

# **Elektrifikation von Isolieröl in Öl-Zellulose-Isoliersystemen**

von H. GSODAM

## **1. Einführung**

Das Phänomen der Elektrostatik war bereits im Altertum bekannt. Thales von Milet (ca. 600 v.Ch.) beobachtete, wie geriebener Bernstein leichte Teilchen anzog. Die Bezeichnung Elektrostatik kommt von "Elektron" nach dem griechischen Wort für Bernstein und von "Statik" nach der lateinischen Bezeichnung für Ruhe.

Mit elektrostatischen Phänomenen beschäftigte sich W. Gilbert um 1600. Von ihm stammt auch die Bezeichnung "Elektrizität" für all diese Erscheinungen. In der Zwischenzeit hat sich die Elektrostatik zu einem selbständigen und sehr umfangreichen Arbeitsgebiet entwickelt. Wir finden Erscheinungen und Arbeitsmethoden der Elektrostatik in der Sprüh- und Filtertechnik, aber auch bei der Schadensverhütung. In der Forschung findet die Elektrostatik ihren Niederschlag, in der Hochspannungstechnik und auf dem Gebiet der Oberflächenphysik.

Gefährliche Auswirkungen der elektrostatischen Erscheinungen haben sich bei der Füllung von Behältern mit feuergefährlichen Flüssigkeiten oder isolierenden Stäuben gezeigt. Die elektrische Aufladung von Flüssigkeiten und von Festkörpern beim Transport durch isolierende Rohre oder Schläuche bewirkte, daß sich isoliert aufgestellte metallische Sammelbehälter auf eine hohe Spannung aufgeladen haben. Bei entsprechender Spannungsdifferenz zu benachbarten geerdeten Teilen, bei gegebener Zündfähigkeit und einer meist vorhandenen Mindestenergie des Zündfunken wurden Explosionen, die große Zerstörungen angerichtet haben, ausgelöst.

Vereinzelt tauchten Ende 1970 Berichte über Schäden an Großtransformatoren auf, die mit elektrostatischen Erscheinungen erklärt wurden. Wurden damals diese Schäden nur ganz bestimmten Transformatortypen zugeordnet, so zeigte eine 1988 erschienene Zusammenstellung von Schäden, daß bis zu diesem Berichtszeitpunkt weitere Transformatoren nachweislich durch Erscheinungen ausgefallen sind, die elektrostatischen Erscheinungen zuzuschreiben waren ohne, daß nur bestimmte Typen von Transformatoren oder eine bestimmte Sorte von Isolieröl für diese Erscheinungen verantwortlich gemacht werden können. Es wurde auch vermutet, daß weitere ungeklärte Transformatorfehler auf dieselben Erscheinungen zurückgeführt werden müssen.

Diese speziell mit Schäden an Großtransformatoren verbundenen Erscheinungen der elektrostatischen Aufladung von Isolieröl bei forcierter Ölkühlung hat eine Reihe von Untersuchungen ausgelöst, die sich in einer großen Anzahl von Publikationen niedergeschlagen haben. Die Beschäftigung mit diesen Erscheinungen hat in letzter Zeit noch zugenommen, da nunmehr elektrostatische Erscheinungen als mögliche Fehlerursache bestätigt wurden und Schäden an konventionellen Transformator-Großeinheiten auf alle Fälle vermieden werden müssen. Weiters ist zu erwarten, daß bei der höheren Ausnützung der Einheiten, bei Einsatz neuer Isolierstoffe und bei Sondertransformatoren für die Hochspannungs-Gleichspannungs-Übertragung (HGÜ) sich Fehler-situationen ergeben könnten, die bei eingehender Kenntnis aller Erscheinungen vermieden werden könnten.

Die mit elektrostatischen Erscheinungen auftretenden Raumladungen verringern die Spannungsfestigkeit von Isolierstrecken, da sich das elektrische Feld der Raumladung dem Feld, das durch die Spannungsbeanspruchung gegeben ist, überlagert. Bei der Untersuchung von Öl-Zellulose-Isoliersystemen auf elektrische Festigkeit sind auch solche Erscheinungen zu berücksichtigen. Raumladungen und Raum-

ladungshäufungen entstehen durch strömendes Isolieröl, das durch Pumpenkräfte bewegt wird.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sollen an Hand einiger Grundlagenuntersuchungen einen Einblick auf das Gebiet der elektrostatischen Erscheinungen im strömenden Isolieröl geben. Die Ergebnisse aus den Arbeiten dienen sowohl zur Erklärung der Mechanismen der Durch- und Überschlagsvorgänge an der Grenzschicht Öl-Zellulose als auch für die Beurteilung von Gefahrensituationen in elektrischen Geräten bei bestimmten Anwendungen.

## 2. Ladungstrennungen an der Grenzfläche

Isolieröl ist eine nichtpolare, hochisolierende Flüssigkeit. Die beobachtete geringe Leitfähigkeit rührt von Ladungsträgern her, die durch thermische Anregung, Ladungsträgerinjektion oder -dissoziation in der Isolierflüssigkeit, entstehen. Die Konzentration der Ladungsträger im Inneren des Flüssigkeitsvolumens ist vergleichsweise gering. Die Flüssigkeit ist makroskopisch gesehen elektrisch neutral. Ein äußeres Feld wird durch die geringe Raumladung der vorhandenen Ladungsträger nicht beeinflusst. Bei Wechselspannung ergibt sich eine Spannungsverteilung entsprechend den Teilkapazitäten, bei Gleichspannung entsprechend den Teilwiderständen.

Anders ist es an Grenzfläche zwischen Isolieröl und fester Isolierung. Die unterschiedlichen Bindungskräfte der Moleküle an der Grenzschicht zum eigenen Stoff sowie an der Grenzschicht zum Nachbarstoff bewirken, daß sich an der Oberfläche Raumladungszonen unterschiedlicher Dicke und Polarität bilden. Diese Raumladungskonzentrationen sind vergleichsweise hoch und können durch ihre Wirkung das äußere Feld verzerren. Ein anschauliches Bild der Ladungsträgerkonzentration an der Grenzschicht gibt die Vorstellung der "elektrischen Doppelschicht", die 1897 von Helmholtz in seinen Studien über die elektrische Aufladung von Oberflächen eingeführt wurde (Bild 1) /1/.

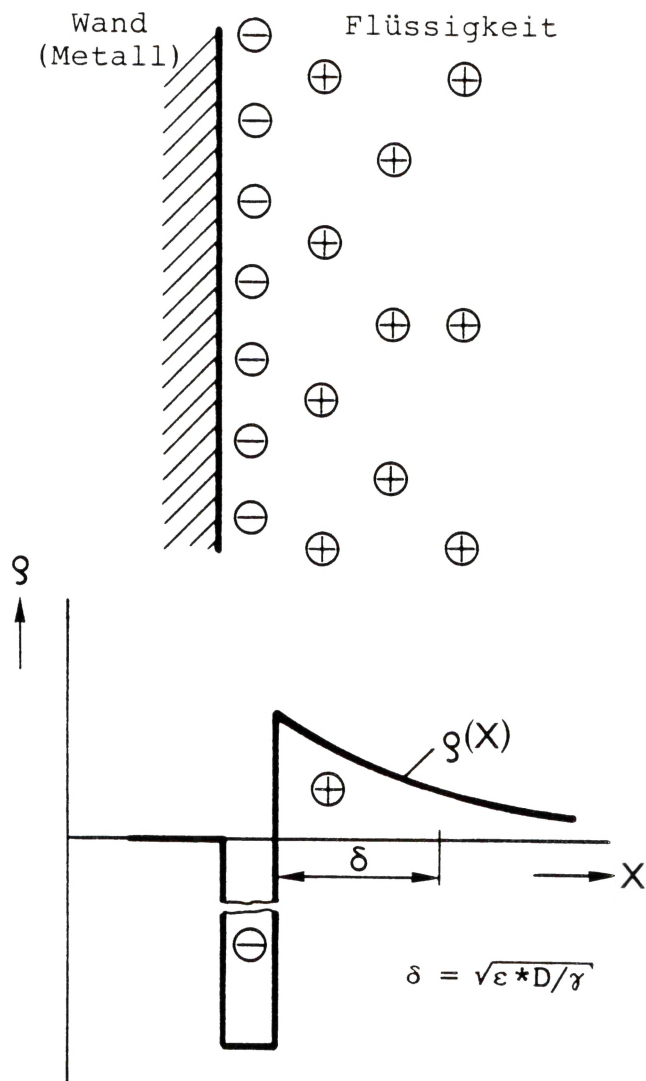


Bild 1: Elektrische Doppelschicht nach Helmholtz (schematisch)

- ⊕ ⊖ ... Ladungsträger
- $\rho$  ... Raumladungsdichte
- $x$  ... Abstand von der Wand
- $\delta$  ... Relaxationslänge
- $\varepsilon$  ... Dielektrizitätszahl
- $\gamma$  ... el. Leitfähigkeit
- $D$  ... Diffusionskoeffizient  
der Ladungsträger

Diese Doppelschichten treten verstärkt bei ruhendem Isolieröl auf. Die Dicke hängt vom Grenzflächenpotential ab und beträgt bei einem guten Isolieröl ca. 0,1 ... 0,2 mm. Diese an der Oberfläche haftenden Raumladungsschichten mit positiver und negativer Polarität kann man sich so vorstellen, daß Einzelmoleküle oder Molekülgruppen ein oder mehrere Elektronen abgeben oder aufnehmen und daher nach außen als geladenes Ion mit entsprechender Masse erscheinen. Die Adhäsionskräfte (Feldkräfte) halten die Ladungsträger an der Oberfläche fest. Die Summe der Ladungen ist null. Eine Lostrennung der Ladungen von der Oberfläche kann erfolgen durch:

- ein von außen anliegendes Feld entsprechender Richtung
- durch eine turbulente Strömung, die die geladenen Teilchen von der Wand loslöst.

Im Hinblick auf unsere Themenstellung wollen wir nur den Fall der Loslösung von Ladungsträgern aus der Grenzschicht durch die Ölströmung betrachten. Fließt durch einen Kühlkanal das Öl mit geringer Geschwindigkeit, wie es bei natürlicher Kühlung der Fall ist, so ergibt sich eine laminare Strömung mit Strömungsfäden parallel zur Wand. Steigt in engen Kanälen die mittlere Geschwindigkeit über 1 m/s, so stellt sich eine turbulente Strömung ein, gekennzeichnet durch Reynoldszahlen über 1200. Diese Strömungsart ergibt an der Wand eine Verwirbelung und somit eine Geschwindigkeitskomponente, die von der Wand in das Kanalinere zeigt.

Der erzwungene Übertritt der Ladungsträger von der Grenzschicht in die Ölströmung gegen die Adhäsionskräfte des Raumladungsfeldes wird stärker, weil durch die turbulente Strömung die Ladungsträger von der Oberfläche in die Strömung befördert werden. Die positiv geladenen Ladungsträger, die durch die Strömung weggeführt werden, haben zur Folge, daß wegen des Ladungsgleichgewichtes im stationären Zustand auch negative Ladungen abgeführt werden, wie in Bild 2 schematisch gezeichnet ist.

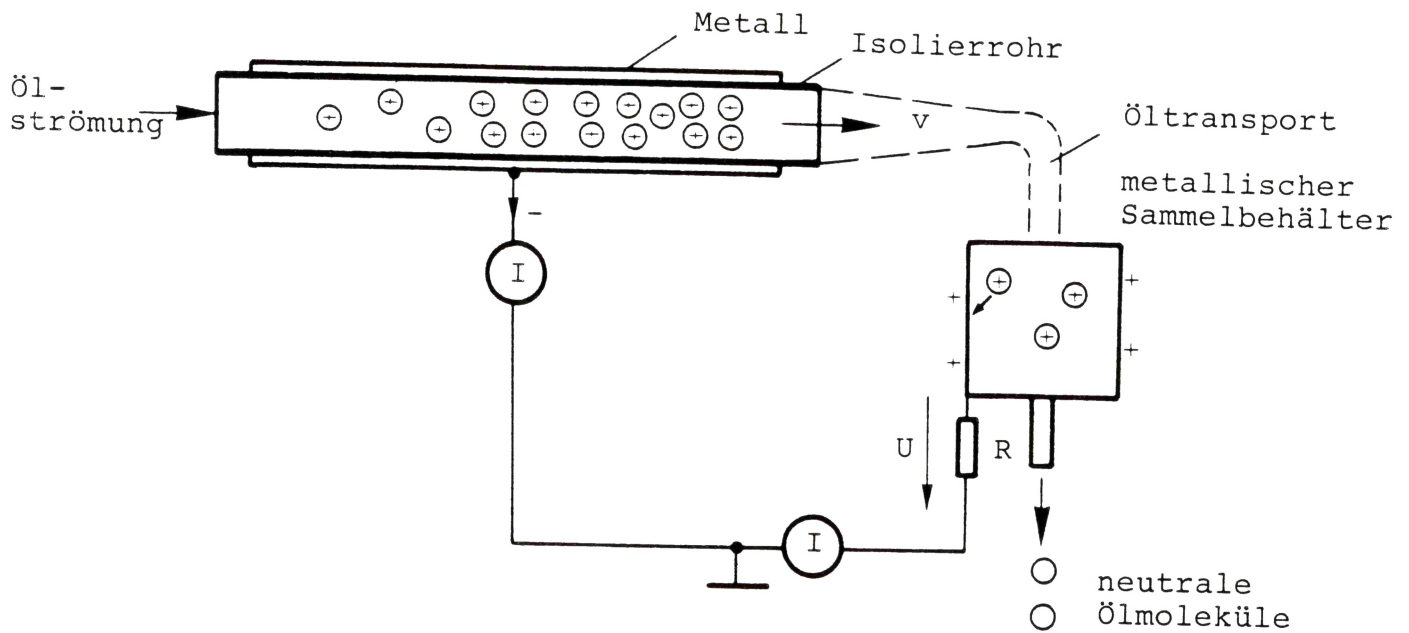


Bild 2: Schema der Ladungstrennung an der Wand des durchströmten Rohres

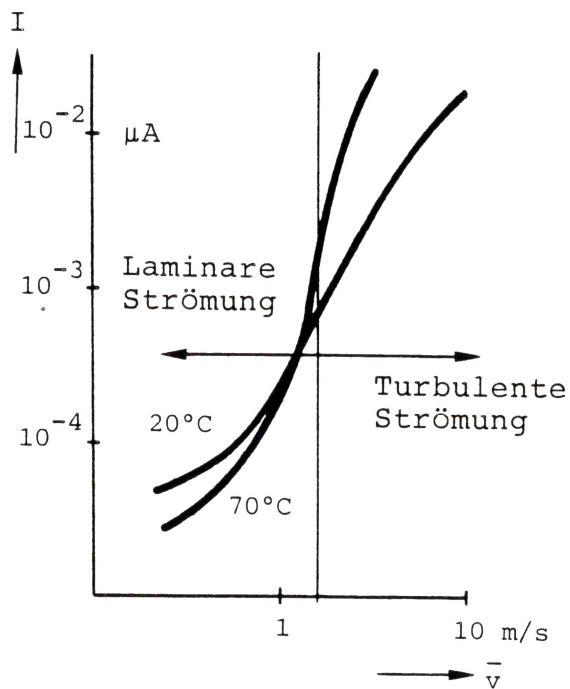


Bild 3: Ströme nach Ladungstrennung in einem Isolierrohr.  
Einfluß von Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur

Die Ergiebigkeit der Ladungsausbeute wird durch mehrere Parameter beeinflusst. Neben der Geschwindigkeit ist die Temperatur ein wesentlicher Parameter, weiters die Type des Isolieröles, die Struktur des festen Isoliermaterials und auch das angelegte äußere Feld. Der wesentlichste Einfluß ist durch die Ölströmungsgeschwindigkeit bei engem Kanalquerschnitt (Reynoldszahl) gegeben. Deshalb sind Papierfilter im trockenen Zustand starke Generatoren für die Ladungsbildung (Bild 3).

### 3. Der Ladungstransport im strömenden Isolieröl

An der Grenzfläche von Zellulose zu Isolieröl ist die positiv geladene Grenzschicht dem Rohrinernen, das vom Öl durchströmt wird, zugekehrt. Demgemäß werden positiv geladene Teilchen, die als Moleküle oder Molekülgruppen anzusehen sind von der Strömung mitgenommen.

Wird ein sehr langes Rohr durchströmt, so sammeln sich im Inneren des Strömungsquerschnittes immer mehr Ladungsträger an. Diese so entstehende Raumladung baut sich ein eigenes, vornehmlich radialgerichtetes elektrisches Feld auf, das einen "Rückstrom" zur Folge hat, der die Ladungsdichte in Strömungsrichtung nicht linear anwachsen läßt. Betrachten wir die Ströme in einem Rohrmodell endlicher Länge, das von Öl durchflossen wird, so erhalten wir ein Ergebnis nach Bild 4.

Von der Wand werden, je nach den Strömungsverhältnissen positive Ladungsträger über die ganze Länge des Rohres, dem strömenden Ölvolumen zugeführt. Die Rückstromerscheinungen setzen gleich zu Anfang ein und begrenzen bei einem sehr langen Rohr die resultierende Stromstärke auf einen Grenzwert. Die Stromstärke im Ölstrom errechnet sich aus der Ladung pro Zeiteinheit, die durch die strömende Ölmenge durch den Querschnitt getragen wird. In engen, rasch durchströmten Kanälen ist der Rückstromeffekt klein und macht sich erst nach etlichen Metern bemerkbar.

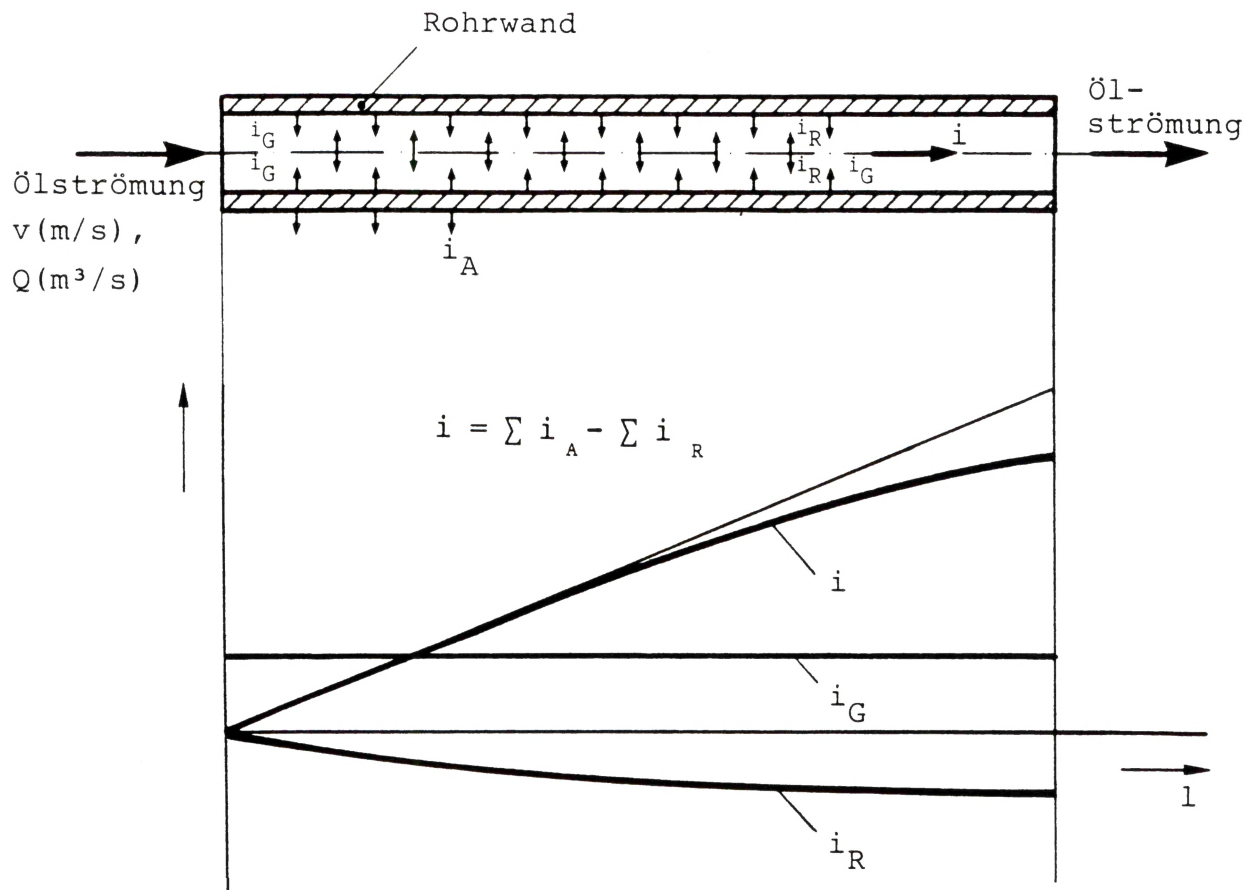
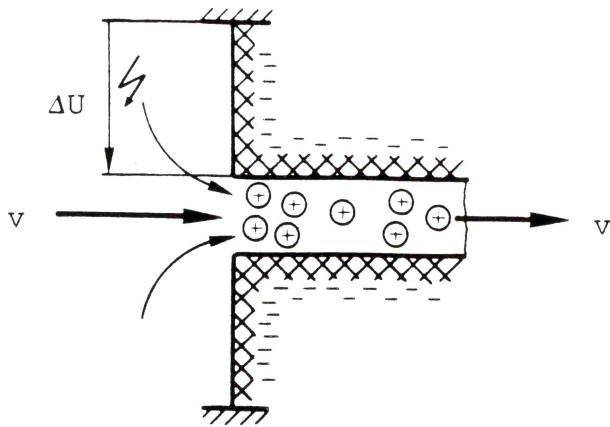


Bild 4: Überlagerung der Ströme im durchströmten Rohr

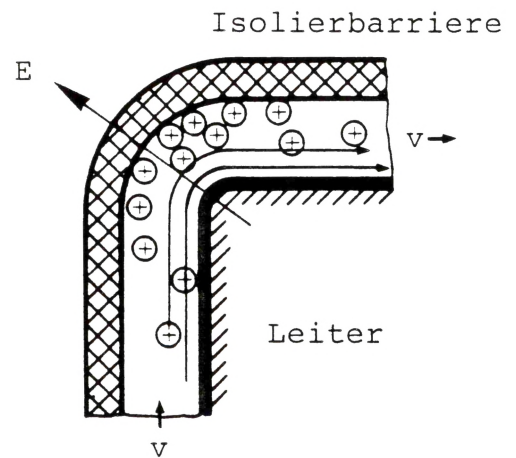
- $i_G$  ... Strom infolge der Ladungstrennung an der Oberfläche
- $i_R$  ... Rückstrom durch das Raumladungsfeld
- $i_A$  ... Ableitstrom
- $i$  ... Gesamtstrom

#### 4. Gefährdung von Isolationsstrukturen

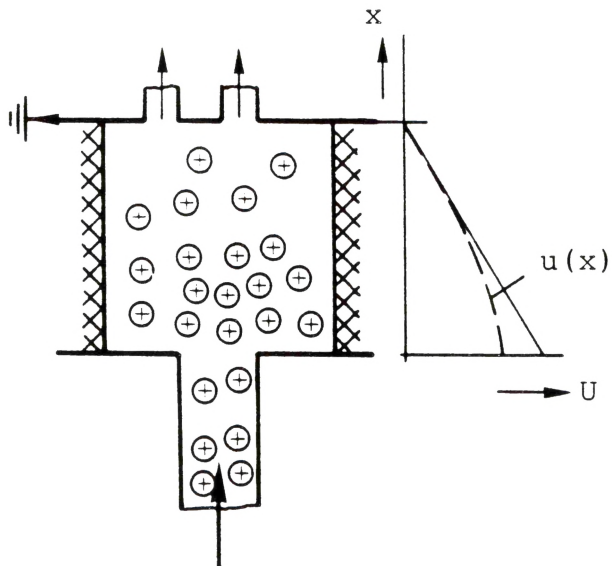
Das Isolieröl wird von den Umwälzpumpen durch die Sammel- und Kühlkanäle der Wicklung gepreßt. Die Form der Kühlkanäle wechselt, der Querschnitt ist nicht immer gleich. Viele Umlenkungen bringen noch eine zusätzliche Ungleichförmigkeit der Strömung mit sich. Demgemäß ergeben sich Zonen mit größerer Ladungsträgererzeugung, aber auch Bereiche, an denen sich Ladungsanhäufungen ergeben, die örtlich das Feld ungünstig beeinflussen können.



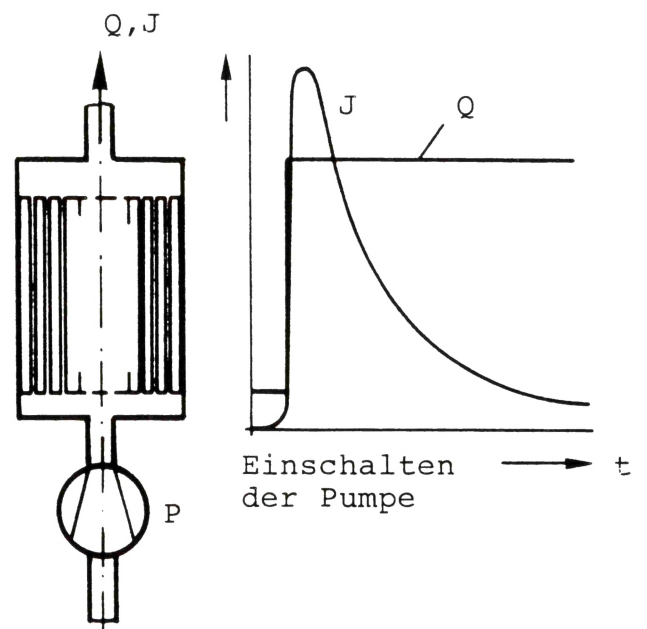
a) Ladungstrennung an einem Einlaufkanal (Gefährliche Stelle: Einlaufbereich)



c) Strömungsumleitung in einem Kühlkanal (Ladungsanhäufung an der Oberfläche von Isolierbarrieren)



b) Austritt aus dem Kühlkanal in ein Sammelrohr (Spannungsverteilung durch Raumladungskonzentration)



d) Einschalten einer Pumpe in einem parallelen Kanalsystem (Kühlkanäle, Filter). Die an der Oberfläche angesammelte Ladung wird plötzlich abgeführt

Bild 5: Gefährdung von Isolationsstrukturen durch Ladungstrennung und Ladungsanhäufung

Im Bild 5 sind jene Fälle schematisch angedeutet, die durch Erscheinungen der Ladungstrennung und Ladungsanhäufung eine zusätzliche Spannungsbeanspruchung der Isolierstruktur bewirken können. Welche dieser Erscheinungen zu einer akuten Gefährdung führt, hängt von der konstruktiven Ausführung der Isolierung ab.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

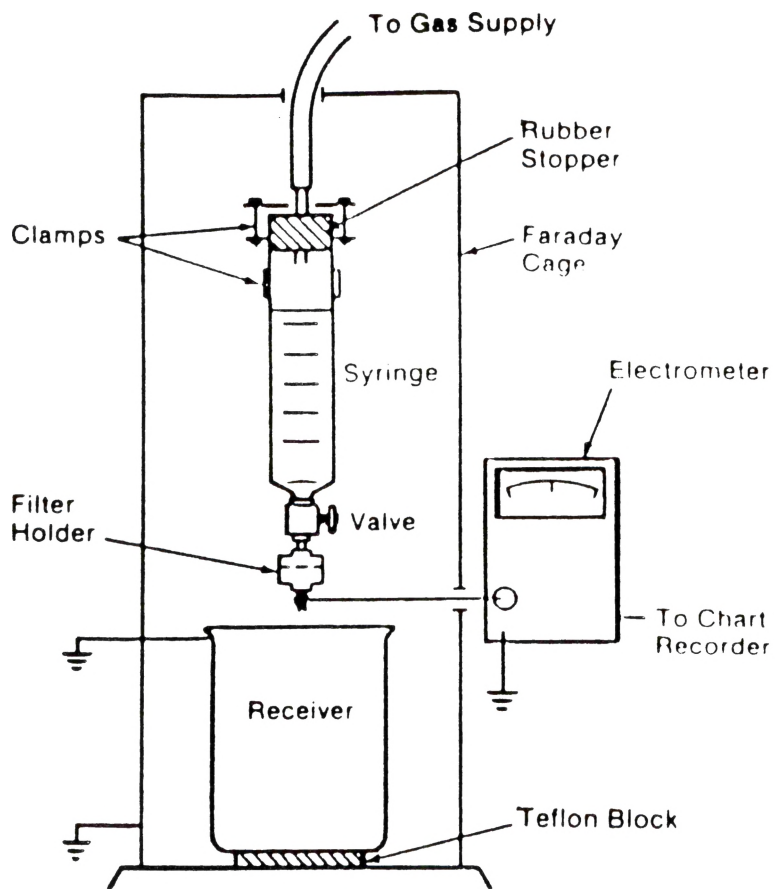
Angesichts der nunmehr erkannten Gefährdung von Hochleistungstransformatoren durch Erscheinungen der Elektrifikation haben sich weltweit Studiengruppen gebildet (CIGRE, EPRI, nationale Gruppen), die sich mit den Phänomenen der elektrostatischen Erscheinungen beschäftigen. Einen Überblick über die Einflüsse, die bei der Beurteilung der Wirkung zu berücksichtigen sind gibt Tabelle 1.

Angesichts der vielen Einflußgrößen kann nur ein systematisches Vorgehen zum Ziel führen, wobei man die dominierenden Einflüsse einzeln untersuchen muß. Für die Anwendung der Erkenntnisse auf Großeinheiten ist eine umfangreiche anwendungsorientierte Forschung mit abgesicherten Ergebnissen notwendig.

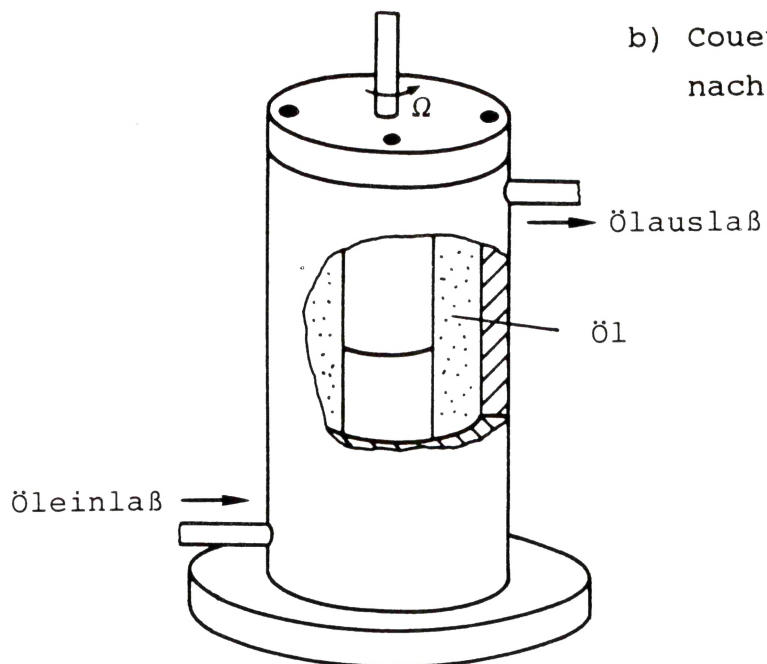
Neben den physikalischen Kenntnissen der Ladungstrennung und des Ladungstransportes, sowie der Wirkung der Raumladung auf die Feldverteilung müssen auch die Eigenschaften der Isoliermaterialien hinsichtlich der Tendenzen zur Aufladungsneigung bekannt sein. Für Großtransformatoren wird das Zusammenwirken von Isolieröl und Zellulose (Papier, Transformerboard) im wesentlichen die Erscheinungen bestimmen. Von diesen beiden Komponenten ist wiederum das Isolieröl von stärkerem Einfluß, da die Zusammensetzung des verwendeten Isolieröles je nach Struktur sehr unterschiedlich sein kann.

Tabelle 1: ELEKTROSTATISCHE ERSCHEINUNGEN  
Einflußfaktoren - Auswirkung

Einflußfaktoren	Auswirkung auf		
	Ladungstrennung	Ladungstransport	Ladungsanhäufung Feldstärken- überschreitungen
Geschwindigkeit in den Ölkanälen (Turbulenzen)	Erhöhte Ladungsträgerproduktion, größere Gefährdung (Beginn bei $v \approx 0,5$ m/sec, max 4,5/sec in Verengungen)		
Feuchtigkeit	Rückgang der Effekte, vor allem durch höhere Leitfähigkeit der beteiligten Isoliermaterialien		
Verunreinigungen	wirken in Richtung erhöhter Ladungsträgerproduktion		
Oberflächenstruktur des festen Isoliermaterials	bei rauhem Material und großer Geschwindigkeit ist eine Erhöhung des Effektes zu erwarten		
Öleigenschaften	Unterschiede der Tendenz zur Elektrifikation wurden festgestellt (Vorschläge für Prüfeinrichtungen)		
Äußeres Feld	sowohl bei Wechselspannungsfelder als auch bei Gleichspannungsfelder wurde eine erhöhte Ladungsausbeute festgestellt (Ladungsinjektion)		



a) Mini Static Tester  
nach /2/



b) Couette Charging Apparatus  
nach /3/

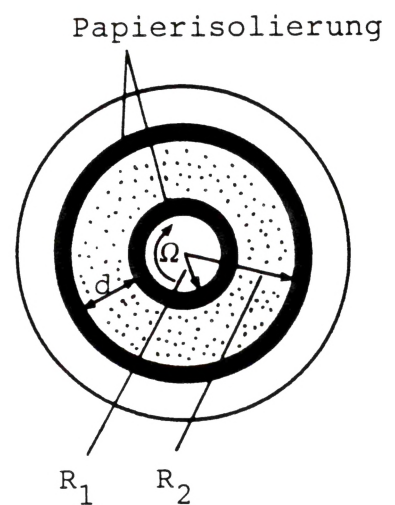


Bild 6: Messmethoden zur Messung der Tendenz zur Elektrifikation von Isolierölen (ECT-Messung)

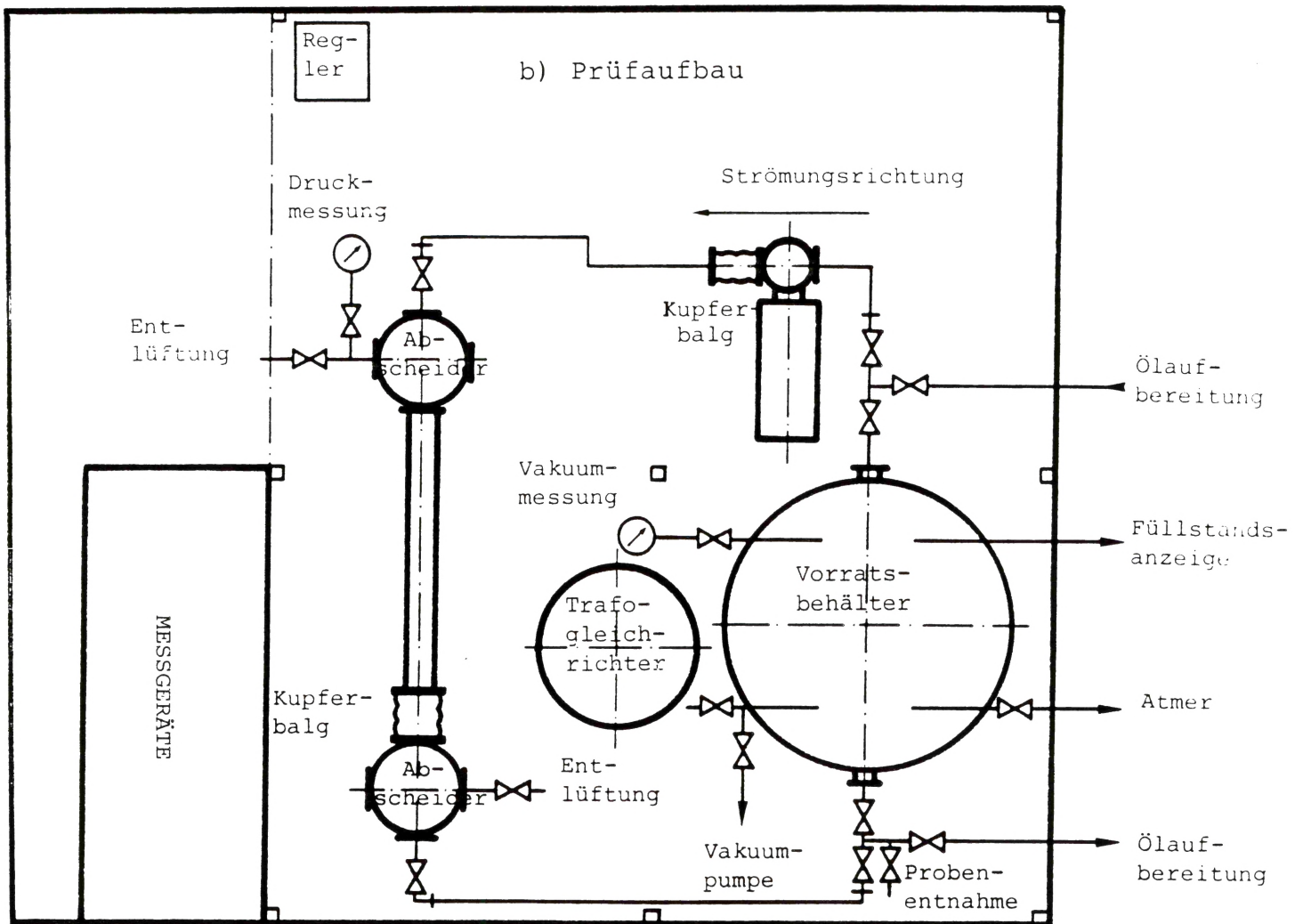
Für die Bestimmung der Neigung zur elektrostatischen Aufladung werden für Isolieröle bereits einige Meßverfahren vorgeschlagen, die jedoch noch aufeinander abgestimmt werden müssen. Als Meßprinzip verwendet man die Ladungstrennung an der Grenzfläche von Papier und Öl, bei definierter Ölmenge durch Messung des Stromes bzw. Ladung. Die nachfolgenden Skizzen zeigen zwei der vorgeschlagenen Methoden (Bild 6).

Neben den Materialeinflüssen, den Einflüssen durch Feuchtigkeit, Temperatur und Geschwindigkeit ist für die Ergiebigkeit der Ladungsinjektion das auch an der Grenzschicht wirkende elektrische Feld maßgebend.

Experimentelle Untersuchungen gestalten sich sehr schwierig, da sich die Erscheinungen des Ladungsübertrittes an den Grenzflächen mit den Erscheinungen der Ladungsträgerbildung durch Dissoziation im Dielektrikum oder der Injektion von Elektronen überdecken. Elektrostatische Erscheinungen spielen jedoch auch bei der Ausbildung von Durch- oder Überschlagsvorgängen eine große Rolle, so daß auf diesem Gebiet eine verstärkte, interfakultäre Forschung notwendig ist.

Angesichts des großen Problemkreises, in denen elektrostatische Erscheinungen die elektrische Festigkeit in Öl-Papier-Isoliersystemen beeinflussen, ist es verständlich, daß von einzelnen Laboratorien meist nur problemorientierte Untersuchungen durchgeführt werden. So beschäftigen wir uns am Institut für Hochspannungstechnik der TU Graz hauptsächlich mit der Ladungserzeugung in engen Kanälen, wie man sie beispielsweise im Kühlkreislauf von Transformatoren findet. Das Blockschaltbild und die räumliche Anlage des Prüfplatzes sehen sie im Bild 7.

Die Untersuchungen erfordern einen außerordentlich hohen meßtechnischen Aufwand. Um die Zusammenhänge zwischen den elektrischen Erscheinungen und den Strömungsvorgängen zu



a) Prinzipschema

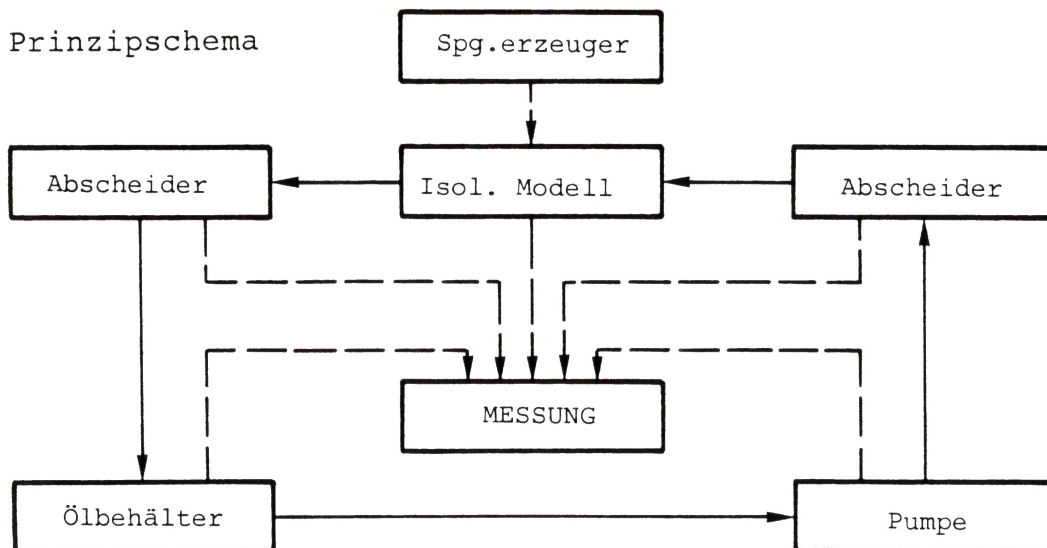


Bild 7: Prüfplatz zur Untersuchung von elektrostatischen Aufladungen an Öl-Zellulose-Isoliersystemen

finden, sind elektrische und hydraulische Messungen notwendig. Da aber auch die Materialeigenschaften, wie Feuchtigkeitsgehalt des Isolieröles oder des festen Isoliermaterials eine Rolle spielen, müssen auch die dielektrischen Kennwerte laufend bestimmt werden. Selbstverständlich müssen bei den Versuchsserien die einmal eingestellten Parameter konstant gehalten werden, da für die Messungen immer eine bestimmte Zeit benötigt wird.

Die Institutsuntersuchungen an Isolierungsmodellen hinsichtlich der elektrostatischen Erscheinungen laufen parallel mit Untersuchungen der elektrischen Festigkeit an großen Isolierstrecken. Hier werden ebenfalls manche Effekte durch Raumladungen bestimmt, so daß beide Untersuchungen sich auf das effektivste ergänzen.

Wir hoffen, daß wir mit unseren Grundlagenuntersuchungen, bei denen die Anwendungstechnik die Schwerpunkte bestimmen, einen Beitrag zur Lösung derzeit aktueller Probleme beitragen zu können. Wir glauben aber auch, daß wir einen Beitrag zu künftigen Entwicklungen, insbesondere im Hinblick auf die Leistungsübertragung mit HGÜ liefern können. Auf alle Fälle ist jedoch die Beschäftigung mit der Physik der Durch- und Überschlagsvorgänge in Ölisoliersystemen schon deshalb faszinierend, weil man die Ursachen und Wirkungen des Spannungszusammenbruches ausgehend von molekularen Vorgängen bis zur technischen Anordnung verfolgen muß und dadurch zu interfakultären Lösungen geführt wird, die die Wissensbreite erheblich vergrößern.

Wir werden über unsere, derzeit in größerem Umfang begonnenen Versuche laufend berichten und würden uns freuen, wenn wir hören, daß unsere Ergebnisse Ihnen bei der Lösung ihrer praktischen Probleme geholfen haben.

## 6. Literaturverzeichnis

- /1/ Krämer H.: Zündgefahren durch aufgeladene Flüssigkeiten - Neuere Erkenntnisse zu einem alten Problem. PTB-Mitteilungen 91, 4/81, s. 258-265.
- /2/ Oommen, T.V.: Static electrification properties of transformer oil.  
IEEE Trans. E.I., Vol. 23, No. 1, 1988, s. 123-128
- /3/ Lyon, D.J.; e.a.: Couette charger for measurement of equilibrium and energization flow electrification parameters.  
IEEE Trans. E.I., Vol. 23, No. 1, 1988, s. 159-176