

Prom.-Nr. 2102

# Quecksilber-Schutzvorrichtungen

**Untersuchungen über Schaltvorgänge  
in flüssigen Leitern und Beiträge zur Entwicklung  
von Ueberstrom-Schutzvorrichtungen  
mit Quecksilberleitern**

VON DER

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE IN ZÜRICH**

ZUR ERLANGUNG

**DER WÜRDE EINES DOKTORS DER  
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN**

GENEHMIGTE

**PROMOTIONSARBEIT**

VORGELEGT VON

**ERWIN WETTSTEIN**

von Fislisbach (AG)

Referent: Herr Prof. Dr. M. Strutt  
Korreferent: Herr Prof. E. Baumann

Juris-Verlag Zürich 1952

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat einen doppelten Zweck. Erstens gibt sie näheren Einblick in die Schaltvorgänge in flüssigen Leitern, wie sie z. B. in elektrolytischen und Quecksilber-Unterbrechern, ferner in Quecksilber-Schaltröhren und Quecksilberkontakt-Relais, aber auch in Schmelzsicherungen und bei festen Kontakten vorkommen. Zweitens untersucht sie die Probleme, welche der Bau von Ueberstrom-Schutzvorrichtungen mit Quecksilberleitern bei Nennspannungen von max. 500 V und Nennströmen von max. 25 A stellt. Auf Grund der beschriebenen Untersuchungen und Ueberlegungen sind verzögerte, kurzschlußsichere Stöpsel-Leitungsschutzschalter mit Quecksilberleiter gebaut worden.

Nach einer Uebersicht über die bisherige Literatur und die einschlägigen offiziellen Vorschriften wird zunächst das Verhalten einer Anordnung mit flüssigem Leiter vor dem Ansprechen untersucht. Es ist im stationären Fall charakterisiert durch den elektrischen Widerstand und den Grenzstrom oder die Grenzspannung; bei veränderlichem Strom sind der Temperaturanstieg und die Ansprechcharakteristik von besonderem Interesse. Die zweite Hälfte der Arbeit gilt dem Ansprechvorgang, insbesondere dem Abschaltlichtbogen und der durch ihn verursachten Kurzschlußerwärmung.

Die Formeln 1...6 gestatten die Berechnung des Kaltwiderstandes von beliebigen Anordnungen mit flüssigem Leiter und sind durch Messungen bestätigt worden. Die Grenzspannung einer Anordnung mit flüssigem Leiter, bei welcher der Kanal kurz und die Wärmeableitung in der Kanalwand zu vernachlässigen ist, wurde für verschiedene Kammertemperaturen und -drücke berechnet und in Fig. 12 dargestellt; für die Temperaturabhängigkeit des Leitverhältnisses wird dabei die Formel (12 a) zugrunde gelegt, welche bei Quecksilber eine bessere Näherung ergibt als das Wiedemann-Franz-Lorenz'sche Gesetz. — Das Quadrat des Grenzstromes eines langen Kanals ist nach Formel (17) proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Wandmaterials und umgekehrt proportional zum spezifischen elektrischen Widerstand des flüssigen Leiters beim Verdampfungspunkt. Die Abhängigkeit vom Verhältnis  $r_i/r_a$  ist in Fig. 13 graphisch dargestellt.

Die Anfangstangente des Temperaturanstieges und die Kurzschlußerwärmung des flüssigen Leiters werden unter Vernachlässigung des Wärmeaustausches mit der Umgebung berechnet. Ansprechzeit, Ansprechstrom und Ansprechenergie sind in Fig. 15 für die offiziellen Kurzschlußprüfkreise in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser aufgetragen. Der Einfluß des Prüfkreiswiderstandes ist aus Fig. 16 b ersichtlich. — Nachdem an Hand des streng berechenbaren Kugelschalenmodells die Berechtigung der Nähe-

rung des sukzessiven Aufbaues der stationären Temperaturverteilung von innen her gezeigt ist, wird sie anschließend auf die Berechnung des Temperaturanstieges auf der Kanalinnenoberfläche angewandt. In Fig. 49 sind die Erwärmungskurven dimensionslos dargestellt; die Wärmekapazität des flüssigen Leiters ist dabei berücksichtigt.

Die Untersuchung des Ansprechvorganges und insbesondere des Abschaltlichtbogens hat über die unmittelbare Anwendung bei Schutzvorrichtungen hinaus allgemeinere Bedeutung. Als Versuchsobjekt dient ein in einem durchsichtigen Kanal eingeschlossener Quecksilberfaden. Während der Schaltvorgänge werden auf einem mit konstanter Geschwindigkeit laufenden Filmstreifen nebeneinander sowohl die elektrischen als auch die mechanischen Größen aufgezeichnet, sodaß sie der weiteren Auswertung leicht zugänglich sind. Die Figuren 20 und 29 zeigen Photos der beiden gebauten Aufnahmegeräte; das verbesserte Gerät enthält ein Rad, auf welches der Film angesogen wird. — Die mannigfaltigen Erscheinungsformen von Ansprechvorgang und Abschaltlichtbogen sind aus den zahlreichen beigegebenen Aufnahmen und Oszillogrammen ersichtlich. Beim Ansprechvorgang treten nacheinander drei Druckspitzen auf, welche als Erwärmungsschlag, Verdampfungsschlag und Lichtbogenschlag bezeichnet werden. Der Erwärmungsschlag, herrührend von der Erwärmung und der thermischen Ausdehnung des Quecksilberfadens, ist proportional dem Quadrat der Kapillarenlänge und der  $(4/3)$ -Potenz der Steilheit des Stromdichteanstieges und beträgt einige hundert ata. Der Verdampfungsschlag ist etwa von gleicher Größenordnung. Dagegen ist der Lichtbogenschlag meistens bedeutend kleiner.

Dynamische Lichtbogenkennlinien sind in den Fig. 37 d und 38 c bei variablem Druck und in Fig. 45 bei konstantem Druck angegeben. Sie sind steigend. — Die Löschespannung enthält einen konstanten Anteil von  $16,5 \pm 1$  V für Anoden- und Kathodenfall und ein zur Löschdistanz proportionales Glied. Der Löschgradient ist noch vom Kanaldurchmesser und Druck abhängig, siehe Fig. 41.

Die in einer Schutzvorrichtung anfallende Schaltarbeit ist nicht homogen über die ganze Kanallänge verteilt, sondern insbesondere beim Auftreten eines einzigen Lichtbogens auf seinen Zündpunkt konzentriert, wie die Formeln (62) und (63) unter verschiedenen Voraussetzungen über den Spannungsverlauf zeigen. Die Messung der Schaltarbeit kann im Kurzschlußfall mit Voltmeter und ballistischem Galvanometer erfolgen.

Bei gegebenem Grenzstrom fällt die in der Kreisinduktivität gespeicherte Energie umgekehrt proportional zur  $(4/3)$ -Potenz der Wärmeleitfähigkeit des Kanalmaterials. Hohe radiale thermische Leitfähigkeit ist daher anzustreben. Ein weiteres Mittel zur Ver-

kleinerung der Schaltarbeit im Kanal besteht in der Anordnung eines in Serie liegenden Kontaktes, welcher durch die Druckspitzen im Ansprechmoment geöffnet wird. Der Kanal degeneriert im Grenzfall zum Antriebsorgan für den schaltenden Seriekontakt, welcher zudem die Dauerunterbrechung und die Anzeige übernehmen kann. — Die Umsetzung von Schaltarbeit in kinetische Energie, Deformationsarbeit und Plasmaenergie und die Wärmeableitung in axialer Richtung werden abgeschätzt; sie machen zusammen etwa 1 % der Schaltarbeit aus.

Die Fähigkeit des Kanalmaterials, während der Bogendauer Energie aufzunehmen, wird durch den Materialfaktor  $s_5$  der Kurzschlußsicherheit bewertet. Dieser Faktor ist in Tabelle III für einige Kanalmaterialien zusammengestellt. Bei durchsichtigen Materialien sind nur etwa 10 % der anfallenden Energie durch Wärmeleitung abzuführen; der Rest wird abgestrahlt. — Leitungsschutzschalter mit Seriekontakt und aus metallischen Kreisringen geschichtetem Kanal (vgl. Fig. 47 und 48) haben die Kurzschlußprüfung bestanden.