteter zylindrischer Prüflinge aus Epoxidharz-Formstoff, Dissertation, TH Darmstadt, 1993
- [Read 01] *Read, R.H.:* Patent US Pat. 716 475, 3. Mai 1901
- [Reuter 65] *Reuter, E.; Wegesin, H.:* Zur Frage der Anwendung von isolierten, gekapselten Schaltanlagen der Reihe 110, ETZ-B, Bd. 20, 1968, Heft 9, S. 254-258
- [Reuter 93] *Reuter, E.:* Trends und Entwicklung im Schaltanlagenbau, VDE Kurpfalz Seminar Mittelspannungsschaltanlagen, 1993, Vortrag 11, S. 1-16
- [Rothammel 88] *Rothammel, K.:* Antennenhandbuch, Franckh, Stuttgart, 1988
- [Rowe 85] *Rowe, S.W.:* Flashover Location in GIS Testing, Int. Symp. on GIS, Toronto, 1985, pp. 294-299
- [Rung 03] *Rung, W.:* Ölausschalter für Hochspannung, ETZ 1903, H. 20, S. 380
- [Ruhland 95] *Ruhland, S.:* Transient Overvoltage Phenomena in Secondary Circuits of Medium Voltage Switchgear and Controlgear, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 6736
- [Schanz 88] *Schanz, G.W.:* Sensor-Fühler der Meßtechnik, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1988

- [Schiweck 90] *Schiweck, L.; Brammer, F.:* Gasisolierte Mittelspannungsanlagen mit Leistungsschaltern, in: Gasisolierte Schaltanlagen für Mittel- und Hochspannungsnetze, ETG Fachber. 32, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 1990, S. 111-129
- [Schmidt 93] *Schmidt, J.:* Luftisolierte Mittelspannungs-Schaltanlagen, VDE Kurpfalz Seminar Mittelspannungsschaltanlagen, 1993, Vortrag 4, S. 1-31
- [Schneehage 29] *Schneehage, A.:* Gußgekapselte Hochspannungsschaltanlagen, ETZ 1929, Bd. 50, H. 5, S. 154-156
- [Schlemper 93] *Schlemper, H.-D.; Kurrer, R.; Feser, K.:* Sensitivity of On-line Partial Discharge Detection in GIS, 8th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Yokohama, 1993, Paper No. 66.04
- [Schlemper 95] *Schlemper, H.-D.; Vogel, A.; Feser, K.:* Calibration and Sensitivity of VHF Partial Discharge Detection in GIS, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 5619
- [Schlemper 96] *Schlemper, H.-D.; Feser, K.; Blaum, H.; Kirchesch, P.:* Sensitivity of Acoustic in PD-Detection in - Laboratory Experiments and On-site Experience, IEEE Int. Symp. on El. Ins. (ISEI), 1996, pp. 99-102
- [Schmidt 72] *Schmidt, W.:* Elektrische Festigkeit von verdichtetem SF<sub>6</sub>-Gas im trockenen und feuchten Zustand, SEV, Symposium elektrische Isolationstechnik, Zürich, 1972, Beitrag A 3
- [Schuh 02] *Schuh, H.:* Moderne Hochspannungsapparate, ETZ 1902, H. 30, S. 652-654
- [Schwarz 84] *Schwarz, J.; Petzold, K.; Otto, F.; Neumann, H.:* Messung und Ortung von Teilentladungen an Baugruppen der SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlage GSAS 1-123, Elektrie 38, 1984, Heft 2, S. 62-65
- [Schwarzer 76] *Schwarzer, K.:* Ein Beitrag zur Klimaschutzfunktion der Blechkapselung von Mittelspannungsschaltzellen, Elektrie 30, 1976, Heft 2, S. 96-98
- [Schwenk 36] *Schwenk, O.:* Ölarne Leistungsschalter mit reiner Ölströmung, ETZ 1936, Bd. 57, H. 9, S. 229-231
- [Shores 75] *Shores, R.B.; Phillips, V.E.:* High Voltage Vacuum Circuit Breakers, IEEE Trans., PAS, Vol. 94, No. 5, 1975, pp. 1821-1830
- [Slepian 28] *Slepian, J.S.:* Extinction of an A-C Arc, AIEE Trans., Vol. 47, 1928, pp. 1398-1408

- [Soppart 95] *Soppart, O.; Baumbach, J.I.; Kurrat, M.; Alberti Segundo, S.M.; Klockow, D.*: Ion Mobility Spectrometry for the Characterisation of SF<sub>6</sub>-Decomposition Products caused by Partial Discharges, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 2269
- [Soppart 97] *Soppart, O.; Baumbach, J.I.; Alberti, S.M.; Klockow, D.*: On-Site Quality Assessment of SF<sub>6</sub> using Ion Mobility Spectrometry, 10th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Montreal, 1997, Vol. 4, pp. 147-150
- [Sorensen 26] *Sorensen, R.W., Mendenhall, H.E.*: Vacuum switching experiments at the California Institute of Technology, Trans. AIEE, Vol. 46, 1927, pp. 1102-1105
- [Sorensen 58] *Sorensen, R.W.*: The Power Application Vacuum, El. Eng., Vol. 77, 1958, pp. 150-154
- [Stern 16] *Stern, G.*: Nicht brennbare Schalteröle, ETZ 1916, H. 22, S. 289
- [Straßburg 97] *Straßburg, K.; Gockenbach, E.*: On-site Testing of an All-silicone Rubber Busbar via PD-measurement, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 1997, Vol. 4, pp. 367-370
- [Sun 91] *Sun, R.*: Transiente Überspannungen in SF<sub>6</sub>-isolierten metallgekapselten Schaltanlagen, Diss. Uni. Stuttgart, 1991
- [Trautmann 90] *Trautmann, T.*: Mikrorechnergestützte Meßgeräte für die technische Diagnostik an SF<sub>6</sub>-Leistungsschaltern, Diss. (A), TH Ilmenau, 1990
- [Ushio 71] *Ushio, T.; Shimura, I.; Tominaga, S.*: Practical Problems on SF<sub>6</sub> Gas Circuit Breakers, IEEE Trans. PAS, Vol. 90, No. 5, 1971, pp. 2166-2174
- [Völker 81] *Völker, P.*: Untersuchungen zur Entwicklung des elektrischen Durchschlags in Gasen und an festen Isolierstoffoberflächen, Dissertation, TH Darmstadt, 1981
- [Vogelsang 29] *Vogelsang, M.*: Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, Zweiter Band, Die geschichtliche Entwicklung der Hochspannungs-Schaltechnik, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1929
- [Walcher 85] *Walcher, H.*: Winkel- und Wegmessung im Maschinenbau, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1985
- [Walter 90] *Walter, L.; Glomb, J.*: Fiber-Optic Transducers for Aircraft Controls, SPIE, Vol. 1367, Fiber Optic and Laser Sensors VIII, 1990, pp. 162-164

- [Wanninger 95-1] *Wanninger, G.:* UHF-Diagnostik in GIS - Vergleich von Feldsonden und Antennen, ETG-Fachberichte 56, VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1995, S. 123-128
- [Wanninger 95-2] *Wanninger, G.:* Antennas as Coupling Devices for UHF Diagnostics in GIS, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 5625
- [Wanninger 97-1] *Wanninger, G.:* Apparent Charge Measurements in GIS by Modern Diagnostic Methods, ETEP, Vol. 7, No. 4, 1997, pp. 251-255
- [Wenzel 94] *Wenzel, D.; Borsi, H.; Gockenbach, E.:* Partial Discharge Recognition and Localization on Transformers via Fuzzy Logic, IEEE Int. Symp. on El. Ins. (ISEI), 1994, pp. 233-236
- [Wenzel 95] *Wenzel, D.; Borsi, H.; Gockenbach, E.:* A New Approach for Partial Discharge Localization on Transformer using the Karhune-Loève-Transform, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, Paper No. 5627
- [Wenzel 96] *Wenzel, D.; Borsi, H.; Gockenbach, E.:* A New Approach for Partial Discharge Recognition on Transformer On-Site by Means of Genetic Algorithms, IEEE Int. Symp. on El. Ins. (ISEI), 1996, pp. 57-60
- [Witzmann 87] *Witzmann, R.:* Meßsystem zur Erfassung schneller transienter Vorgänge in metallgekapselten SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen, ETZ-Archiv, 1987, Bd. 9, Heft 6, S. 189-194
- [Wutz 92] *Wutz, M.; Adam, H.; Walcher, W.:* Theorie und Praxis der Vakuumtechnik, Vieweg-Verlag, 1992
- [Yuen 91] *Yuen, D.C.M.; Chan, S.H.:* UHF Partial Discharge Monitoring of 400 kV GIS at Castle Peak Substation, IEE, Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM), Hong Kong, 1991, Conf. Publ. No. 348
- [Ziegler 95] *Ziegler, G.; Grönefeld, P.:* 10 Jahre integrierte Leittechnik für Schaltanlagen LSA, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 94, 1995, Heft 9, S. 504-508
- [Ziomek 93] *Ziomek, W.; Moscicka-Grzesiak, H.:* Relation of Breakdown Voltage and Prebreakdown Microdischarge Parameters in Vacuum, IEEE Trans. on EI, Vol. 28, No. 4, 1993, pp. 481-487

## Lebenslauf

Name: Karsten Straßburg  
geboren: 4. März 1958 in Binnen, Kr. Nienburg/Weser

Eltern: Dirk Straßburg und  
Elsbeth Straßburg, geb. Ohlmeyer

Familienstand: verheiratet mit Bärbel Lörcher-Straßburg  
drei Kinder

Ausbildung:

1964 - 1967 Grundschole in Oyle, Kr. Nienburg/Weser  
1967 - 1968 Mittelpunktschule Lemke, Kr. Nienburg/Weser  
1968 - 1978 Albert-Schweitzer-Schule Nienburg/Weser  
6/1978 Abitur  
1979 - 1983 Hannover-Braunschweigische Stromversorgungs AG  
in Rethen, Ausbildung zum Energieanlagenelektroniker  
1984 - 1992 Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover  
Studienrichtung Energietechnik/ Hochspannungstechnik

Diplom:  
7/1992 Messung der Gleichstromkomponente im Ladestrom eines  
Hochspannungskabels unter Betriebsspannung

Zivildienst:

1983 - 1984 Arbeiter-Samariter-Bund, Kreisverband Nienburg in Bad Rehburg,  
Kr. Nienburg/Weser, Ausbildung zum Rettungssanitäter

Berufliche Entwicklung:

1989 - 1992 Freier Mitarbeiter in der Erwachsenenbildung bei DEKRA und BFW  
1992 - 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Schering-Institut für  
Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen,  
Universität Hannover  
seit 10/1997 Mitarbeiter bei uni transfer, Forschungs- und Technologie-  
kontaktstelle der Universität Hannover, Patentberatung und -  
verwertung