



Alexander Rosenzopf, BSc

Untersuchung moderner Hochspannungs- Ableiterscheiben mit Stoßstrom

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack

Institut für

Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, Jänner 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack für die wissenschaftliche und fachliche Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit dieser Masterarbeit bedanken. Er hatte immer ein offenes Ohr für meine Anliegen und nahm sich stets Zeit für konstruktive Besprechungen.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement und der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH, die mich während dieser Zeit immer tatkräftig unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meiner gesamten Studienzeit stets gefördert und mir dieses Studium überhaupt erst ermöglicht hat.

KURZFASSUNG

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem elektrischen Verhalten und den Eigenschaften moderner Metalloxid-Ableiterscheiben. Im ersten Abschnitt dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen von solchen Bauelementen, sowie die Anforderungen an die Messtechnik erläutert. Das Hauptaufgabengebiet der praktischen Untersuchungen bestand aus beschleunigten Alterungsversuchen, die die gesamte reale Lebensdauer einer Metalloxid-Ableiterscheiben innerhalb weniger Wochen simulieren. Für die Durchführung der beschleunigten Alterungsversuche wurde eine kleine Stückzahl von Mittelspannungsableiterscheiben zum einen den konventionellen beschleunigten Alterungsverfahren (IEC 60099-4) und zum anderen einer neuen, innovativen Alterungsmethode unterzogen. Bei der neuartigen Methode wurde der Einfluss einer bestimmten Anzahl von Stoßstromimpulsen auf das Alterungsverhalten der Metalloxid-Ableiterscheiben erforscht. Um die Alterungsversuche durchführen zu können, war es zum einen notwendig einen Prüfstand für die beschleunigte thermische Alterung zu konstruieren und zum anderen für die Alterung mit Stoßstromimpulsen die geeignete transiente Messtechnik bereitzustellen.

Bei beiden Alterungsverfahren wurden in regelmäßigen zeitlichen Abständen elektrische Messungen durchgeführt, um so den aktuellen Zustand der Metalloxid-Ableiterscheibe zu bestimmen. Im Rahmen der Auswertungen wurden die Beeinflussungen der beiden Alterungsverfahren auf die elektrischen Parameter der Metalloxid-Ableiterscheiben analysiert. Es konnte bei beiden Alterungsverfahren ein Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften nachgewiesen werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen der praktischen Versuche die Stromaufteilung durch das Ableitervolumen anhand des transienten Temperaturverhaltens moderner Metalloxid-Ableiterscheiben erforscht.

Schlüsselworte: Metalloxid-Ableiterscheiben, transiente Messtechnik, Stoßstrom, beschleunigte Alterung

ABSTRACT

This master thesis deals with the electrical behavior and properties of modern metaloxide-arrester discs. The first part of this thesis explains the theoretical basis of such components as well as the requirements for the transient measuring technology. The main field of the practical investigations consists of accelerated ageing tests, which simulate the entire real lifetime of a metaloxide-arrester disc within a few weeks. To carry out the accelerated ageing tests, a small number of medium-voltage metaloxide-arrester discs were subjected to the conventional accelerated ageing process (IEC 60099-4) and to a new, innovative ageing method. In the novel method, the influence of a certain number of impulse-currents on the ageing behavior of the metaloxide-arrester disc was investigated. In order to be able to carry out the ageing tests, it was on the one hand necessary to construct a test stand for the accelerated thermal ageing and, on the other hand, to provide the suitable transient measuring technology for ageing with impulse-currents.

In both aging methods, electrical measurements were taken at regular time intervals to determine the actual state of the metaloxide-arrester disc. In the context of the evaluations, the influence of the two aging processes on the electrical parameters of the metaloxide-arrester discs was analyzed. In both methods, an influence on the aging behavior could be detected.

Furthermore, in the context of practical experiments, the current distribution through the arrester volume was investigated on the basis of the transient temperature behavior of modern metaloxide-arrester discs.

Keywords: Metaloxide-arrester discs, transient measuring technology, impulse-current, accelerated ageing

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
2	METALLOXID-ABLEITER	3
2.1	Allgemeines zum Metalloxid-Überspannungsableiter	3
2.2	Dimensionierung von Überspannungsableitern.....	5
2.3	Kenngrößen von Metalloxid-Ableiterscheiben	7
2.4	Kennlinie einer Metalloxid-Ableiterscheibe.....	9
2.5	Kennlinienalterung einer Metalloxid-Ableiterscheibe	10
2.6	Einfaches Ersatzschaltbild einer Metalloxid-Ableiterscheibe	12
3	STOßSTROM.....	13
3.1	Exponentieller Stoßstrom.....	13
3.2	Erzeugung von Stoßströmen	14
3.3	Messen von Stoßströmen und Ableitrestspannungen	14
3.3.1	Messung des Stoßstromes mit einem Shuntwiderstand.....	14
3.3.2	Messen der Ableitrestspannung mit einem kapazitiv. Hochspannungsteiler	15
3.3.3	Festlegen eines hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes	16
4	STROMAUFTeilUNG IM ABLEITERVOLUMEN.....	20
4.1	Konstruktives Konzept für die Messungen	20
4.2	Voruntersuchungen an Metalloxid-Ableiterscheiben	21
4.3	Weiterführende Arbeiten	25
5	BESCHLEUNIGTE ALTERUNG VON METALLOXID-ABLEITERSCHEIBEN.....	26
5.1	Beschleunigte thermische Alterung.....	26
5.1.1	Normative Grundlagen.....	26
5.1.2	Konstruktion eines Prüfstandes zur beschleunigten thermischen Alterung	27
5.1.3	Mechanischer Aufbau des beschleunigten Alterungsversuches.....	29
5.1.4	Iterative Messungen während des beschl. thermischen Alterungsverfahrens	31
5.1.5	Ablauf des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens	34
5.1.6	Verlauf der Hochspannung während der gesamten Alterungsdauer	35

5.1.7 Umgebungsbedingungen im Wärmeschrank	36
5.1.8 Ergebnisse der beschleunigten thermischen Alterung	37
5.2 Alterung mit Stoßstromimpulsen - „Impulse-Ageing“	41
5.2.1 Mechanische Einrichtungen.....	42
5.2.2 Iterative Messungen im Rahmen des „Impulse-Ageings“	44
5.2.3 Ablauf des „Impulse-Ageings“	47
5.2.4 Ergebnisse des „Impulse-Ageings“	48
5.3 Diskussion beider beschleunigter Alterungsverfahren.....	56
5.4 Weiterführende Arbeiten	57
6 ZUSAMMENFASSUNG	59
LITERATURVERZEICHNIS	61
ANHANG A – STOßSTROMANLAGE.....	I
A.1 Allgemeines zur Anlage	i
A.2 Elektrische Daten der Anlage.....	ii
A.3 Konstruktiver Aufbau	iii
A.3.1 Gleichrichter- und Ladeeinrichtung	iii
A.3.2 Stoßkondensatoren	iii
A.3.3 Ölgefüllter Umschaltkessel mit Kugelfunkenstrecke und Reuse.....	iv
A.3.4 Steuerwarte	vi
A.4 Bedienung der Anlage	vii
A.5 Wiederinbetriebnahme der Stoßstromanlage	viii
A.6 Konfiguration der Anlage für verschiedene Stoßstromkurvenformen.....	ix
ANHANG B – FESTLEGEN EINES HOCHSPANNUNGSSEITIGEN DÄMPFUNGSWIDERSTANDES.....	XI
ANHANG C – DIAGRAMME DER BESCHLEUNIGTEN ALTERUNGSVERSUCHE	XIV
ANHANG D – STEUEREINHEIT DES THERMISCHEN ALTERUNGSPRÜFSTANDES	XIX
ANHANG E – GERÄTEVERZEICHNIS.....	XXI
ANHANG F – THOMA-REGLER	XXII

1 EINLEITUNG

Überspannungsableiter stellen in den heutigen Energieversorgungsnetzen ein unentbehrliches Betriebsmittel dar. Sie werden eingesetzt, um elektrische Betriebsmittel von den Auswirkungen eingepprägter Stoßströme, wie sie etwa von atmosphärischen Entladungen direkt oder indirekt hervorgerufen werden können, wirkungsvoll zu schützen. Eine weitere Ursache von Überspannungen sind Schalthandlungen im Hochspannungsnetz, welche eine sogenannte Schaltüberspannung zur Folge haben können.

In der Vergangenheit wurden Funkenstreckenableiter mit Ableitwiderständen aus Silizium-Karbid eingesetzt. Heutzutage werden bei einer Neuinstallation nur noch funkenstreckenlose Metalloxid-Überspannungsableiter, welche aus einer Vielzahl von Metalloxid-Ableiterscheiben bestehen, verwendet. Ein charakteristisches Merkmal dieser modernen Metalloxid-Ableiterscheiben stellt deren nichtlineare Kennlinie dar, welche eine Abtrennung vom Netz durch eine Serienfunkenstrecke, wie es früher mit Silizium-Karbid-Ableitwiderständen erforderlich war, überflüssig macht. Genauer gesagt bedeutet das, dass sich der Metalloxid-Überspannungsableiter im normalen Betriebszustand nahezu wie ein Isolator verhält, der bei Einprägung eines Stoßstromes im Kiloamperebereich leitend wird und dadurch die Spannung an seinen Anschlussklemmen niedrig hält. Durch dieses Verhalten wird die Isolation des zugeordneten Betriebsmittels von den Auswirkungen der Überspannung geschützt, und dadurch eine mögliche Zerstörung verhindert. [1]

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden moderne Metalloxid-Ableiterscheiben, wie sie heutzutage im Energieübertragungsnetz eingesetzt werden, vielfältigen Untersuchungen unterzogen. Ein Teilaufgabengebiet bildet die Temperaturmessung dieser Bauelemente. Durch diese Messungen wurde versucht mehr Informationen über die Stromaufteilung durch das Volumen einer Metalloxid-Ableiterscheibe während eines Ableitvorganges zu erhalten. Das größte Aufgabengebiet dieser Arbeit stellen beschleunigte Alterungsversuche mit modernen Metalloxid-Ableiterscheiben dar. Für diese Versuche wurde zum einen ein Versuchsstand zur beschleunigten thermischen Alterung aufgebaut, als auch die transiente Messtechnik für die Messungen mit Stoßstrom ausgewählt. Im Zuge der Alterungsversuche wurde ein neues Verfahren untersucht, das zur beschleunigten Alterung der Metalloxid-Ableiterscheiben verwendet werden kann. Bei diesem neuartigen Verfahren werden Stoßstromimpulse eingesetzt, um die Metalloxid-Ableiterscheiben beschleunigt zu altern. Durch die Anwendung der neuen Methode kann im Vergleich zur konventionellen beschleunigten Alterung laut IEC 60099-4 der Zeitfaktor erheblich verringert werden.

2 METALLOXID-ABLEITER

2.1 ALLGEMEINES ZUM METALLOXID-ÜBERSPANNUNGSABLEITER

In einem modernen Überspannungsableiter, wie er heutzutage bei einer Neuinstallation im Hochspannungsnetz verwendet wird, werden üblicherweise moderne Metalloxid-Ableiterscheiben verbaut. In Bild 2-1 ist der konstruktive Aufbau eines Überspannungsableiters dargestellt, wie er üblicherweise im Hochspannungsnetz verwendet wird. Die Metalloxid-Ableiterscheiben werden dabei in einer Säule übereinandergestapelt, um die nötige Spannungsfestigkeit zu erreichen. Je nach Höhe der Ableitrestspannung U_{res} ergeben sich zwischen 450 V/mm bei Mittelspannungsableitern und 330 V/mm bei Hochspannungsableitern [1]. Anhand dieser Spannung kann nun die notwendige erforderliche Höhe der Ableiterscheibensäule berechnet werden. Ist diese Säule kleiner als die Höhe des Porzellangehäuses, so werden metallische Füllstücke zwischen den Scheiben verbaut, um die Höhendifferenz auszugleichen.

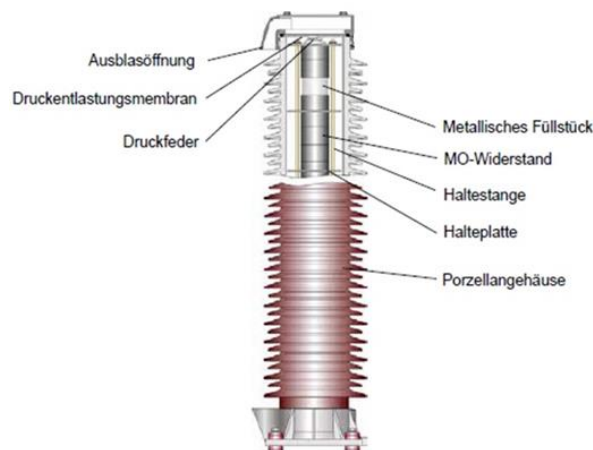


Bild 2-1: Mech. Komponenten eines Überspannungsableiters mit Metalloxid-Ableiterscheiben [1]

Die Säule der Metalloxid-Ableiterscheiben wird durch geeignete mechanische Einrichtungen (Haltestange und Halteplatte) sowie einer Druckfeder, die sicherstellt, dass alle Scheiben einen minimalen Übergangswiderstand haben, stabil gehalten. Sollte es zu einem Fehlerfall (Lichtbogen im Inneren des Gehäuses) kommen, so dient die Druckentlastungsmembran dazu, den durch die Erwärmung hervorgerufenen Druckanstieg zu verhindern. Geschieht dies nicht, so würde es zu einer Explosion des Porzellangehäuses und einen damit verbundenen Splitterflug kommen. Der Druck wird im erfolgreichen Ansprechen der Druckentlastungsmembran über die Ausblasöffnung abgeführt, gleichzeitig wandert der Lichtbogen vom Inneren des Gehäuses auch über die Ausblasöffnung nach Außen und erlischt beim korrekten Ansprechen der Schutzmaßnahmen.

Durch den Wegfall der Serienfunkenstrecken, wie sie früher bei Silizium-Karbid-Ableiterscheiben nötig waren, ist es heutzutage auch möglich, die Metalloxid-Ableiterscheiben in einem Gehäuse aus Verbundwerkstoffen oder auch Silikon einzubauen. Ein Vorteil von Silikongehäusen ist es, dass es im Fehlerfall und bei einem Versagen der Druckentlastungsmembran nicht zu einem gefährlichen Splitterflug von Porzellanbruchstücken kommen kann. Ein weiterer Vorteil dieser neuen Gehäusebauart ist die Eigenschaft der Hydrophobie des Silikons. Diese Hydrophobie verhindert, dass es zu einem vollkommenen Wasserüberzug des Isolators kommen kann. Stattdessen bilden sich große Wassertropfen, ähnlich wie beim Lotoseffekt aus. Diese Eigenschaft verhindert somit Überschläge entlang der gesamten Isolatoroberfläche. [1]

Durch das ständige Vorhandensein der vollen Betriebsspannung sind die Anforderungen an die Metalloxid-Ableiterscheiben bezüglich deren Alterungsstabilität sowie der aufzunehmenden Energien während eines Ableitvorganges und den anschließenden Folgestrom (Leckstrom) auch hoch. Daher ist auch die Entwicklung von Metalloxid-Ableiterscheiben im Vergleich zu den alten Silizium-Karbid-Ableiterscheiben um einen wesentlichen Teil aufwändiger. [1]

Metalloxid-Ableiterscheiben bestehen zu etwa 90 % aus Zinkoxid (ZnO), der Rest setzt sich aus verschiedenen Dotierstoffen in Form von Oxiden seltener Erden zusammen [2]. [1]

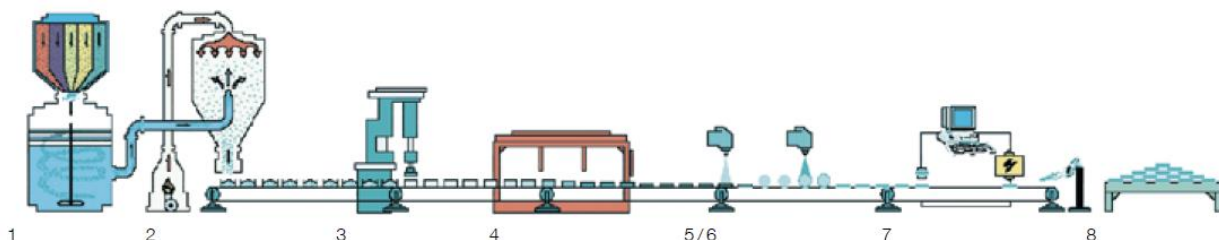


Bild 2-2: Herstellungsprozess von Metalloxid-Ableiterscheiben [3]

- (1) Mischung der Metalloxidpulver
- (2) Sprühtrocknen der Pulvermischung
- (3) Pressen der Metalloxid-Ableiterscheiben
- (4) Sintern
- (5) Metallisieren der Kontaktflächen
- (6) Passivieren der Mantelfläche
- (7) Endprüfung der Metalloxid-Ableiterscheiben
- (8) Fertige Metalloxid-Ableiterscheiben für den Einbau in Ableiter

Bei der Herstellung von Metalloxid-Ableiterscheiben, wie sie in Bild 2-2 dargestellt ist, wird das vorher komprimierte Metalloxidpulver bei einer Temperatur von 1200 °C zu einer Keramik gesintert.

Nach einer Metallisierung der Kontaktflächen und der Endprüfung jeder einzelnen Metalloxid-Ableiterscheibe, sind die einzelnen Elemente bereit zum Einbau in einen Überspannungsableiter.

Das Substrat der Metalloxid-Ableiterscheiben setzt sich aus 10 bis 20 µm großen Zinkoxid-Körnern zusammen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Körnern werden Korngrenzen genannt. Die elektrischen Eigenschaften der Metalloxid-Ableiterscheibe sind durch diese Grenzen bestimmt. Zwischen den Grenzen der einzelnen Körner lagert sich Antimonoxid ab, das während des Sinterprozesses ein Anwachsen der Zinkoxid-Körner verhindert. Der elektrische Leitungsmechanismus wird durch eine Wismutoxid-Phase zwischen den Übergängen bestimmt [19, 20]. [19]

Folgendes Bild zeigt eine Aufnahme der Metalloxid-Struktur mit einem Rasterelektronenmikroskop. Darin sind die einzelnen Zinkoxid-Körner (ZnO) und die Grenzen zwischen den einzelnen Körnern gut zu erkennen.

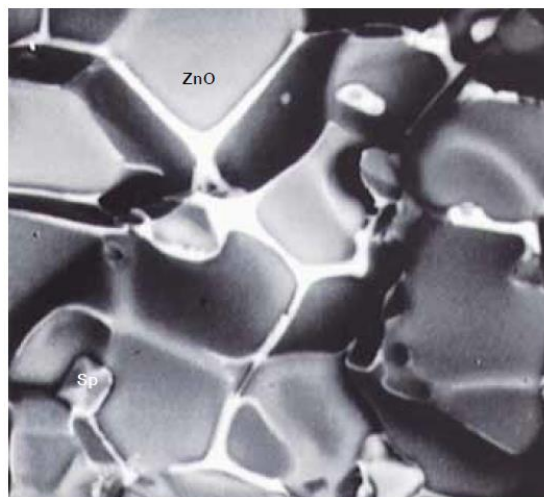


Bild 2-3: Aufnahme der Metalloxid-Struktur mit einem Rasterelektronenmikroskop [3]

2.2 DIMENSIONIERUNG VON ÜBERSPANNUNGSABLEITERN

Das Energieaufnahmevermögen, die Strombelastbarkeit und der Schutzpegel sind im Wesentlichen durch den Durchmesser der Metalloxid-Ableiterscheibe festgelegt. Der Durchmesser solcher Scheiben reicht von etwa 30 mm für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen bis hin zu 100 mm für die Hoch- und Höchstspannungsebene.

Die Auswahl bzw. die Dimensionierung der Metalloxid-Ableiterscheiben erfolgt bei Vorliegen normaler Netzbedingungen typischerweise nach der Systemspannung. Je nach Systemspannung werden unterschiedliche Leitungsentladungsklassen definiert, Tabelle 2-1 liefert einen Überblick über die unterschiedlichen Klassen mit deren zugehörigen Systemspannungen. [1]

Tabelle 2-1: Einteilung der Leitungsentladungsklassen nach der Systemspannung [1]

Leitungsentladungsklasse	U_s in kV
1	≤ 245
2	≤ 300
3	≤ 420
4	≤ 550
5	≤ 800

Beim Einsatz in der Praxis wird häufig die nächst höhere Klasse ausgewählt, um einen gewissen Sicherheitsfaktor zu erhalten. Daraus ergibt sich das Problem, dass die derzeit höchste Leitungsentladungsklasse 5 nur einen Spannungsbereich von $U < 550$ kV abdeckt. Beim Vorliegen einer höheren Systemspannung ist darauf zu achten, dass Metalloxid-Ableiterscheiben mit einem weitaus höheren Energieaufnahmevermögen eingesetzt werden müssen. Daher muss bei solchen Netzen auch das Energieaufnahmevermögen durch spezielle Analyse ermittelt werden, damit anstelle der Leitungsentladungsklasse ein genauer Wert für das Energieaufnahmevermögen spezifiziert wird. [1]

Der Durchmesser der Metalloxid-Ableiterscheiben richtet sich nach der Leitungsentladungsklasse, und damit indirekt nach dem Energieaufnahmevermögen. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der Metalloxid-Ableiterscheiben und den unterschiedlichen Leitungsentladungsklassen. [1]

Tabelle 2-2: Zuordnung des Durchmessers von Metalloxid-Ableiterscheiben zu den jeweiligen Leitungsentladungsklassen [1]

Durchmesser in mm	Leitungsentladungsklasse
50	1 und 2
60	2 und 3
70	3 und 4
80	4 und 5
100 (oder 2 * 70)	5 und höher

Durch die Festlegung der Bemessungsspannung und der darauf folgenden Auswahl des Durchmessers ist die gesamte Schutzcharakteristik des Ableiters eindeutig festgelegt. [1]

In Bild 2-4 sind Ableiterscheiben mit drei unterschiedlichen Durchmessern dargestellt. Diese Scheiben werden unter anderen für die praktischen Untersuchungen während der Masterarbeit verwendet. Die einzelnen Metalloxid-Ableiterscheiben unterscheiden sich durch ihr unterschiedliches Energieaufnahmevermögen. Die Metalloxid-Ableiterscheiben, die in Bild 2-4 mit der Nummer

1 und 2 gekennzeichnet sind, wurden für die Hoch- bzw. Höchstspannungsebene ausgelegt, die mit Nummer 3 gekennzeichnete für den Einsatz in der Mittelspannungsebene. Alle hier dargestellten Typen sind für einen Betrieb mit Wechselspannung ausgelegt.

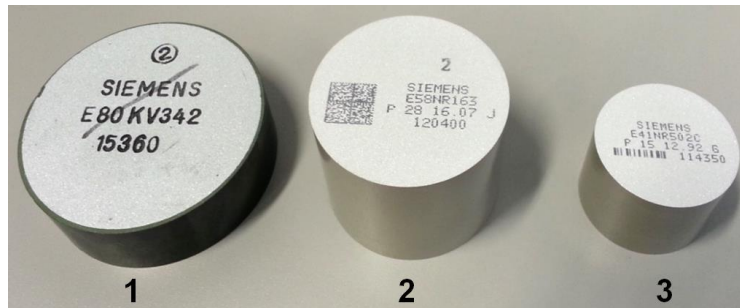


Bild 2-4: Metalloxid-Ableiterscheiben für den Einsatz in unterschiedlichen Spannungsebenen

- (1) Metalloxid-Ableiterscheibe für den Einsatz im Hochspannungsnetz (d = 80 mm)
- (2) Metalloxid-Ableiterscheibe für den Einsatz im Hochspannungsnetz (d = 60 mm)
- (3) Metalloxid-Ableiterscheibe für den Einsatz im Mittelspannungsnetz (d = 42 mm)

2.3 KENNGRÖßEN VON METALLOXID-ABLEITERSCHEIBEN

Wie alle elektrischen Betriebsmittel besitzen auch Metalloxid-Ableiterscheiben elektrische Kenngrößen, durch die das Betriebsverhalten und die Grenzwerte eindeutig festgelegt sind.

- **Dauerspannung einer Metalloxid-Ableiterscheibe U_c :** Ist gekennzeichnet durch den höchstzulässigen Effektivwert der betriebsfrequenten Wechselspannung, die dauernd an den Ableiterklemmen anliegen darf [5].
- **Leckstrom i_c :** Das ist jener Strom, der beim Anliegen der Dauerspannung U_c durch den Ableiter fließt. Der Leckstrom ist nicht größer als 1 mA und um zirka 90° zur Spannung phasenverschoben, der Ableiter verhält sich in diesem Bereich wie eine Kapazität. [6]
- **Bemessungsspannung U_r :** Metalloxid-Ableiterscheiben können für einen kurzen Zeitraum mit höheren Spannungen als der Dauerspannung beansprucht werden. Die Bemessungsspannung ist der höchste zulässige Effektivwert der Wechselspannung, für die die Metalloxid-Ableiterscheibe bemessen ist, um unter den Bedingungen zeitweiliger Überspannungen wie sie in den Arbeitsprüfungen festgelegt sind, ordnungsgemäß zu funktionieren. Die Metalloxid-Ableiterscheibe muss dieser Spannung für mindestens 10 s bzw. 100 s, je nach Herstellerdefinition, standhalten, ohne Schaden zu nehmen. [1]

- **Referenzspannung U_{ref} :** Ist der Effektivwert jener Spannung, die beim Fließen des Referenzstromes i_{ref} an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfällt. [1]
- **Referenzstrom i_{ref} :** Scheitelwert des betriebsfrequenten Stromes, der verwendet wird, um die Referenzspannung zu ermitteln. Die Höhe des Referenzstromes wird vom Hersteller für jeden Typ von Metalloxid-Ableiterscheibe eigens festgelegt. Er liegt in einem Bereich von zirka 1 mA bis 10 mA. Bei der Festlegung des Referenzstromes ist darauf zu achten, dass der Scheitelwert eindeutig durch die resistive Komponente des Leckstromes erzeugt wird und somit der Einfluss von Streukapazitäten ausgeschlossen werden kann. [1]
- **Ableitrestspannung U_{res} :** Scheitelwert der Spannung, die an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfällt, wenn diese von einem Stoßstrom durchflossen wird. Beeinflusst wird die Restspannung von der Amplitude und Kurvenform des Ableitstromes, normalerweise bezieht sich die Grenze der Restspannung auf die Stoßform 8/20 μ s [7]. Die Ableitrestspannung, die in der Stückprüfung an einer einzelnen Metalloxid-Ableiterscheibe gemessen wurde, kann für die Serienschaltung im gesamten Ableiter aufsummiert werden und somit die Restspannung des gesamten Ableiters berechnet werden [6].
- **Nenn-Ableitstoßstrom I_n :** Ist der Scheitelwert des Stoßstromes in kA mit genormter Wellenform 8/20 μ s, den die Metalloxid-Ableiterscheibe in einer bestimmten Anzahl und Folge erfolgreich ableiten kann und dabei die höchste zulässige Restspannung nicht überschritten wird [7].
- **Hochstoßstrom I_{hc} :** Scheitelwert eines Stoßstromes der Form 4/10 μ s, mit Hilfe dessen die Stabilität der Metalloxid-Ableiterscheiben bei räumlich nahen Blitzeinschlägen überprüft wird, die Amplituden liegen in einem Bereich zwischen 10 kA bis 100 kA [5]. Dieser Hochstromstoß hat allerdings wenig mit einem echten Blitzentladungsstrom in gleicher Höhe zu tun, da dieser eine Dauer von bis zu einigen Mikrosekunden aufweisen kann. Diese Prüfung stellt bei Metalloxid-Ableiterscheiben, die für höhere Leitungsentladungsklassen ausgelegt sind eher eine dielektische Beanspruchung als eine energetisch bzw. thermische Beanspruchung dar, da die auftretende Restspannung in dieser Prüfung besonders hoch ausfällt. [1]
- **Arbeitsprüfung:** Bei der Arbeitsprüfung von Metalloxid-Ableiterscheiben wird die thermische Stabilität bei einer kombinierten Belastung mit Blitzstoßströmen bzw. Rechteckstoßströmen und anschließenden Anlegen einer Wechselfspannung überprüft.

2.4 KENNLINIE EINER METALLOXID-ABLEITERSCHEIBE

In Bild 2-5 ist die Kennlinie einer Metalloxid-Ableiterscheibe dargestellt. Auf der Abszisse sind typischerweise mehrere Dekaden des Stromes auf der Ordinate die Spannung aufgetragen. Im unteren Teil der Kennlinie, dem Bereich der Spannung U_c verhält sich die Metalloxid-Ableiterscheibe wie eine Kapazität, es fließt fast ausschließlich ein kapazitiver Ladestrom.

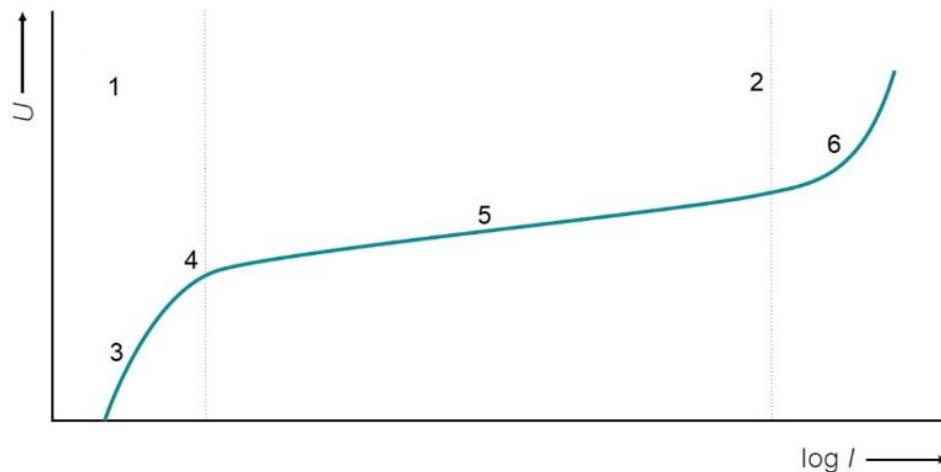


Bild 2-5: Typische Kennlinie einer Metalloxid-Ableiterscheibe [3]

- (1) Bereich der Dauerspannung U_c
- (2) Restspannung U_{res}
- (3) Kapazitiver Bereich, Strom ≤ 1 mA
- (4) Kniepunkt der Kennlinie, Übergang vom sperrenden in den leitenden Bereich
- (5) Stark nichtlinearer Bereich
- (6) Ohmscher linearer Bereich, Hochstrombereich

Bei Erreichen des Kniepunktes beginnt die Metalloxid-Ableiterscheibe allmählich zu leiten, der Strom erhält eine ohmsche Komponente. Ein Erhöhen der angelegten Spannung hat eine starke Zunahme des Stromes zur Folge. Bei Erreichen der Referenzspannung U_{ref} , ist der ohmsche Teil des Stromes bereits dominant gegenüber dem kapazitiven Anteil. Dadurch können kapazitive Streueinflüsse bei der Messung vernachlässigt werden. Es bildet sich wie in Bild 2-6 dargestellt eine markante ohmsche Komponente des Stromes in gleicher Phasenlage mit Spannung aus. [6]

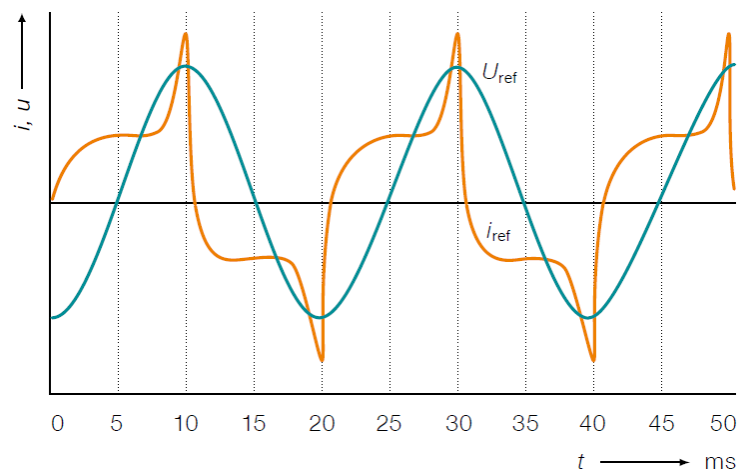


Bild 2-6: Verlauf des Referenzstromes durch eine Metalloxid-Ableiterscheibe bei Anliegen der Referenzspannung [3]

2.5 KENNLINIENALTERUNG EINER METALLOXID-ABLEITERSCHEIBE

Eine Metalloxid-Ableiterscheibe hat im täglichen Betrieb an Wechselspannung nur einen sehr geringen Leckstrom, daraus resultiert auch eine geringe abzuführende Verlustleistung. Diese Verlustleistung ist bedingt durch den negativen Temperaturkoeffizienten der Metalloxid-Ableiterscheibe von der aktuellen Temperatur abhängig [8]. Mit fortschreitender Alterung sinkt auch die thermische Stabilitätsgrenze, was zusätzlich beachtet werden muss [8]. [4]

Die normgerechte beschleunigte Alterung wird bei einer Umgebungstemperatur von 115 °C für die Dauer von 1000 h bei anliegender Dauerwechselspannung der Metalloxid-Ableiterscheibe durchgeführt. Der beschleunigende Effekt ergibt sich durch die Erhöhung der Betriebstemperatur. Die Gesetzmäßigkeiten der beschleunigten Alterung liegen dem Arrhenius-Gesetz zugrunde [21].

Die Alterungsrate ist abhängig vom Beschleunigungsfaktor AF_T :

$$AF_T = 2,5^{\frac{\Delta T}{10}} \quad (1)$$

Dabei ist ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Testtemperatur und dem oberen Limit der Umgebungstemperatur, welche im Betrieb zu erwarten ist. Bei einer Testtemperatur von 115 °C und einer maximalen im realen Betrieb anzunehmenden Umgebungstemperatur von 40 °C berechnet sich der Beschleunigungsfaktor wie folgt:

$$AF_T = 2,5^{\frac{\Delta T}{10}} = 2,5^{\frac{115 \text{ °C} - 40 \text{ °C}}{10}} = 965,05 \quad (2)$$

Um nun die minimale zu erwartende Lebensdauer der Metalloxid-Ableiterscheibe zu berechnen, muss der Beschleunigungsfaktor mit der Testdauer von 1000 Stunden multipliziert werden.

$$\text{Minimale Lebensdauer in Stunden} = AF_T \cdot \text{Testdauer} = 965,05 \cdot 1000 \text{ h} = 965050 \text{ h} \quad (3)$$

$$\text{Minimale Lebensdauer in Jahren} = \frac{965050 \text{ h}}{8760 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}}} \sim 110 \text{ Jahre} \quad (4)$$

Die minimale zu erwartende Lebensdauer bei einer maximalen Betriebstemperatur von 40 °C beträgt in etwa 110 Jahre. Eine weitere Beschleunigung dieses Verfahrens ist nur durch eine Erhöhung der Testtemperatur möglich. Im Allgemeinen würde eine Erhöhung der Testtemperatur allerdings auch die physikalischen Eigenschaften des Ableiterscheibenmaterials ändern, was die Anwendung des Arrhenius-Gesetzes zur Bestimmung des Beschleunigungsfaktors nicht mehr zulassen würde. [5]

Der Effekt der Kennlinienalterung macht sich durch eine steigende Verlustleistung im Dauerbetrieb bemerkbar und führt im Laufe der Zeit zu einer thermischen Instabilität. Das typische Altern einer Metalloxid-Ableiterscheibe macht sich durch eine steigende Verlustleistung, bedingt durch einen höheren Strom bei gleicher anliegender Spannung bzw. einer kleineren Spannung bei einem gleichen eingprägten Strom bemerkbar. [4]

Bild 2-7 veranschaulicht das vorgestellte Verhalten an einem Beispiel der Spannungs- und Stromkennlinie:

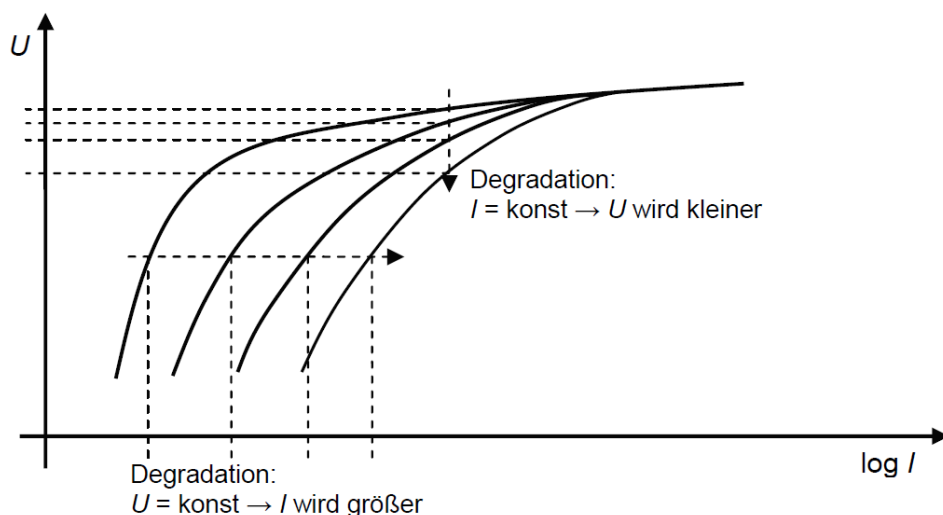


Bild 2-7: Beispielhafte Darstellung der Kennlinie im Bereich des Leckstromes [4]

2.6 EINFACHES ERSATZSCHALTBILD EINER METALLOXID-ABLEITERSCHEIBE

Das einfache Ersatzschaltbild einer Metalloxid-Ableiterscheibe besteht aus einem Widerstand, welcher von der anliegenden Spannung abhängig ist und einer Kapazität, welche parallel zu diesem Widerstand angeordnet ist.

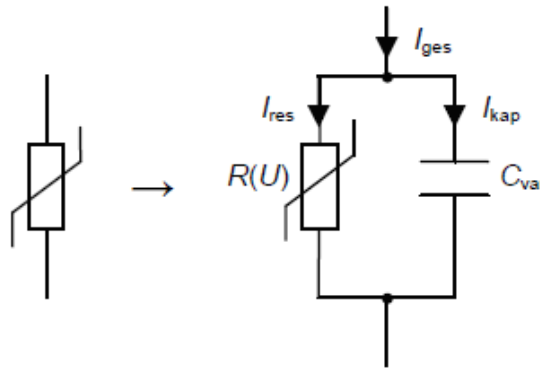


Bild 2-8: Schaltsymbol und vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Metalloxid-Ableiterscheibe [4]

Der Gesamtstrom I_{ges} setzt sich aus einem resistiven Anteil I_{res} und einem kapazitiven Anteil I_{kap} zusammen. In der Spannungs- und Strom-Kennlinie eines Varistors wird nur der resistive Teil des Stromes dargestellt. Laut Definition entspricht der resistive Anteil bei Wechselspannung dem Augenblickswert des Gesamtstromes im Spannungsmaximum. Die Kapazität, abhängig vom Durchmesser und der Höhe liegt im Bereich von einigen Nanofarad bei Ableitern für kleine Spannungen, bis hin zu wenigen Picofarad bei Ableitern für den Einsatz unter Hochspannung.

3 STOßSTROM

3.1 EXPONENTIELLER STOßSTROM

Die Kurvenform eines Exponential-Stoßstromes ist gekennzeichnet durch einen relativ schnellen und annähernd exponentiellen Anstieg bis zum Scheitel, dem anschließend ein langsamer Abfall auf null folgt. Ein solcher Exponential-Stoßstrom ist in Bild 3-1 dargestellt. Die Kenngrößen des Exponential-Stoßstromes sind neben dem Scheitelwert \hat{i} als Wert des Prüfstromes, die Stirnzeit T_1 und Rückenhalbwertszeit T_2 . Bezogen werden die beiden Zeitparameter auf den virtuellen Nullpunkt O_1 , der sich durch den Schnittpunkt der Stirngeraden mit der Nulllinie ergibt.

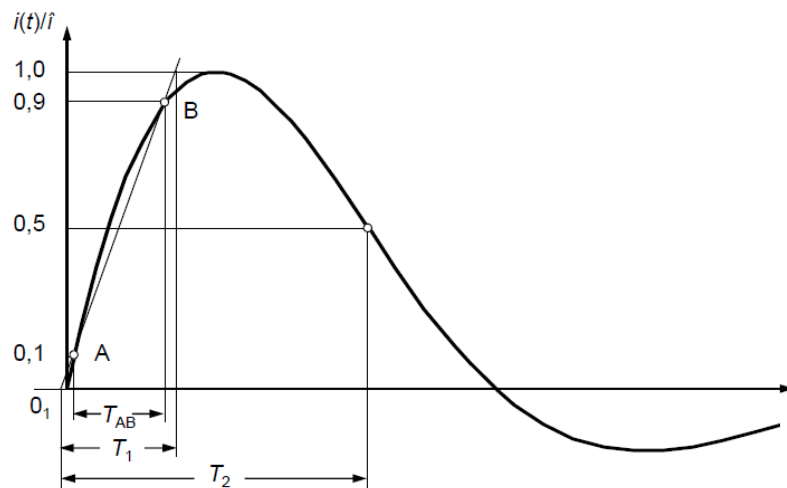


Bild 3-1: Kurvenform eines Exponential-Stoßstromes [9]

Im Gegensatz zu Stoßspannungen verläuft bei Stoßströmen die Stirngerade durch den Punkt A bei einem Wert von $0,1\hat{i}$ und durch Punkt B bei einem Wert von $0,9\hat{i}$. Die Stirnzeit berechnet sich zu:

$$T_1 = 1,25 \cdot T_{AB} \quad (5)$$

Die Rückenhalbwertszeit T_2 ist definiert als der Zeitraum zwischen dem virtuellen Nullpunkt O_1 und dem Zeitpunkt, bei dem die Amplitude des Stoßstromes auf 50 % seines Scheitelwertes abgefallen ist [10]. Gekennzeichnet werden Exponential-Stoßströme durch Angabe ihrer Stirnzeit und Rückenhalbwertszeit in Mikrosekunden. Zum Beispiel weist der Stoßstrom mit der genormten Impulsform $8/20 \mu\text{s}$ eine Stirnzeit von $T_1 = 8 \mu\text{s}$ und eine Rückenhalbwertszeit von $T_2 = 20 \mu\text{s}$ auf. Die Toleranzgrenzen eines Impulses der Form $8/20 \mu\text{s}$ liegen bei $\pm 10 \%$ für den Scheitelwert \hat{i} und jeweils $\pm 20 \%$ für die Zeitparameter T_1 und T_2 . [9]

3.2 ERZEUGUNG VON STOßSTRÖMEN

Eine Stoßstromanlage zur Erzeugung von Exponentialstoßströmen (Bild 3-2) besteht im Wesentlichen aus einer Kondensatorbatterie, die nachdem sie auf eine gewisse Spannung aufgeladen wurde, zum gewünschten Zeitpunkt mit Hilfe eines Schalters (meistens eine getriggerte Funkenstrecke) über den Prüfling entladen wird. Durch die unvermeidbare Induktivität der Anlage (die sog. Eigeninduktivität), ist es notwendig den Entladekreis noch mit einem entsprechenden Dämpfungswiderstand (im Schaltbild als R gekennzeichnet) zu versehen. Ansonsten wäre es nicht möglich eine vorgeschriebene Kurvenform (zum Beispiel Vorgaben aus einer Prüfnorm) des Impulsstromes zu erzeugen. [11]

Der Stoßstrom $i(t)$ kann mit Hilfe des hervorgerufenen Spannungsabfall $u_m(t)$ am Shuntwiderstand R_m aufgezeichnet werden. Die zeitlichen Parameter des Stoßstromes werden außer durch die Kapazität C, den Widerstand R und der Induktivität L auch noch durch den Shuntwiderstand R_m und der Impedanz des Prüflings beeinflusst. [9]

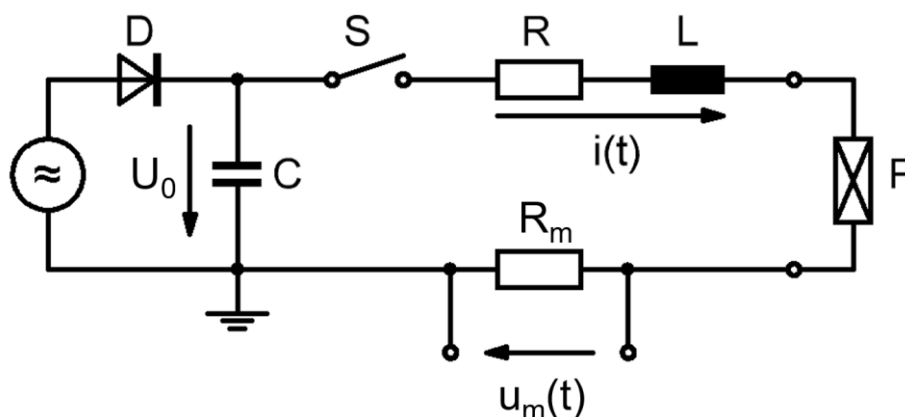


Bild 3-2: Schaltbild eines Generators zur Erzeugung von exponentiellen Stoßströmen [9]

3.3 MESSEN VON STOßSTRÖMEN UND ABLEITRESTSPANNUNGEN

3.3.1 Messung des Stoßstromes mit einem Shuntwiderstand

Zur Messung des Stoßstromes wurde ein geeigneter Shuntwiderstand in der Größe von 5,13 m Ω verwendet. Der zeitliche Verlauf des Stoßstromes ist in Bild 3-7 dargestellt.

Um den Strom direkt messen zu können, stehen einige Shunts in Röhrenbauform zur Verfügung. Ein Vorteil dieses Verfahren ist es, dass die Strommessung ohne den induktiven Anteil erfolgen kann. Ein Nachteil ist, dass sie nicht unerheblich Energie aufnehmen müssen und eine galvanische Verbindung zwischen dem Stoßkreis und dem Messsystem besteht. Das Messkabel muss auch mit

einem Abschlusswiderstand, der dessen Wellenwiderstand entspricht, abgeschlossen werden. Ansonsten würde es zu unerwünschten Reflexionen zwischen dem hochohmigen Messsystemeingang und dem niederohmigen Innenwiderstand des Shunts kommen. Bild 3-3 zeigt den Aufbau eines Shuntwiderstandes in Röhrenbauform.

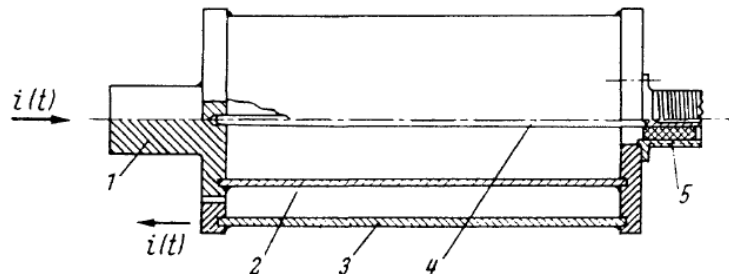


Bild 3-3: Aufbau eines niederohmigen Messwiderstandes koaxialer Bauform [12]

- (1) Anschlussbolzen
- (2) Innenleiter
- (3) Koaxialer Zylinder
- (4) Abgriff zur Spannungsmessung
- (5) Koaxiale HF-Buchse

Der Strom fließt ausgehend vom Anschlussbolzen durch den aus dünnem Widerstandsmaterial gefertigten Innenzylinder 2 und über den koaxialen Zylinder 3, welcher aus normalleitendem Material besteht. Die Spannung, welche am Innenzylinder abfällt, wird über den Abgriff 4 und die koaxiale HF-Buchse an das Messsystem über ein Koaxialkabel übertragen. [12]

3.3.2 Messen der Ableitrestspannung mit einem kapazitiven Hochspannungsteiler

Um die Ableitrestspannung, welche an einer Metalloxid-Ableiterscheibe abfällt, zu messen, musste ein geeignetes transientes Messsystem verwendet werden. Dieses bestand aus einem kapazitiven Hochspannungsteiler, welcher hochspannungsseitig einen Dämpfungswiderstand im Bereich von 125Ω vorgeschaltet hatte. Mit diesem kapazitiven Hochspannungsteiler wurden bereits in der Vergangenheit gute Ergebnisse bei der Messung von transienten Messgrößen erzielt. Mit diesem Teiler war es möglich, die Spannung, welche an der Metalloxid-Ableiterscheibe auftritt ohne störendes Überschwingen zu messen. Bild 3-4 zeigt den Aufbau eines rein kapazitiven Messsystems mit einem hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand und einem Widerstand zur Längsanpassung.

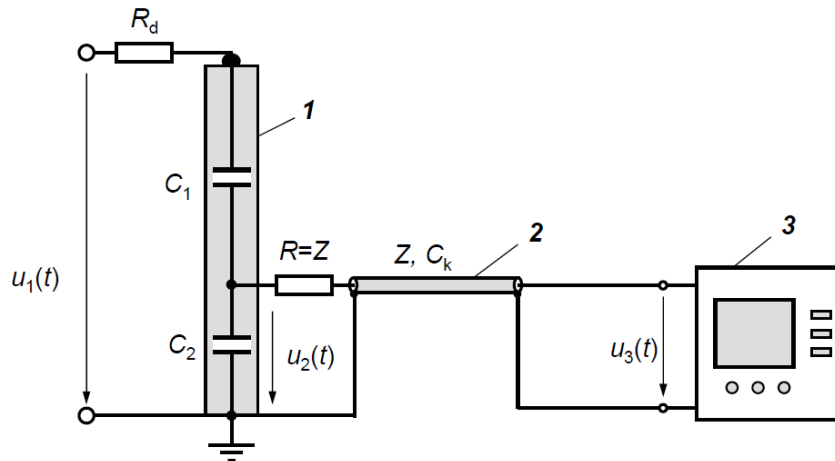


Bild 3-4: Transientes Messsystem mit einem rein kapazitiven Teiler [9]

- (1) Kapazitiver Hochspannungsteiler
- (2) Koaxialkabel mit Wellenwiderstand Z und Kabelkapazität C_k
- (3) Digitalrecorder

Dieser rein kapazitive Aufbau beinhaltet einen sogenannten Längswiderstand zur Längsanpassung. Bei der Längsanpassung wird das Messkabel nicht direkt an den Messsignalausgang des kapazitiven Hochspannungsteilers angeschlossen, sondern über einen Längswiderstand R_a , der dem Kabelwellenwiderstand Z von 50Ω oder 75Ω entspricht. Das verwendete Koaxialkabel wirkt für schnellveränderliche Spannungen wie ein Widerstand mit dem Wellenwiderstand Z . Die Serienschaltung vom Längsanpassungswiderstand R mit dem Wellenwiderstand Z verursacht eine Halbierung der vom Hochspannungsteilerausgang in das Kabel einlaufenden Spannungswelle. Erreicht die Welle den hochohmigen Eingang des Messsystems wird diese verdoppelt, so dass am Eingang des Recorders die volle Messspannung anliegt. Durch den hochohmigen Eingang des Messsystems (offenes Kabelende) wird die Spannungswelle reflektiert und läuft zum kapazitiven Hochspannungsteiler zurück. Bei Erreichen des kapazitiven Hochspannungsteilers findet sie durch den Längswiderstand $R = Z$ einen reflexionsfreien Abschluss vor. Der Grund dafür ist, dass die Niederspannungskapazität C_2 praktisch einen Kurzschluss für hochfrequente Signale darstellt. [9]

3.3.3 Festlegen eines hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes

Um die anliegende Ableitrestspannung, welche an der Metalloxid-Ableiterscheibe während einer Beanspruchung mit Stoßstrom abfällt, richtig messen zu können, ist es notwendig dem rein kapazitiven Teiler hochspannungsseitig einen Dämpfungswiderstand vorzuschalten. Ohne den Einsatz eines solchen Widerstandes, würde es zu Oszillationen des Messsignales kommen, was die

das Messergebnis negativ beeinflussen würde. In Bild 3-5 und Bild 3-6 werden der Messaufbau, sowie in Bild 3-7 ein Diagramm aus den Messungen mit einer Metalloxid-Ableiterscheibe mit dem für die Anforderungen passenden hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand R_d dargestellt. Weitere Diagramme dieser Messungen sind im Anhang B angeführt.

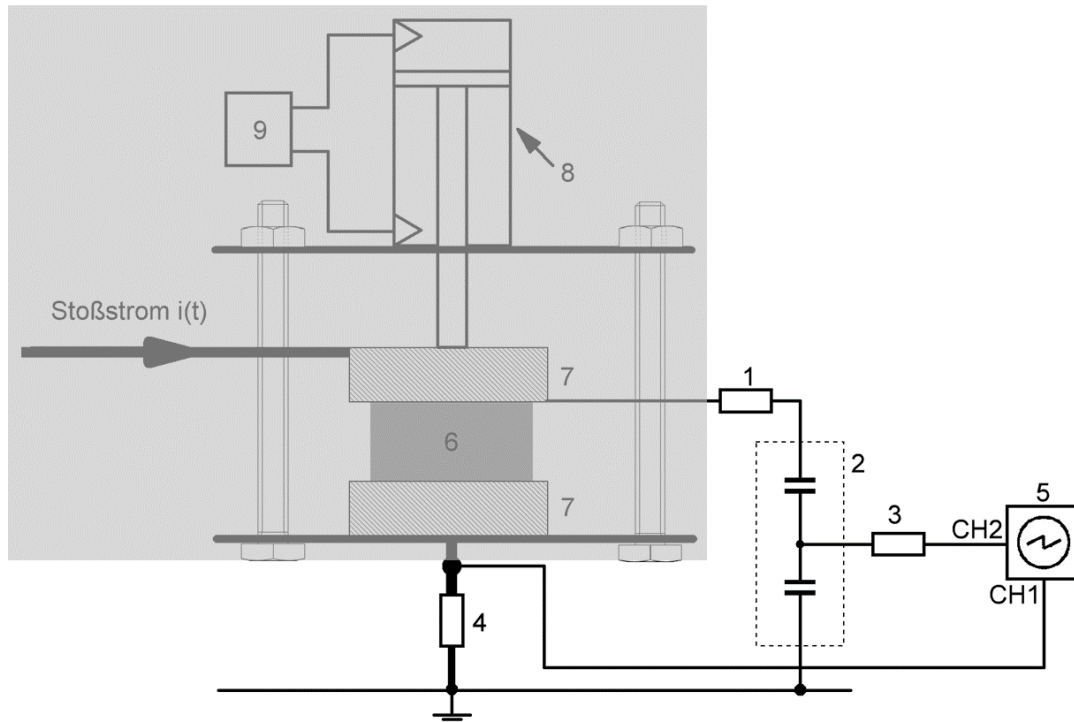


Bild 3-5: Messaufbau zur Festlegung eines passenden hochspannungss. Dämpfungswiderstandes

- (1) Hochspannungsseitiger Dämpfungswiderstand R_d
- (2) Kapazitiver Hochspannungsteiler
- (3) Widerstand zur Längsanpassung R_a
- (4) Shuntwiderstand R_{sh} , zur Messung des Stoßstromes
- (5) Oszilloskop DLM 2054 mit Tastkopf 1:10 für den Strom bzw. 1:100 für die Spannung
- (6) Metalloxid-Ableiterscheibe
- (7) Kontaktelektroden
- (8) Druckluftzylinder
- (9) Druckluftsteuereinheit

Die hochspannungsseitige Kapazität des Hochspannungsteilers bestand aus einem sogenannten „Normal-Kondensator“ (Siemens 1955). Dieser Kondensator hat eine Kapazität von 1000 pF, die maximale Betriebsspannung lag bei einer Spannung von 30 kV bei einer Frequenz von 50 Hz. Die Niederspannungskapazität bestand aus einer Parallelschaltung aus acht FKP1 Folienkondensatoren mit einer Kapazität von 6800 pF, aus zwei FKP1 Folienkondensatoren mit einer Kapazität von 1000 pF und aus einem FKP1 Folienkondensator mit einer Kapazität von 470 pF. Die gesamte Niederspannungskapazität berechnete sich demnach aus der Summe aller verbauten Folienkondensatoren und ergab 56,9 nF. Dadurch ergab sich ein kapazitives Teilverhältnis von 1:56,9.

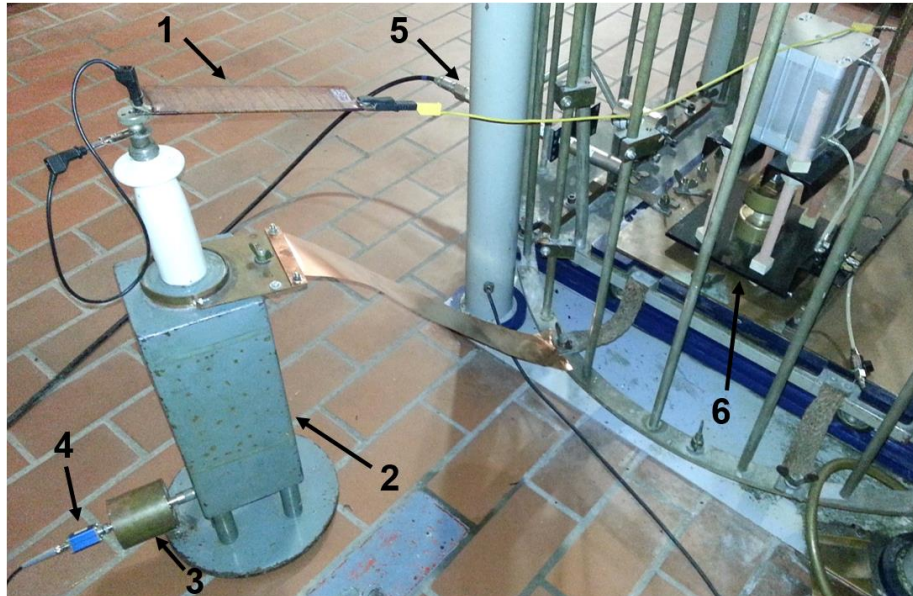


Bild 3-6: Aufbau zur Bestimmung des hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes R_d

- (1) Hochspannungsseitiger Dämpfungswiderstand R_d
- (2) Hochspannungsseitige Kapazität des Teilers „Siemens Normal-Kondensator“
- (3) Niederspannungskapazität
- (4) Widerstand zur Längsanpassung R_a
- (5) Shuntwiderstand R_{sh} , zur Messung des Stoßstromes
- (6) Haltevorrichtung mit Metalloxid-Ableiterscheibe

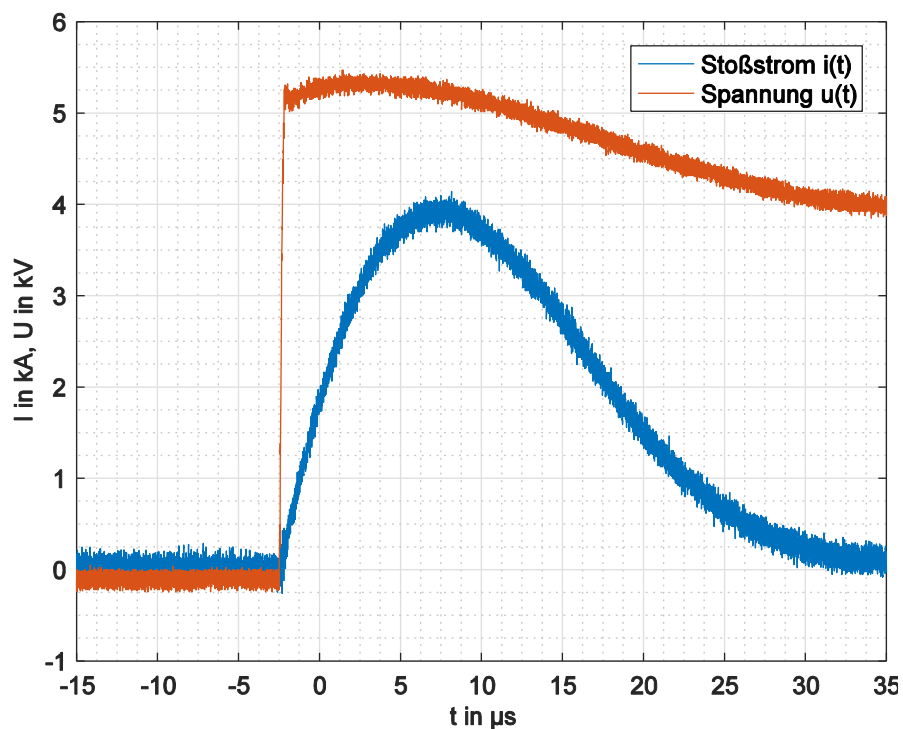


Bild 3-7: Strom- und Spannungsverlauf an einer Metalloxid-Ableiterscheibe vom Typ E80KV342 bei Verwendung eines hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes von 125Ω

Die Bilder 3-5, 3-6 und 3-7 zeigen den Aufbau zur Bestimmung des hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes, den zeitlichen Verlauf der Ableitrestspannung, welche an einer Metalloxid-Ableiterscheibe abfällt, wenn diese von einem Stoßstrom der Form 8/20 μs mit einer Amplitude von etwa 4 kA durchflossen wird. In Bild 3-7 ist das Diagramm einer Messung mit einem hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand von 125 Ω dargestellt. Bei dieser Messung wurde das beste Ergebnis erzielt. Aus diesem Grund wurde dieser Widerstandswert bei allen Messungen der Ableitrestspannung an den Metalloxid-Ableiterscheiben verwendet. In Anhang B sind alle Diagramme aus diesen Messungen dargestellt. Anhand dieser Diagramme kann das Verhalten des kapazitiven Hochspannungsmesssystems bei Wahl eines nicht optimalen hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes beobachtet werden.

4 STROMAUFTEILUNG IM ABLEITERVOLUMEN

4.1 KONSTRUKTIVES KONZEPT FÜR DIE MESSUNGEN

Um auf die Stromaufteilung durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheibe während eines Ableitvorganges rückschließen zu können, ist es notwendig die transiente Temperaturverteilung auf der Kontaktfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe zu erfassen. Erwärmte Bereiche der Kontaktfläche, sogenannte „Hot-Spots“ der Scheibe können ein Indiz für erhöhten Stromfluss an jenen Stellen sein. Diese Stellen sind wiederum ein Anzeichen für eine ungleichmäßige Aufteilung des Stromes durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheibe während des Ableitvorganges.

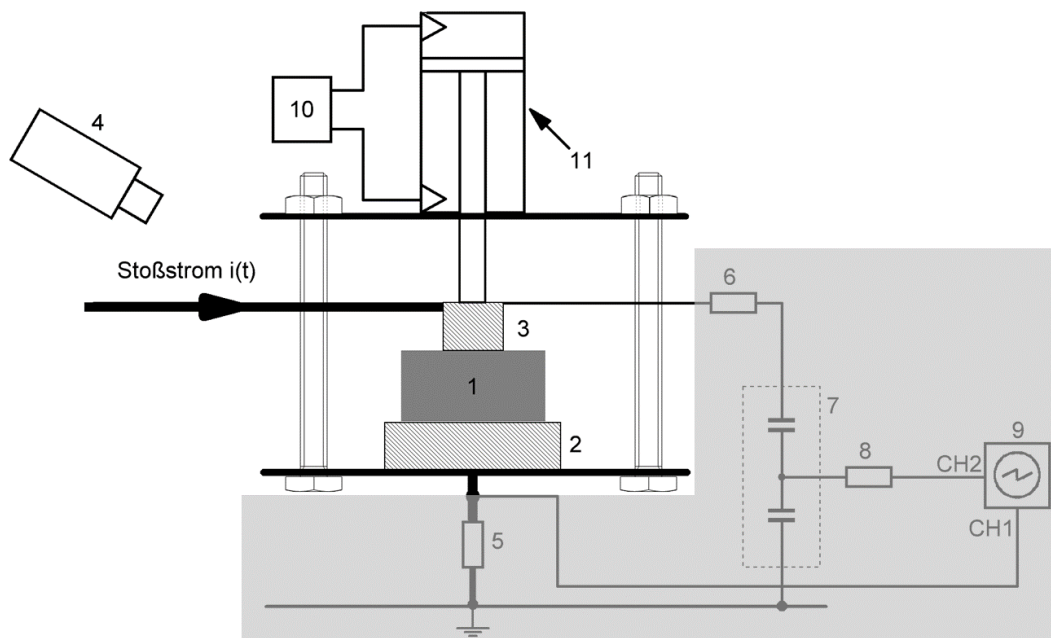


Bild 4-1: Messkonzept für die Untersuchungen der Stromaufteilung durch das Ableitervolumen

- (1) Metalloxid-Ableiterscheibe
- (2) Kontaktelektrode mit einem Durchmesser von 70 mm
- (3) Kontaktelektrode mit einem Durchmesser von 25 mm
- (4) Optisches Messsystem (FLIR E60)
- (5) Shuntwiderstand R_{sh} mit $5,13 \text{ m}\Omega$ zur Messung des Stoßstromes
- (6) Hochspannungsseitiger Dämpfungswiderstand $R_d = 125 \Omega$
- (7) Kapazitiver Hochspannungsteiler zur Messung der Ableitrestspannung
- (8) Widerstand zur Längsanpassung $R_a = 50 \Omega$
- (9) Oszilloskop DLM 2054 mit Tastkopf 1:10 für den Strom bzw. 1:100 für die Spannung
- (10) Druckluftsteuereinheit
- (11) Druckluftzylinder

In Bild 4-1 wird das Konzept veranschaulicht, welches während der praktischen Temperaturversuche angewendet wurde. Zwischen den beiden Kontaktelektroden, welche mit einer

pneumatischen Haltevorrichtung bewegt werden können, befindet sich die Metalloxid-Ableiterscheibe. Das transiente Messsystem wurde bereits in Kapitel 3 ausführlich erläutert. Die praktischen Versuche zur Erforschung der Stromaufteilung während eines Ableitvorganges basieren auf den bisher getätigten theoretischen Untersuchungen von [13].

4.2 VORUNTERSUCHUNGEN AN METALLOXID-ABLEITERSCHEIBEN

Bei ersten Versuchen bezüglich der transienten Temperaturverteilung wurde eine Metalloxid-Ableiterscheibe vom Typ E80KV342 einer Messung mit einem $8/20 \mu\text{s}$ Stoßstrom unterzogen. Nach jeder Messung wurde die Metalloxid-Ableiterscheibe mit einer Wärmebildkamera vom Typ FLIR E60 betrachtet, um so die Erwärmung der Kontaktfläche nach den einzelnen Messungen zu detektieren.

In Bild 4-2 ist eine Metalloxid-Ableiterscheibe nach der Beanspruchung mit einem Stoßstrom der Amplitude von 10 kA abgebildet. Um die Temperatur der Kontaktfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe mit einem optischen Temperaturmesssystem zu veranschaulichen, war es notwendig, dass die Oberfläche einen gleichmäßigen Emmissionskoeffizient aufweist. Wie in den Bildern zu erkennen, besitzt die unbeschichtete Aluminiumoberfläche der Kontaktfläche einen nicht eindeutigen und ungleichmäßigen Emmissionskoeffizienten, der sich durch Brandspuren, die durch die Messungen mit Stoßstrom entstanden sind, verändert. Dadurch ist es nicht möglich die Temperaturverteilung der Kontaktfläche darzustellen und diese auszuwerten. Daher wird im nun folgenden Abschnitt die Beschichtung der Kontaktfläche des Ableiters und deren Vor- und Nachteile genauer erläutert.

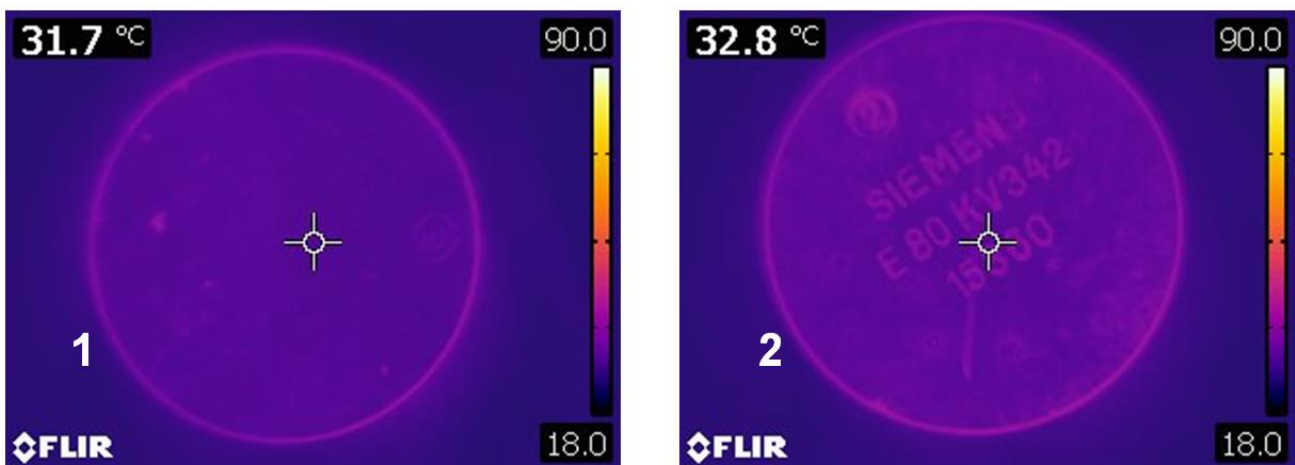


Bild 4-2: Typische Thermobilder der Kontaktflächen einer Metalloxid-Ableiterscheibe vom Typ E80KV342 nach einer Beanspruchung mit einem Stoßstrom von 10 kA

- (1) Untere Kontaktfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe (unbeschichtet)
- (2) Obere Kontaktfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe (unbeschichtet)

Um eine Auswertung der Temperatur zu ermöglichen, wurde versucht, der Kontaktfläche durch eine Beschichtung mit einem geeigneten Material einen gleichmäßigen und eindeutig definierten Emissionskoeffizienten zu verleihen. Als mögliche Beschichtungen der Kontaktflächen wurden zum einen eine Beschichtung mit einer Kohle und zum anderen eine Beschichtung mit einer matten Farbe auf Acrylharzbasis in die nähere Auswahl herangezogen.

Für die Versuche mit den unterschiedlichen Beschichtungsarten wurde zum einen eine obere Elektrode mit einem Durchmesser von 25 mm verwendet und zum anderen eine kugelförmige Elektrode mit einem Durchmesser von ebenfalls 25 mm. Dies hatte den Grund, das thermische Verhalten des Ableiters bei einer nur sehr kleinen Kontaktfläche zu erforschen und so das optische Temperaturmesssystem bezüglich seiner Messeigenschaften zu evaluieren. Durch die nur sehr kleine Kontaktfläche zwischen der oberen Elektrode und der Metalloxid-Ableiterscheibe sollte es zu einem sogenannten „Hot-Spot“ auf der Oberfläche im Bereich der Elektrodenkontaktfläche kommen. Der nun so entstandene „Hot-Spot“ sollte mit Hilfe des optischen Temperaturmesssystems eindeutig detektierbar sein. Im folgenden Abschnitt wird das Verhalten zweier mit einer matten Acrylharzfarbe beschichteten Metalloxid-Ableiterscheiben, welche mit zwei unterschiedlichen Elektrodenformen kontaktiert und mit einem Stoßstrom beansprucht wurden, diskutiert.

Nach der Beanspruchung mit Stoßstrom kam es zu Rissen in der aufgetragenen Beschichtung auf Acrylharzbasis. Der Grund dafür ist die durch den entstehenden Lichtbogen starke Hitzeeinwirkung an der Lichtbogenkontaktfläche von bis zu 2000 °C. Das Entstehen solcher Risse in der Beschichtung verursacht wiederum eine Veränderung des Emissionskoeffizienten an jenen Stellen. Bild 4-3 lässt auf die Ausbreitung der Temperatur über die Kontaktfläche schließen, dabei ist zu erkennen, dass sich die Temperatur ausgehend von der Elektrodenkontaktfläche kreisförmig über die gesamte Kontaktfläche ausbreitete. Bild 4-3 und Bild 4-4 stellen die transiente Temperaturausbreitung bei Verwendung einer kleinen Elektrode mit einem Durchmesser von 25 mm sowie einer Kugelelektrode mit einem Durchmesser von ebenfalls 25 mm dar. Wird die Unterseite der Metalloxid-Ableiterscheiben in Bild 4-4 genauer betrachtet, ist zu erkennen, dass Veränderungen der Beschichtung aus Acrylharzfarbe hauptsächlich am Rand der Metalloxid-Ableiterscheiben auftreten. Der Grund dafür ist der Skin-Effekt, der bedingt durch die hochfrequenten Anteile des Stoßstromimpulses zum Tragen kommt. Vor allem bei der linksseitig gelegenen Metalloxid-Ableiterscheibe in Bild 4-4 ist dieses Verhalten sehr gut anhand der Veränderungen der angebrachten Beschichtung zu erkennen.

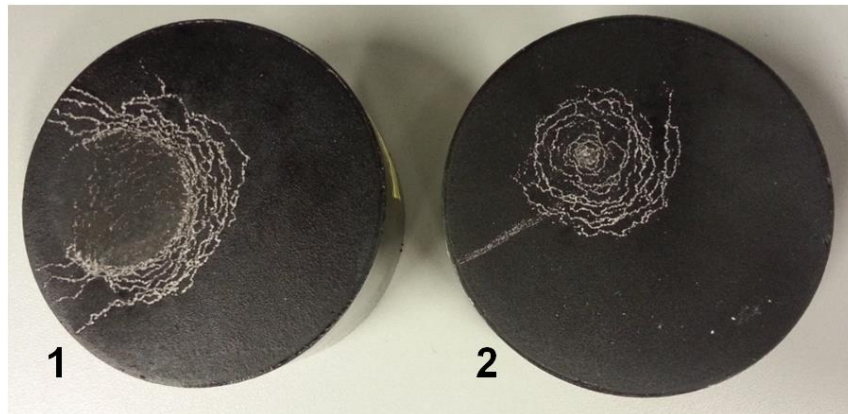


Bild 4-3: Veränderungen der Beschichtung auf Acrylharzbasis einer Metalloxid-Ableiterscheibe

- (1) Oberseite bei Kontaktierung mit einer Elektrode mit einem Durchmesser von 25 mm
- (2) Oberseite bei Kontaktierung mit einer Kugelelektrode mit einem Durchmesser von 25 mm

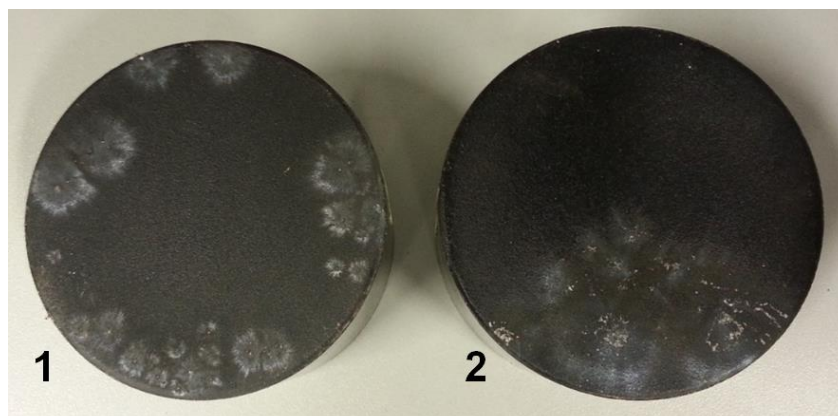


Bild 4-4: Veränderungen der Beschichtung auf Acrylharzbasis einer Metalloxid-Ableiterscheibe

- (1) Unterseite bei Kontaktierung mit einer Elektrode mit einem Durchmesser von 25 mm
- (2) Unterseite bei Kontaktierung mit einer Kugelelektrode mit einem Durchmesser von 25 mm

Mit Hilfe eines Thermovideos, welches während eines transienten Messvorganges aufgezeichnet wurde, konnte das thermische Verhalten einer Metalloxid-Ableiterscheibe beobachtet werden. In Bild 4-5 werden einzelne Momentaufnahmen aus den Aufzeichnungen dargestellt. Das Bild mit der Nummer 1 zeigt die Metalloxid-Ableiterscheibe und die Haltevorrichtung vor der Beanspruchung mit einem Stoßstromimpuls, Bild Nummer 2 stellt die Scheibe im Moment der Stoßstrombeanspruchung dar – die Kontaktfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe hat sich in diesem Augenblick bereits nahezu gleichmäßig erwärmt. Bild Nummer 3 zeigt die Metalloxid-Ableiterscheibe etwa 30 ms und Bild Nummer 4 nach etwa 60 ms nachdem diese vom Stoßstromimpuls durchflossen wurde. Es ist kein „Hot-Spot“ im Bereich der Elektrodenkontaktfläche, der auf einen erhöhten, konzentrierten Stromfluss an der jeweiligen Stelle schließen lässt, zu erkennen.

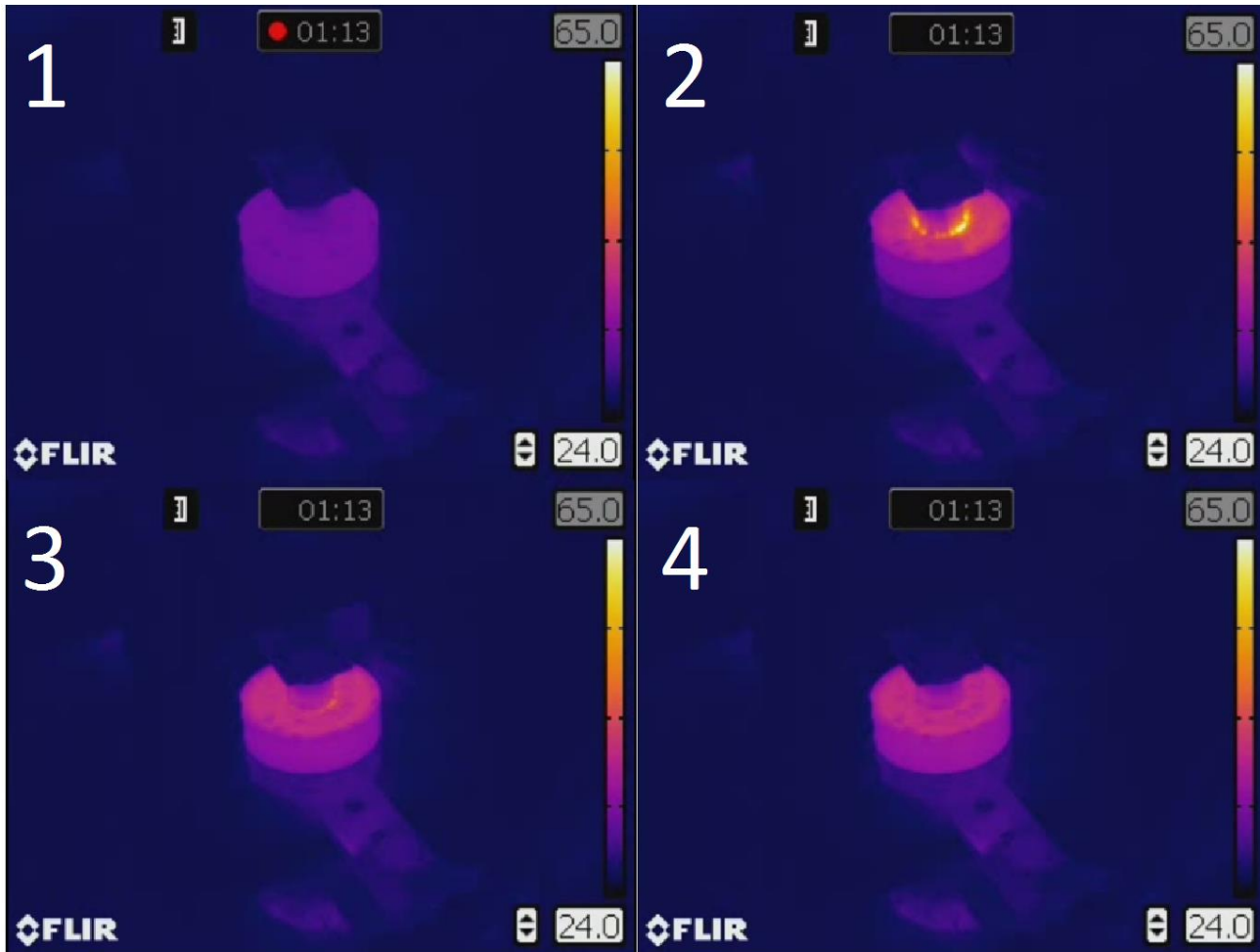


Bild 4-5: Transientes thermisches Verhalten einer Metalloxid-Ableiterscheibe

- (1) Vor der Beanspruchung mit Stoßstrom
- (2) Im Moment der Beanspruchung mit einem Stoßstrom von 21 kA
- (3) 30 ms nach der Beanspruchung mit Stoßstrom
- (4) 60 ms nach der Beanspruchung mit Stoßstrom

Durch die durchgeführten Vorversuche hat sich gezeigt, dass es derzeit keine Methodik bzw. kein Verfahren gibt, die transiente Temperaturverteilung über der Oberfläche der Metalloxid-Ableiterscheibe erfolgreich zu evaluieren. Ein Grund dafür war die zur Verfügung stehende optische Messtechnik, die die transiente Temperaturverteilung nicht darstellen konnte. Ein weiterer Grund ist die Materialbeschaffenheit der Metalloxid-Ableiterscheiben, die sich zu einem großen Teil aus Zinkoxid zusammensetzt. Dieses Material wird aufgrund seiner ausgezeichneten Wärmeleiteigenschaften unter anderen auch in Wärmeleitpasten eingesetzt. Eine Auswertung der transienten Temperaturverteilung ist lediglich durch eine Analyse der Veränderungen an der aufgetragenen Beschichtung auf Acrylharzbasis möglich, welche durch die transiente Erwärmung des Ableitermaterials hervorgerufen werden.

4.3 WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

In dieser Arbeit wurden zahlreiche Versuche mit Metalloxid-Ableiterscheiben durchgeführt und deren thermisches Verhalten beobachtet. Die während dieser Arbeit zur Verfügung stehende optische Messtechnik konnte die transiente Temperaturverteilung nicht darstellen. Zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet der thermischen Analyse von Metalloxid-Ableiterscheiben könnten mit anderen Typen von optischen Messsystemen durchgeführt werden. Dazu ist es auch notwendig, eine geeignete Beschichtungsmethode der Kontaktfläche zu finden, die es ermöglicht, die Metalloxid-Ableiterscheibe mit einem optischen Messsystem zu beobachten. Die Beschichtung muss sowohl für Beanspruchungen thermischer, als auch mechanischer Natur ausgelegt sein.

5 BESCHLEUNIGTE ALTERUNG VON METALLOXID-ABLEITERSCHEIBEN

5.1 BESCHLEUNIGTE THERMISCHE ALTERUNG

5.1.1 Normative Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die praktischen Versuche und Einrichtungen, welche im Rahmen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens durchgeführt bzw. verwendet wurden, erläutert. Als Beanspruchungsmethode der Metalloxid-Ableiterscheiben wurde deren jeweilige maximal zulässige Dauerwechselfspannung U_c mit einer Frequenz von 50 Hz verwendet.

Das beschleunigte thermische Alterungsverfahren wurde dazu entwickelt, die korrigierten Prüfspannungen U_c^* und U_r^* , welche im Rahmen des thermischen Stabilitätstests verwendet werden, zu ermitteln. Der normgerechte Ablauf sieht vor, dass drei Metalloxid-Ableiterscheiben bei einer Spannung von U_{ct} , welche die korrigierte maximal zulässige Dauerwechselfspannung der Metalloxid-Ableiterscheiben darstellt, für 1000 Stunden bei einer Umgebungstemperatur von $115\text{ °C} \pm 4\text{K}$ belastet werden. Alle Materialien, welche während des realen Betriebes im direkten Kontakt mit den Metalloxid-Ableiterscheiben stehen, sollen auch in derselben Bauform, wie sie im Ableitergehäuse verbaut sind, während der beschleunigten Alterung vorhanden sein. Das Umgebungsmedium, welches im Ableitergehäuse verwendet wird, sollte zusätzlich noch während der beschleunigten Alterung vorhanden sein, um auch dessen Alterungsverhalten mit zu berücksichtigen. Die Alterungserscheinungen des Isoliermediums sind unter anderem Teilentladungen, welche die Eigenschaften des Isoliergases mit fortschreitender Alterung negativ beeinflussen können und so zusätzliche Leistungsverluste hervorrufen.

Die korrigierte maximal zulässige Dauerwechselfspannung U_{ct} berechnet sich laut Gleichung 6 und ist jene Spannung, die um den Effekt der Spannungsschiefverteilung in einem kompletten Ableiter korrigiert wurde [4]. Die negativen Auswirkungen auf die einzelnen Metalloxid-Ableiterscheiben bei einer Spannungsschiefverteilung werden in [14] genauer erläutert. Im Laufe der beschleunigten thermischen Alterung muss die an der Metalloxid-Ableiterscheibe auftretende Verlustleistung alle 100 h gemessen werden. Ist die bei einer gesamten Alterungsdauer von 1000 h gemessene Verlustleistung höher als die minimal gemessene Verlustleistung, so müssen die Bemessungsspannung U_r^* , als auch die max. zulässige Dauerwechselfspannung U_c^* für die weiteren Tests wie zum Beispiel der Arbeitsprüfung nach oben korrigiert werden [4]. Die Berechnung dieser korrigierten Werte ist in der zugehörigen IEC-Norm [5] angeführt.

Die korrigierte maximal zulässige Dauerwechselspannung U_{ct} berechnet sich laut folgender Formel:

$$U_{ct} = U_c \cdot (1 + 0,15 \cdot H) \quad (6)$$

H beschreibt die Höhe des gesamten Ableiters in Meter [5]

Im Rahmen des beschleunigten Alterungsverfahrens dieser Masterarbeit wurden zwei fabrikneue, noch nicht mit Stoßstrom beanspruchte, Metalloxid-Ableiterscheiben desselben Typs für die beschleunigten thermischen Alterungsversuche verwendet. Als Umgebungsmedium wurde, anstatt wie in der IEC Norm gefordert, ausschließlich Luft verwendet, um so nur das Alterungsverhalten der Metalloxid-Ableiterscheiben und nicht des umgebenden Mediums zu untersuchen. Da es sich um Metalloxid-Ableiterscheiben für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen, welche eine geringe Bauhöhe (< 1 m) aufweisen, handelte, konnte eine Schiefverteilung der Belastung bei solch kleinen Bauhöhen vernachlässigt werden. Daher entsprach die korrigierte maximal zulässige Dauerwechselspannung U_{ct} gleich der maximal zulässigen Dauerwechselspannung U_c . Der verwendete Wärmeschrank hatte die Eigenschaft die Temperatur im Innenraum auf einen Wert von $115 \text{ °C} \pm 0,4 \text{ K}$ konstant zu halten. Alle Messungen der elektrischen Parameter fanden bei einer Temperatur von 115 °C mit einer maximalen Abweichung von $\pm 1 \text{ K}$ statt. Mehr Informationen zur Messung der elektrischen Parameter sowie zum verwendeten Messaufbau sind im späteren Verlauf dieses Kapitels genau angeführt.

5.1.2 Konstruktion eines Prüfstandes zur beschleunigten thermischen Alterung

Um die von der IEC Norm geforderten Rahmenbedingungen bezüglich des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens zu erfüllen, musste ein geeigneter Prüfstand konstruiert, aufgebaut und anschließend in Betrieb genommen werden.

Folgende technische Eigenschaften musste dieser thermische Alterungsprüfstand aufweisen:

- Eine Schutzeinrichtung, welche den Strom im Fehlerfall begrenzt als auch den Transformator vor einer Überlastung durch einen versagenden Prüfling sicher schützt.
- Die Möglichkeit, die Spannung während des gesamten beschleunigten Alterungsverfahrens aufzuzeichnen und auch die Eigenschaft bei einer Unterbrechung der Energieversorgung für einen bestimmten Zeitraum noch Messpunkte der Spannung aufzunehmen.

In Bild 5-1 und Bild 5-2 werden die einzelnen Baugruppen des thermischen Alterungsprüfstandes abgebildet und anschließend deren funktionale Eigenschaften erläutert.

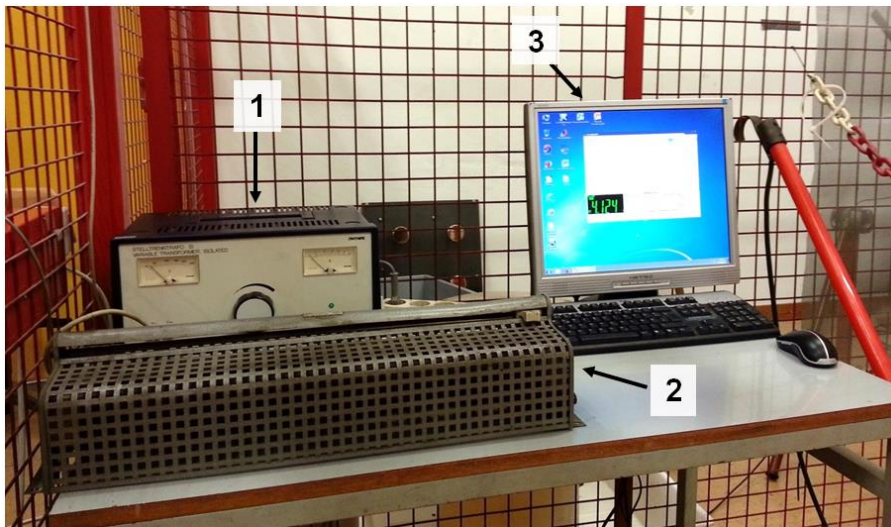


Bild 5-1: Bedienpult des Alterungsprüfstandes

- (1) PHYWE Stelltransformator 380 VA
- (2) Einstellbarer Prüf Widerstand mit max. 400 Ω
- (3) System zur Aufzeichnung der Spannung

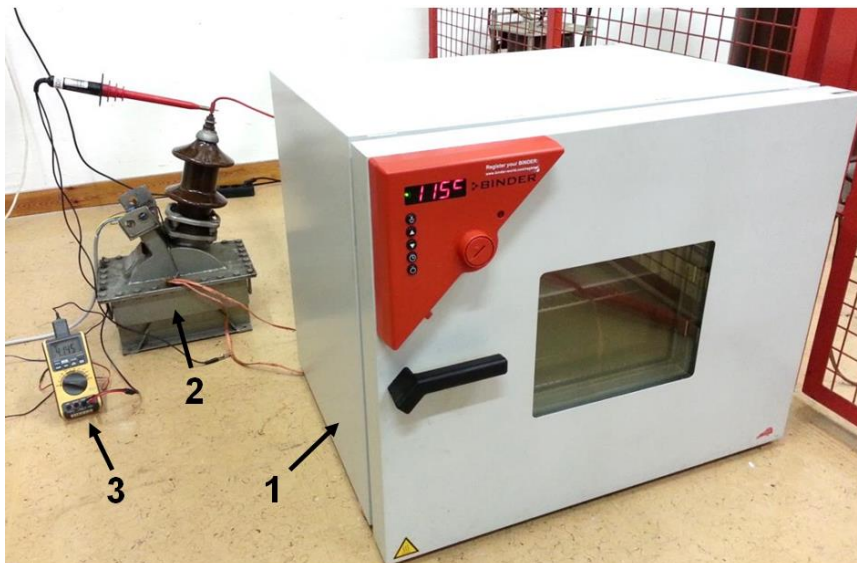


Bild 5-2: Baugruppen des thermischen Alterungsprüfstandes

- (1) Wärmeschrank Binder FD115 E2
- (2) Hochspannungstransformator Dipl.-Ing. Huemer & Ziegeler
- (3) Vielfachmessgerät V&A VA18B mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung

Mit Hilfe des Hochspannungstransformators lassen sich Spannungen von bis zu 11,5 kV generieren. Die Primärspannung des Hochspannungstransformators darf maximal 57,7 V betragen und wird über den Stelltransformator, welcher sich am Bedienpult (Bild 5-1) befindet, eingestellt. Der Stelltransformator muss unter Zuhilfenahme des im Bild davor befindlichen Prüf Widerstandes eingeschaltet werden, da es ansonsten durch den erhöhten Einschaltstrom zu einem Ansprechen des Leitungsschutzes kommen kann. Die Aufzeichnung der Hochspannung während des beschleunigten Alterungsverfahrens wurde mit einem Voltcraft HVP-40 Hochspannungstastkopf und einem Vielfachmessgerät vom Typ VA18B, welches über eine USB Schnittstelle mit dem Computer verbunden war, durchgeführt. Die Eigenschaften der verwendeten Messeinrichtungen werden im Anhang E aufgelistet. Der Computer als auch das Vielfachmessgerät war an eine USV - Einrichtung angeschlossen, die es ermöglicht, die Messsysteme für die Dauer von etwa 30 min während einer Unterbrechung der Energieversorgung weiterzubetreiben.

5.1.3 Mechanischer Aufbau des beschleunigten Alterungsversuches

Bild 5-3 zeigt den mechanischen Aufbau, welcher für das beschleunigte thermische Alterungsverfahren der Metalloxid-Ableiterscheiben verwendet wurde.

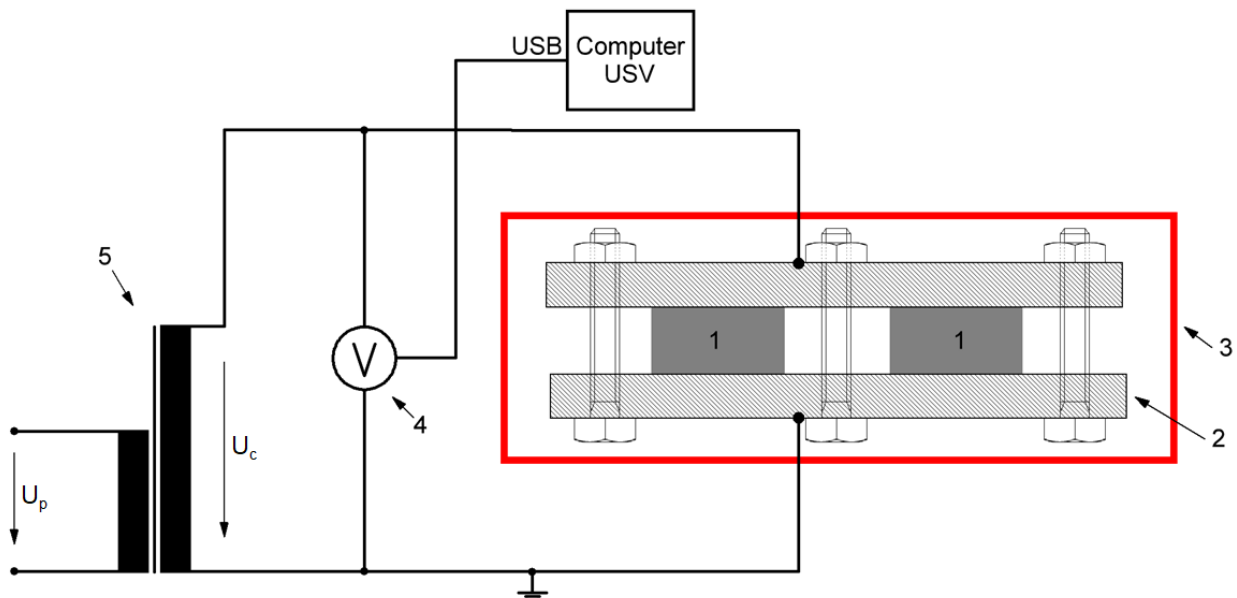


Bild 5-3: Aufbau zur beschleunigten Alterung der Metalloxid-Ableiterscheiben nach IEC-60099-4

- (1) Zu alternde Metalloxid-Ableiterscheiben
- (2) Haltevorrichtung und Kontaktelektrode
- (3) Wärmeschrank Binder FD115 E2 mit einer Innentemperatur von 115 °C
- (4) Vielfachmessgerät V&A VA18B mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung
- (5) Hochspannungstransformator Dipl.-Ing. Huemer & Ziegeler

Die im Rahmen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens zu alternden Metalloxid-Ableiterscheiben befanden sich zwischen zwei Aluminiumelektroden in einem Wärmeschrank mit einer Innentemperatur von 115 °C. In Bild 5-4 ist der mechanische Aufbau, welcher sich innerhalb des Wärmeschanks befindet, abgebildet.

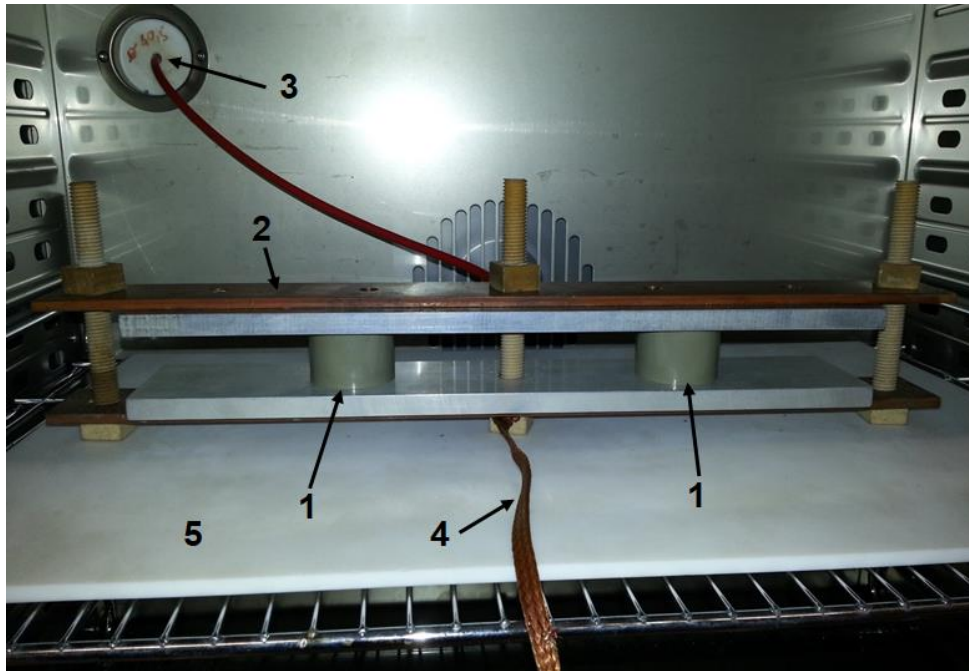


Bild 5-4: Innenraum des Wärmeschanks Binder FD115 E2 mit Metalloxid-Ableiterscheiben

- (1) Metalloxid-Ableiterscheibe 1 und 2
- (2) Haltevorrichtung für die Metalloxid-Ableiterscheiben
- (3) Einleitung der Hochspannung
- (4) Erdungsverbindung
- (5) Teflonplatte zur elektrischen Isolation

Wie in Bild 5-4 zu erkennen, befinden sich die zu alternden Metalloxid-Ableiterscheiben in einer eigens gefertigten Haltevorrichtung, welche es ermöglicht, die zu alternden Metalloxid-Ableiterscheiben mit den Schraubvorrichtungen fest in der Haltevorrichtung zu fixieren. Durch diese Schraubvorrichtungen wird sichergestellt, dass ein ausreichend guter elektrischer Kontakt hergestellt wird. Der Wärmeschrank hatte die bauliche Eigenschaft einer Öffnung in der Rückwand, welche die Einleitung der Hochspannung mit einer geeigneten Teflondurchführung und einem hochspannungstauglichen Kabel erlaubte. Die gesamte Haltevorrichtung wurde elektrisch isoliert gegenüber dem auf Erdpotential liegenden Wärmeschrank auf einer Teflonplatte platziert.

5.1.4 Iterative Messungen während des beschl. thermischen Alterungsverfahrens

Um den Alterungsprozess nachvollziehen bzw. veranschaulichen zu können, wurden in regelmäßigen Abständen einige elektrische Parameter der Metalloxid-Ableiterscheiben aufgenommen. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfverfahren, wie es in Bild 5-7 dargestellt ist, definiert. Das Verfahren gliedert sich in eine Vormessung, die eigentlichen Messungen während des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens sowie einer finalen Messung am Ende. Als Maß für die Alterung wurden der Leckstrom i_c , welcher beim Anliegen der bei maximal zulässigen Dauerwechselspannung U_c durch die Metalloxid-Ableiterscheibe fließt herangezogen. Der Leckstrom, welcher einen vorwiegend kapazitiven Charakter aufweist, stellt ein Maß für die Verluste dar, welche an der Metalloxid-Ableiterscheibe im Dauerbetrieb auftreten. Die an der Metalloxid-Ableiterscheibe auftretenden ohmschen Verluste können durch eine Multiplikation von Strom und Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe und anschließender Integration rechnerisch bestimmt werden. Zusätzlich wurden noch bestimmte Spannungen an der Metalloxid-Ableiterscheibe gemessen, welche beim Fließen eines bestimmten Stromes an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallen. Folgend werden die im Rahmen der elektrischen Messungen aufgenommenen Parameter aufgelistet und erläutert.

U_c	Maximal zulässige Dauerwechselspannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe
i_c	Leckstrom, welcher bei Anliegen der maximal zulässigen Dauerwechselspannung durch die Metalloxid-Ableiterscheibe fließt
$U_{(1\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 1 mA anliegt
$U_{(2\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 2 mA anliegt
$U_{(5\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 5 mA anliegt
$U_{(10\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 10 mA anliegt
$U_{(20\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 20 mA anliegt

Laut IEC Norm war es notwendig, die elektrischen Messungen alle 100 h unter denselben Umgebungsbedingungen zu wiederholen. Da das beschleunigte thermische Alterungsverfahren in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 115 °C durchgeführt wurde, fanden die elektrischen Parametermessungen auch in diesem unter derselben Umgebungstemperatur statt. Die zu alternden Metalloxid-Ableiterscheiben wurden stets in derselben Reihenfolge gemessen. Nach dem korrekten Fixieren der zu messenden Metalloxid-Ableiterscheibe in der Haltevorrichtung musste darauf geachtet werden, dass die Innentemperatur des Wärmeschranks wieder auf einen Wert von 115 °C gestiegen ist, ehe mit den elektrischen Messungen begonnen wurde. Die aktuelle Innentemperatur konnte vom Display des Wärmeschranks abgelesen werden. Anschließend wurde mit der Messung des Leckstromes i_c bei anliegender maximaler Dauerwechselfspannung U_c begonnen, danach wurden die weiteren bereits vorgestellten Parameter messtechnisch bestimmt. Zusätzlich zu den geforderten 100 h-Intervallen wurden am Beginn des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens noch weitere Messungen durchgeführt, um eventuelle Auffälligkeiten am Beginn zu erkennen. Bild 5-5 zeigt den mechanischen Messaufbau, welcher dazu eingesetzt wurde.

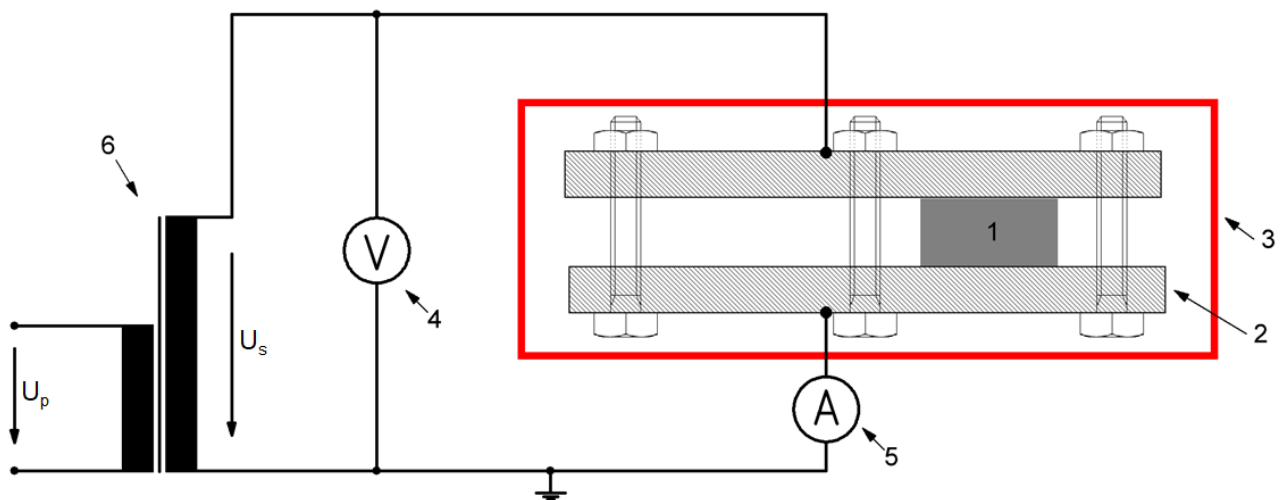


Bild 5-5: Messaufbau zur Bestimmung der elektrischen Parameter

- (1) Zu messende Metalloxid-Ableiterscheibe
- (2) Haltevorrichtung und Kontaktelektrode
- (3) Wärmeschrank Binder FD115 E2 mit einer Innentemperatur von 115 °C
- (4) Vielfachmessgerät V&A VA18B mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung
- (5) Vielfachmessgerät Fluke 89-IV zur Messung des Stromes
- (6) Hochspannungstransformator Dipl.-Ing. Huemer & Ziegeler

Die Messung erfolgte unter Zuhilfenahme von zwei Vielfachmessgeräten, welche als Voltmeter bzw. Amperemeter in die Schaltung integriert wurden. Die Eigenschaften und Spezifikationen der verwendeten Messeinrichtungen werden im Anhang E aufgelistet. Die Hochspannung U_s wurde

durch einen Stelltransformator, welcher zum Einstellen von U_p verwendet wurde auf die gewünschten Sollwerte eingestellt.

Der konstruktive Aufbau ist in Bild 5-6 dargestellt, die Türe wurde, nachdem die zu messende Metalloxid-Ableiterscheibe fest in der mechanischen Haltevorrichtung verspannt worden ist, geschlossen und anschließend dem Wärmeschrank genügend Zeit gegeben, den Innenraum wieder auf eine Temperatur von 115 °C zu erwärmen.

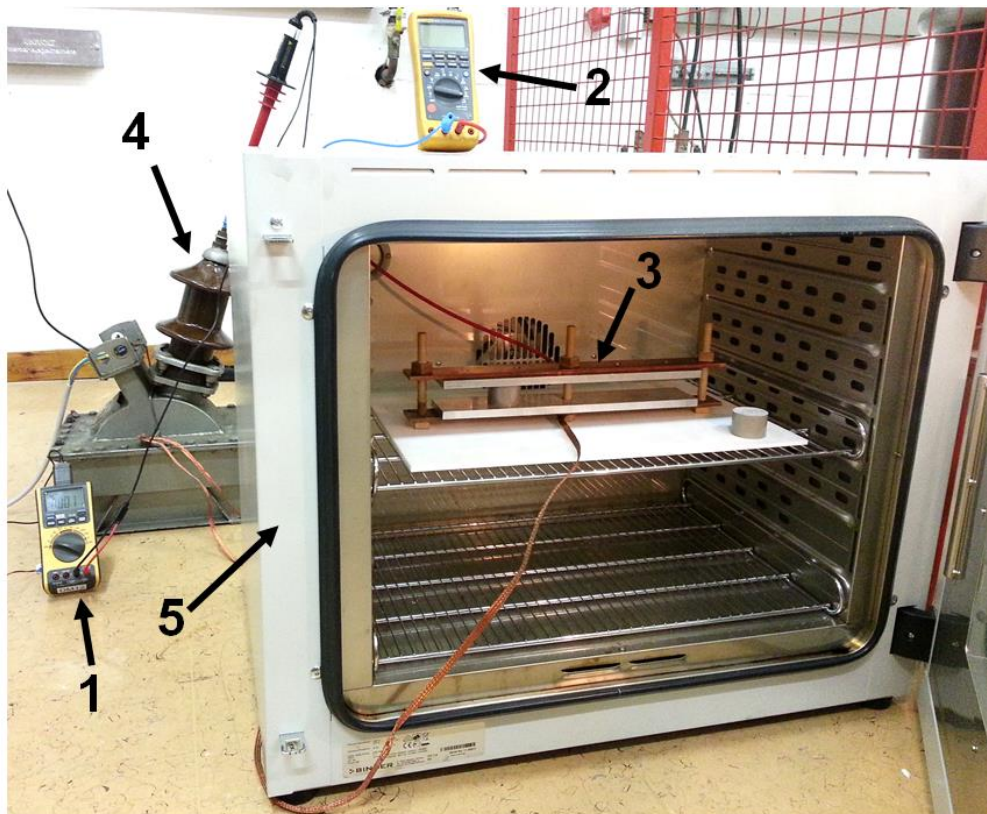


Bild 5-6: Konstruktiver Aufbau für die elektrischen Parametermessungen im Rahmen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens

- (1) Vielfachmessgerät V&A VA18B mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung
- (2) Vielfachmessgerät Fluke 89-IV zur Messung des Stromes
- (3) Haltevorrichtung mit zu messender Metalloxid-Ableiterscheibe
- (4) Hochspannungstransformator Dipl.-Ing. Huemer & Ziegeler
- (5) Wärmeschrank Binder FD115 E2 mit einer Innentemperatur von 115 °C

5.1.5 Ablauf des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens

Die Vorgehensweise und die einzelnen Arbeitsschritte sind in Bild 5-7 grafisch dargestellt.

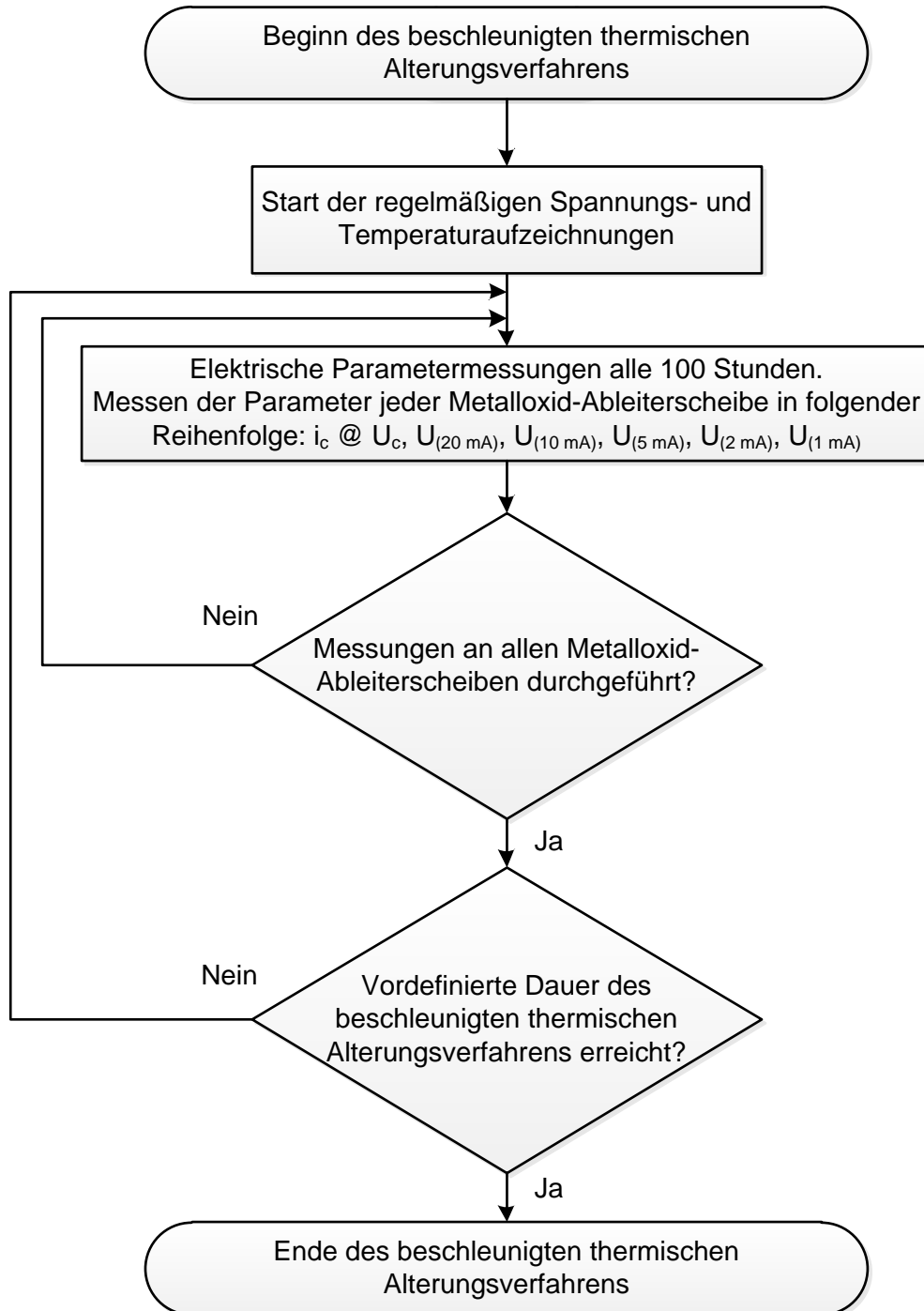


Bild 5-7: Ablauf des thermischen Alterungsverfahrens

5.1.6 Verlauf der Hochspannung während der gesamten Alterungsdauer

Um eine Aussage über die während des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens an den Metalloxid-Ableiterscheiben anliegende Hochspannung geben zu können, wurde der Augenblickswert dieser Spannung minütlich während der Dauer der gesamten Alterungsdauer aufgezeichnet. Dazu wurde ein Messcomputer mit einer geeigneten Software verwendet. Zur Messung der Spannung wurde ein Vielfachmessgerät vom Typ V&A VA18B, welches eine optische Schnittstelle mit einem dazu passenden USB-Wandler aufwies und ein Hochspannungstastkopf vom Typ Voltcraft HVP-40 verwendet. Durch diese technische Eigenschaft des thermischen Alterungsprüfstandes ist es möglich, die Dauer einer eventuellen Unterbrechung der Energieversorgung zu detektieren und diese in der Alterungsdauer zu berücksichtigen. Der zeitliche Verlauf der Hochspannung während der 1000 Stunden, die der beschleunigte thermische Alterungsversuch in Anspruch nahm, ist in Bild 5-8 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass es zu keinerlei Unterbrechungen der Energieversorgung gekommen ist. Durchschnittlich lag eine Hochspannung von 4,14 kV an den Klemmen der Haltevorrichtung an, das Minimum der Hochspannung betrug 3,98 kV und das Maximum lag während des gesamten Zeitraumes bei 4,23 kV. Das ergibt eine Abweichung in Prozentwerten von 4,0 % negativ bzw. 2,13 % positiv.

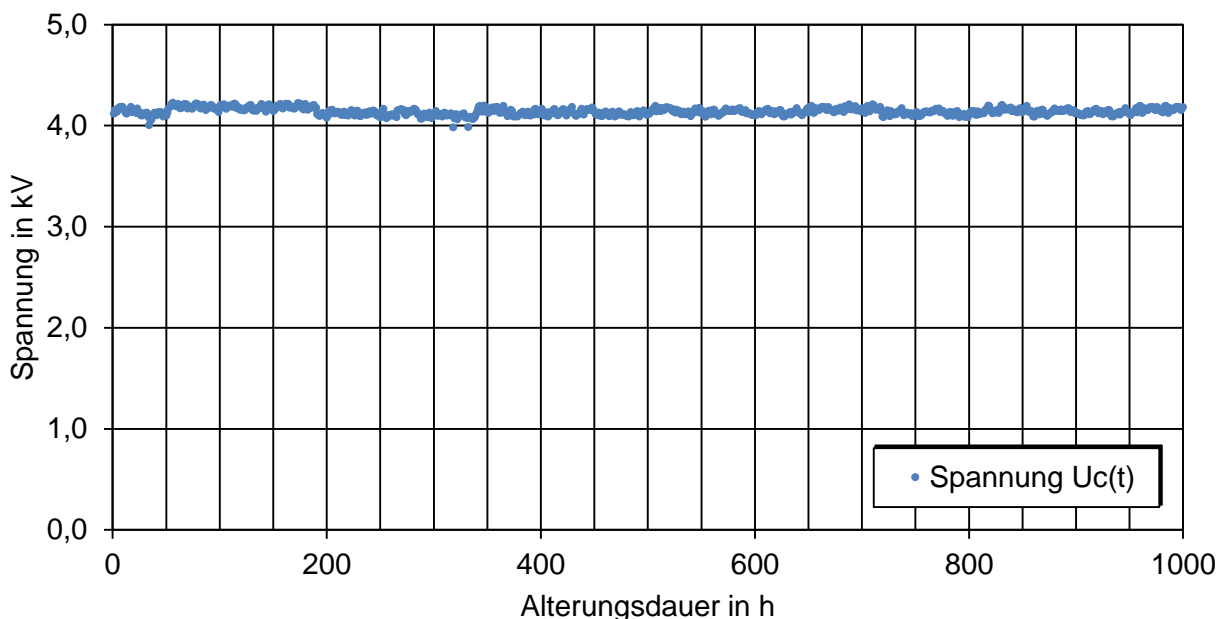


Bild 5-8: Zeitlicher Verlauf der Hochspannung während der beschleunigten thermischen Alterung

5.1.7 Umgebungsbedingungen im Wärmeschrank

Der verwendete Wärmeschrank war ein Produkt der Firma Binder mit der Typenbezeichnung FD115 E2. Dieser hatte ein Innenraumvolumen von 115 Liter und die Eigenschaft, die eingestellte Temperatur auf den Sollwert mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,4$ K konstant zu halten. Eingestellt wurde eine Solltemperatur von 115 °C. Die aktuelle Temperatur wurde zwei Mal täglich vom Display des Wärmeschranks abgelesen und in eine Liste zur späteren Dokumentation und Analyse eingetragen. Die Auswertung dieser Aufzeichnungen hat ergeben, dass die Temperatur während aller Temperatureaufzeichnungen auf einem konstanten Wert in der Höhe von 115 °C lag, also bei einer Abweichung von 0 % vom eingestellten Sollwert. Bild 5-9 stellt den Verlauf der Temperatur während der gesamten Dauer des beschleunigten Alterungsversuches dar.

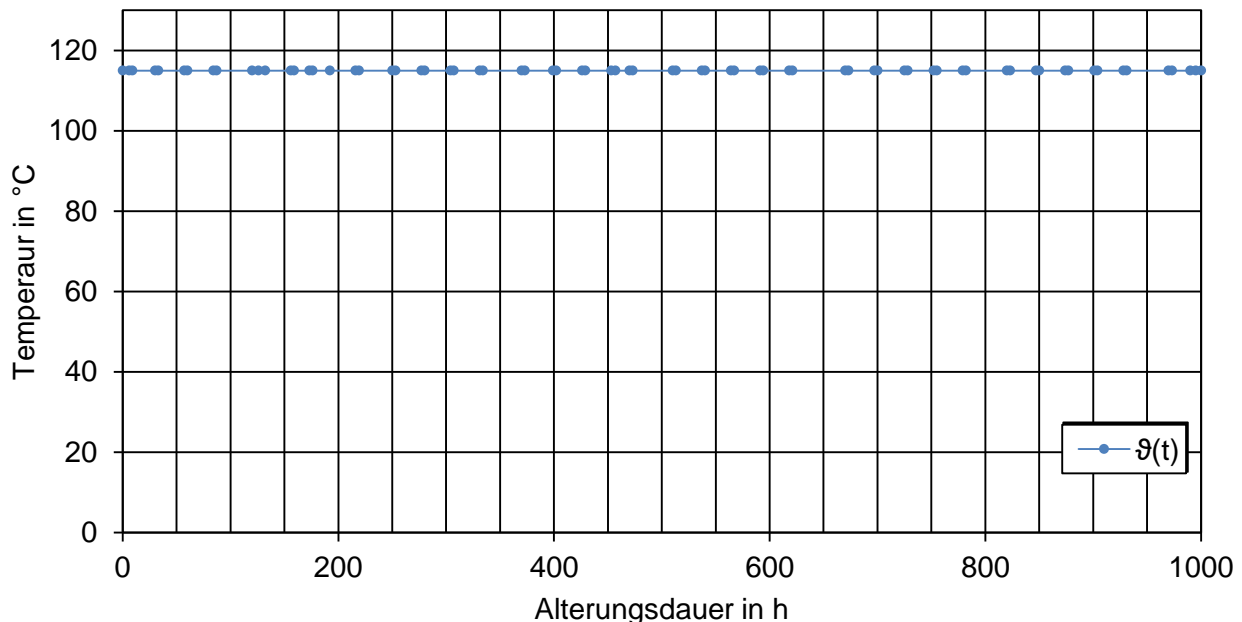


Bild 5-9: Messpunkte der Temperatur im Laufe der gesamten Alterungsdauer

Die Luftfeuchte im Wärmeschrank wurde während der beschleunigten thermischen Alterung nicht aufgenommen, da die vorhandene Messtechnik die Luftfeuchte bei den im Wärmeschrank vorherrschenden Temperaturen nicht aufzeichnen konnte. Nach Beendigung des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens wurde eine experimentelle Luftfeuchtemessung mit mehreren Luftfeuchtemessgeräten durchgeführt. Hierfür wurden insgesamt drei unterschiedliche Messinstrumente verwendet, welche unterschiedliche maximale Betriebstemperaturen aufwiesen. Gemessen wurde mit einem Messsystem des Herstellers VAISALA vom Typ HMT 333, welches bei Umgebungstemperaturen bis maximal 80 °C betrieben werden konnte, einem Luftfeuchtemessgerät des Herstellers

EXTECH vom Typ 445703, welches für Temperaturen bis 60 °C geeignet war, und einem klassischen Hygrometer, welches ebenfalls für Temperaturen bis 60 °C geeignet war. Es wurden Messungen in einem Temperaturbereich von 30 °C bis 80 °C durchgeführt, dabei wurde die Temperatur der Messpunkte ausgehend von 30 °C schrittweise um jeweils 10 K erhöht. Bei Erreichen der maximalen Betriebstemperatur wurde das jeweilige Messgerät aus dem Versuchsaufbau entfernt, um so eine Beschädigung zu vermeiden. In Bild 5-10 sind die Messwerte der einzelnen Messgeräte bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Da von einer gewissen Linearität über den gesamten Temperaturbereich der Luftfeuchtemessgeräte ausgegangen werden kann, kann die relative Luftfeuchte im Wärmeschrank bei einer Temperatur von 115 °C mit einem Wert kleiner als 10 % beziffert werden. Es herrschen also sehr trockene Umgebungsbedingungen im Innenraum des verwendeten Wärmeschrankes vor. Weitere thermische Alterungsversuche könnten den Einfluss unterschiedlicher Luftfeuchten auf die Alterung des Ableitermaterials und dessen elektrische Parameter untersuchen.

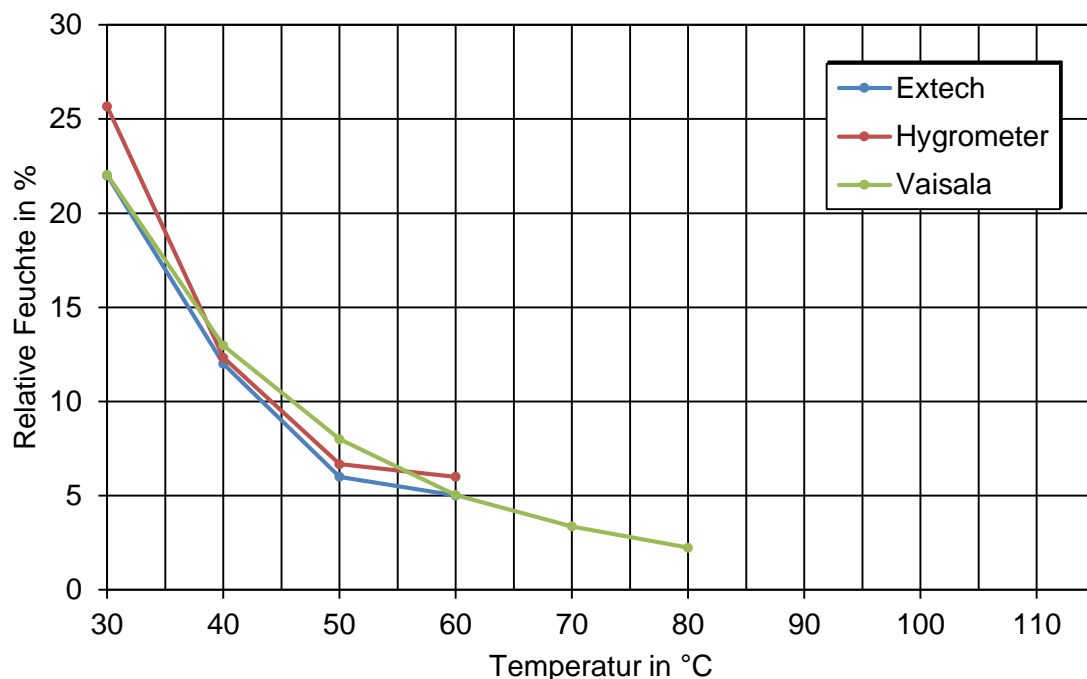


Bild 5-10: Verlauf der rel. Luftfeuchte im Wärmeschrank Binder FD115 E2 mit steig. Temperatur

5.1.8 Ergebnisse der beschleunigten thermischen Alterung

Die Bilder 5-11 bis 5-13 zeigen das Verhalten der elektrischen Parameter während der gesamten Alterungsdauer. Um eine Vergleichbarkeit zwischen dem im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten „Impulse-Ageing“ zu ermöglichen, wurden alle Messwerte auf den jeweils ersten Messwert

der Reihe bezogen. Diese Maßnahme ist nötig, da die elektrischen Parameter der Metalloxid-Ableiterscheiben eine starke Temperaturabhängigkeit aufweisen und die Messungen beim „Impulse-Ageing“ unter anderen Umgebungstemperaturen durchgeführt wurden. In diesem Kapitel wird allerdings nur eine kleine Auswahl an Diagrammen präsentiert, der Verlauf aller elektrischen Parameter während der gesamten Alterungsdauer wird in Anhang C dargestellt.

Bild 5-11 zeigt den Verlauf des Leckstromes, welcher durch die Metalloxid-Ableiterscheiben bei Anliegen der maximal zulässigen Dauerwechselfspannung U_c fließt. Der Leckstrom ist ein Maß für die im Sperrbereich der Metalloxid-Ableiterscheibe umgesetzten Verluste. Dabei ist zu beachten, dass sich der Leckstrom nicht wie laut dem Arrhenius-Gesetz angenommen während der gesamten Alterungsdauer steigert, sondern kontinuierlich abnimmt und somit die Eigenschaften der Metalloxid-Ableiterscheiben verbessert. Ein ähnliches Verhalten wurde in experimentellen Untersuchungen von [4] beobachtet. Es handelt sich demnach um ein alterungsbeständiges Material, wie es heutzutage bei der Fertigung von modernen Metalloxid-Ableiterscheiben verwendet wird.

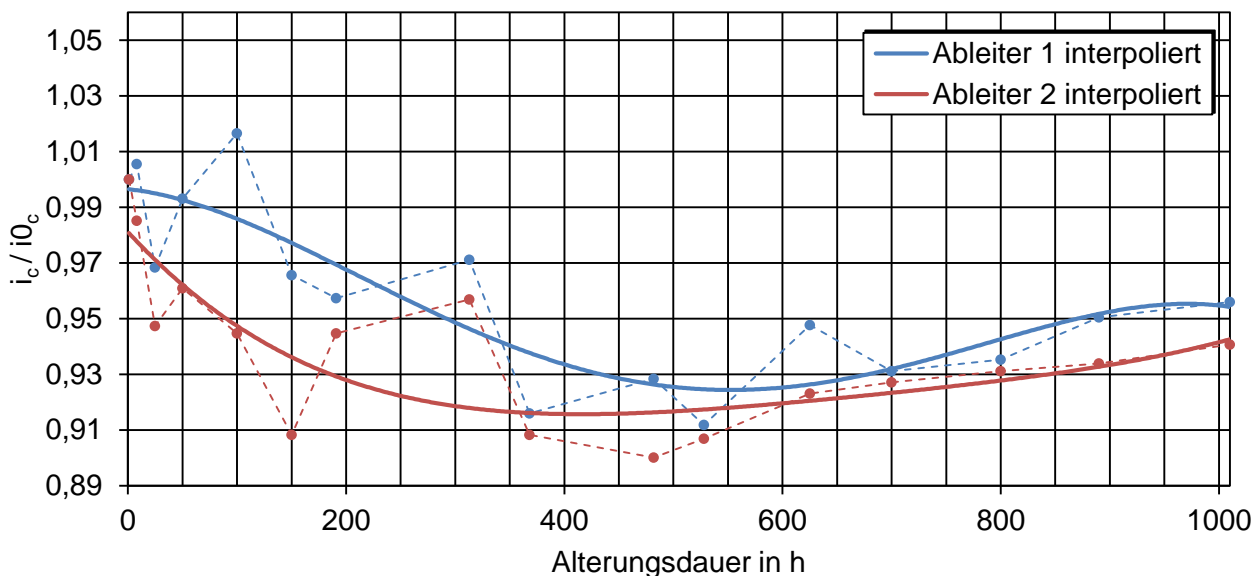


Bild 5-11: Verhalten des Leckstromes i_c durch die Metalloxid-Ableiterscheiben bei Anliegen der Spannung U_c mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert i_{0c}

Ableiter 1 hatte einen durchschnittlichen Leckstrom von 0,70 mA, das Minimum von 0,66 mA wurde nach einer Alterungsdauer von 528 h erreicht und das Maximum, welches nach 100 h gemessen wurde, betrug 0,74 mA. Prozentual gesehen verbesserte sich der auftretende Leckstrom im Vergleich zum ersten Messwert um 9 %. Der durchschnittliche Leckstrom durch Ableiter 2 betrug ebenfalls 0,70 mA, das Minimum lag bei 0,67 mA und wurde nach 482 h erreicht, das Maximum mit

0,74 mA nach 1h. Auch hier stellte sich eine Verbesserung des auftretenden Leckstromes im Vergleich zum ersten Messwert ein, diese lag bei 10 %. Verglichen mit Ableiter 1 hatte Ableiter 2 einen um 0,3 % geringeren durchschnittlichen Leckstrom.

Der Verlauf der Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ zeigt das Verhalten der kapazitiven Anteile der Metalloxid-Ableiterscheiben, da sich dieser bei einem Strom von 1 mA hauptsächlich wie eine Kapazität verhält (Bild 5-12). Dabei zu beachten gilt es, dass für das Treiben eines Stromes von 1 mA mit fortschreitender Alterung eine höhere Spannung nötig ist. Es ist also zu einer Verbesserung im Laufe fortschreitender Alterung dieses elektrischen Parameters gekommen.

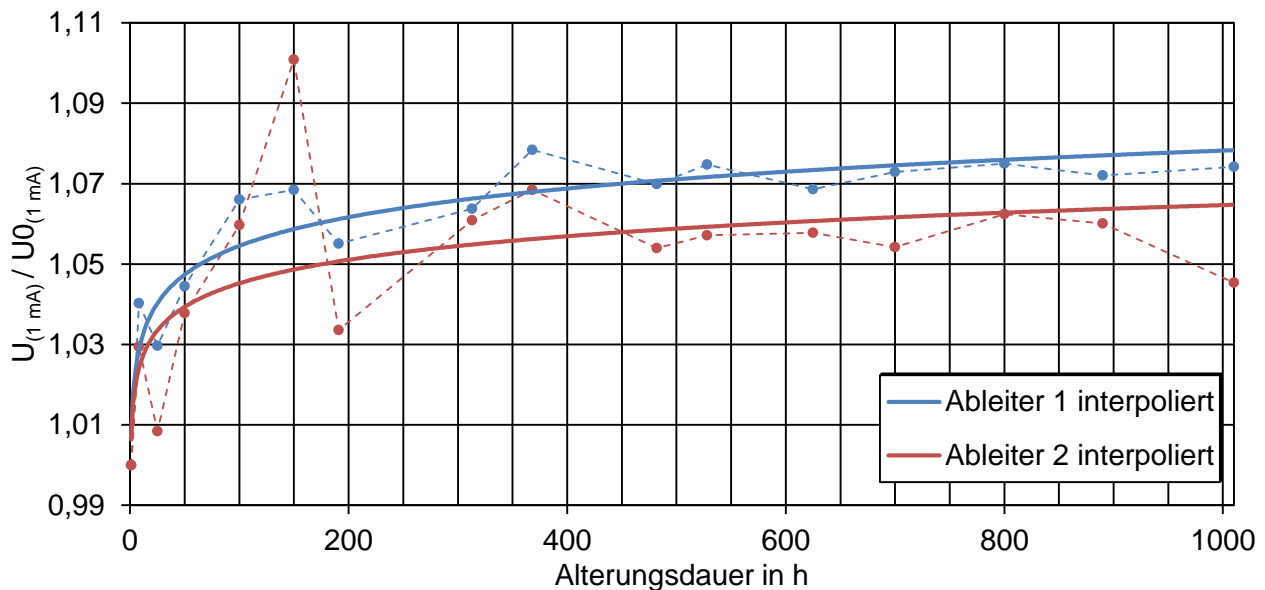


Bild 5-12: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(1\text{ mA})}$

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 1 mA durch Ableiter 1 zu treiben, betrug 5,0 kV. Das Minimum, welches nach 1h erreicht wurde, lag bei 4,72 kV und das Maximum nach 378 h mit 5,09 kV. Prozentual gesehen verbesserte sich dieser Parameter im Vergleich zum ersten Messwert um 8 %. Unter einer Verbesserung wird eine Erhöhung dieser Spannung verstanden.

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 1 mA durch Ableiter 2 zu treiben, betrug ebenfalls 5,0 kV. Das Minimum lag bei 4,76 kV nach einem Zeitraum von 1h und das Maximum nach 150 h bei 5,24 kV. Auch hier stellte sich eine Verbesserung der Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ im Vergleich zum ersten Messwert ein, diese lag bei 10 %. Ableiter 1 und Ableiter 2 hatten eine identische durchschnittliche Spannung $U_{(1\text{ mA})}$.

Die Spannung $U_{(2\text{ mA})}$ stellt die sogenannte Referenzspannung der für die beschleunigte thermische Alterung verwendeten Metalloxid-Ableiterscheiben dar. Bei Anlegen der Referenzspannung fließt der sogenannte Referenzstrom, bei dem sich die ohmsche Komponente des Stromes bereits dominant gegenüber dem kapazitiven Ladestrom verhält. Auch dieser Parameter verbessert sich mit fortschreitender Alterung der Metalloxid-Ableiterscheibe.

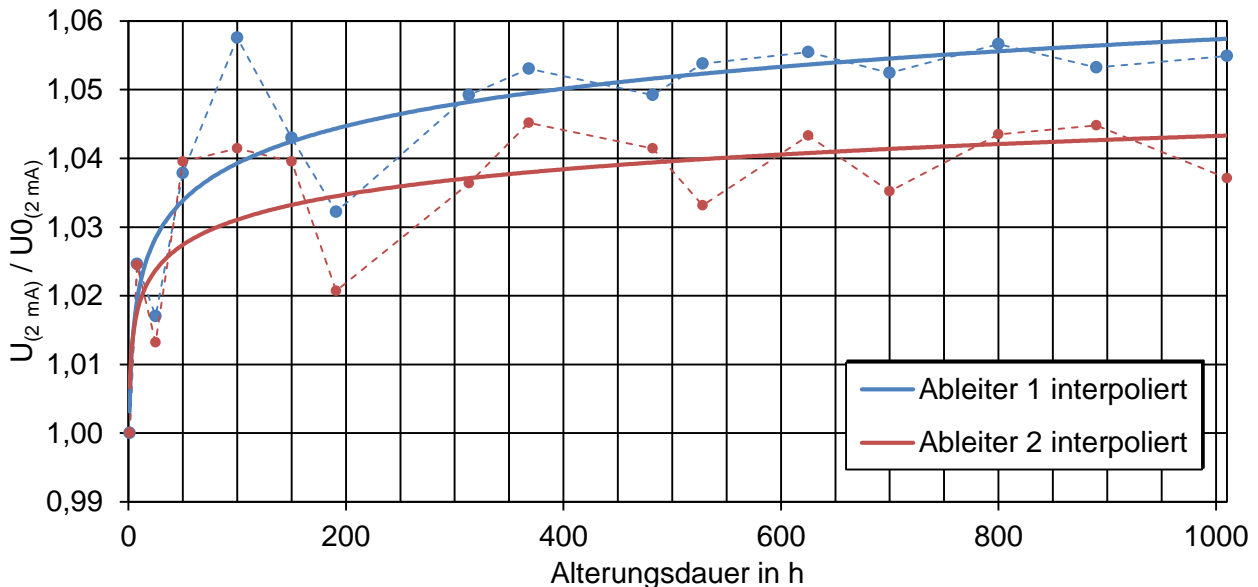


Bild 5-13: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(2\text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(2\text{ mA})}$

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 2 mA durch Ableiter 1 zu treiben, betrug 5,51 kV. Das Minimum, welches nach 1h erreicht wurde, lag bei 5,28 kV und das Maximum nach 100 h mit 5,09 kV. Prozentual gesehen verbesserte sich dieser Parameter im Vergleich zum ersten Messwert um 6 %.

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 2 mA durch Ableiter 2 zu treiben, betrug 5,49 kV. Das Minimum lag bei 5,31 kV nach einem Zeitraum von 1h und das Maximum nach 890 h bei 5,55 kV. Auch hier stellte sich eine Verbesserung der Spannung $U_{(2\text{ mA})}$ im Vergleich zum ersten Messwert ein, diese lag bei rund 4 %. Die durchschnittliche Spannung $U_{(2\text{ mA})}$ an Ableiter 1 und Ableiter 2 unterschied sich nur um etwa 20 V oder prozentual um 0,3 %.

Vor allem in den ersten 100 Stunden zeigt sich bei allen interpolierten Verläufen eine Verbesserung aller Parameter, dies ist womöglich auf Konditionierungseffekte während der ersten Betriebsstunden im Ableitermaterial zurückzuführen [4]. Während der restlichen Alterungsdauer weichen die Parameter nur um zirka 2 % vom Wert, der sich nach der Konditionierung eingestellt hat, ab.

Durch eine Gegenüberstellung aller elektrischen Spannungen, die beim Fließen eines bestimmten Wechselstromes durch die Metalloxid-Ableiterscheiben abfallen, fällt auf, dass sich alle nach demselben Trend ändern, wobei die Änderung der Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ im Vergleich zu den restlichen am signifikantesten ausfällt. Die größte Änderung ist dem Leckstrom i_c widerfahren. Da auch dieser ähnlich wie der Strom in der Größe von 1 mA einen vorwiegend kapazitiven Charakter besitzt, kann davon ausgegangen werden, dass sich die kapazitiven Eigenschaften der Metalloxid-Ableiterscheiben mit fortschreitender Alterung stärker verändern als die ohmschen Eigenschaften.

Werden alle aufgenommenen elektrischen Parameter beider Metalloxid-Ableiterscheiben des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens verglichen, so fällt auf, dass Ableiter 1 über die gesamte Alterungsdauer hinweg etwas bessere Messwerte aufwies als Ableiter 2. Dies ist womöglich auf Schwankungen im Produktionsprozess der Metalloxid-Ableiterscheiben zu erklären. Die Abweichungen der einzelnen Parameter zueinander beider Metalloxid-Ableiterscheiben war allerdings in keinem Fall höher als 3 %.

Die durch die Alterung hervorgerufene Änderung aller elektrischen Parameter allgemein fällt lediglich sehr gering aus. Der Grund dafür ist, dass es sich um moderne, alterungsbeständige Metalloxid-Ableiterscheiben handelt. Würde dasselbe beschleunigte thermische Alterungsverfahren mit Bauelementen älterer Technologien durchgeführt werden, so wäre eine Verschlechterung der elektrischen Parameter mit fortschreitender Alterung zu beobachten gewesen. Folgende Fachliteratur [15] beschäftigt sich mit den Alterungsverhalten von Metalloxid-Ableiterscheiben älterer Technologien.

5.2 ALTERUNG MIT STOßSTROMIMPULSEN - „IMPULSE-AGEING“

Als Alternative zur konventionellen beschleunigten Alterungsmethode wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein weniger zeitintensives Verfahren erprobt, um die Metalloxid-Ableiterscheiben mit Hilfe eines rein elektrischen Verfahrens zu altern. Ähnliche Verfahren wurden in [15], [16] und [17] durchgeführt. Dazu wurde die Metalloxid-Ableiterscheibe durch eine Serie von Stoßstromimpulsen der Form $8/20\ \mu\text{s}$ mit identischen Stoßstromamplituden beansprucht. Eine Serie bestand aus maximal fünf Impulsen, mit denen der Prüfling jeweils im Abstand von zwei Minuten beansprucht wurde. Nach einer Serie von Impulsen und vor dem Beginn der elektrischen Parametermessungen wurde die Metalloxid-Ableiterscheibe unter Zuhilfenahme einer eigens entwickelten Kühleinrichtung für mindestens 15 Minuten wieder auf Umgebungstemperatur abgekühlt.

5.2.1 Mechanische Einrichtungen

Um das „Impulse-Ageing“ durchführen zu können, waren einige Einrichtungen erforderlich. Zur Beanspruchung der Metalloxid-Ableiterscheiben mit Stoßstromimpulsen der Form 8/20 μ s wurde die Stoßstromanlage des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement verwendet. Auf die Eigenschaften und Funktionsweise der Stoßstromanlage wird im Anhang A genauer eingegangen.

Für die Beanspruchung der Metalloxid-Ableiterscheiben war es erforderlich, eine geeignete Aufnahme für die Prüflinge zu verwenden, diese ist in Bild 5-14 dargestellt. Durch diese Aufnahme sollten die Bedingungen für jeden Prüfling und jeden Versuch identisch sein, um möglichst definierte Umgebungsbedingungen garantieren zu können. Daher wurde für die Untersuchungen eine Aufnahme verwendet, die einen pneumatischen Zylinder verfügte. Durch diese Einrichtung war es möglich, die Metalloxid-Ableiterscheiben zwischen zwei Messingelektroden mit konstantem Anpressdruck zu fixieren. Die Aluminiumelektroden hatten eine Dicke von 40 mm und einen Durchmesser von 70 mm. Der Betriebsdruck der Prüflingsaufnahme lag bei jeder Messung bei 8 bar. Somit ergab sich unter Berücksichtigung der geometrischen Abmessungen der Haltevorrichtung ein Anpressdruck von 2,55 N/mm² bei jeder Messung. Dieser Anpressdruck verursacht bei einem Durchmesser der Metalloxid-Ableiterscheibe von 41,5 mm eine Anpresskraft von 3450 N. Diese recht hohe Anpresskraft wird auch im realen Betrieb verwendet und soll zusätzlich ein Abheben der Elektroden bei einem Impuls vermeiden [8]. Um die Aufnahme zu schließen bzw. zu öffnen, war es notwendig, die Druckluftsteuereinheit, welche sich auf der Rückseite der Aufnahme angebracht ist, zu bedienen. Zur Zu- bzw. Abführung des Stoßstromes wurden Kupferbänder verwendet. Da es durch Lichtbogenbildung während der Beanspruchungen zu einem Materialabbrand auf der Elektrodenkontaktfläche gekommen war, wurde nach jedem Wechsel der Metalloxid-Ableiterscheibe die beiden Messingelektroden der Prüflingsaufnahme mit einem feinen Schmirgelpapier abgeschliffen. Durch diese Maßnahme konnte sichergestellt werden, dass ein guter elektrischer Kontakt zwischen der Metalloxid-Ableiterscheibe und der Elektroden bestand.

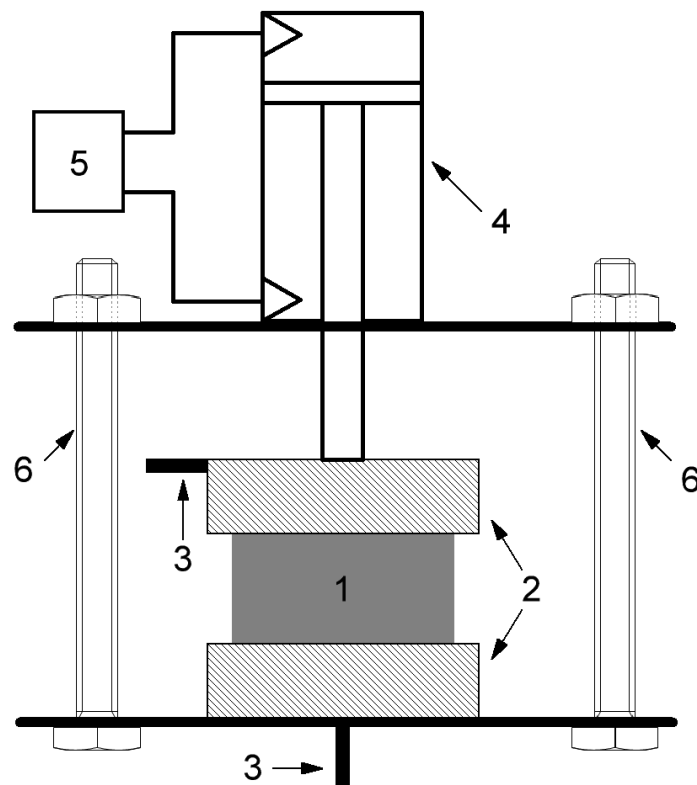


Bild 5-14: Aufnahme für die Metalloxid-Ableiterscheiben

- (1) Metalloxid-Ableiterscheibe
- (2) Kontaktelektroden aus Messing
- (3) Kupferbänder
- (4) Druckluftzylinder
- (5) Druckluftsteuereinheit
- (6) GFK-Gewindestange

Durch die Beanspruchung der Metalloxid-Ableiterscheiben mit Stoßstromimpulsen erwärmten sich diese aufgrund der umgesetzten Verlustleistung. Vor Beginn der regelmäßig durchgeführten elektrischen Parametermessungen mussten die Metalloxid-Ableiterscheiben wieder auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Ohne diese Maßnahme hätte die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Parameter die Messungen beeinflusst. Aus diesem Grund wurde eine Einrichtung entwickelt, die es ermöglichte, die Metalloxid-Ableiterscheiben in kurzer Zeit wieder auf Umgebungstemperatur abzukühlen. Durch diesen Kühlkörper (Bild 5-15) war es möglich, den zeitlichen Abstand zwischen den Beanspruchungen und den Messungen möglichst gering zu halten. Dieser eigens entwickelte Kühlkörper setzt sich aus zwei Aluminiumplatten und drei mechanischen Spannvorrichtungen zusammen. Um die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums (Luft) zu verstärken und dadurch den zum Kühlen notwendigen Zeitraum weiter zu verringern, wurde ein Ventilator verwendet.

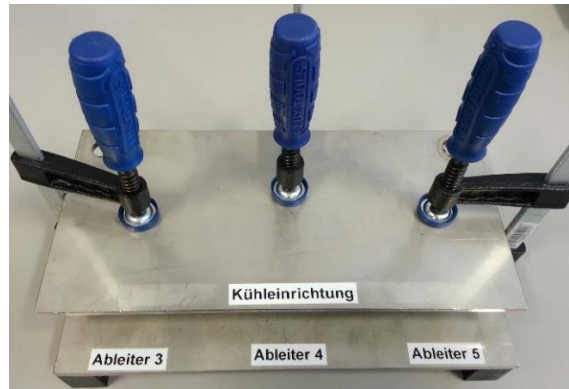


Bild 5-15: Kühlkörper zum Abkühlen der Metalloxid-Ableiterscheiben auf Umgebungstemperatur

- (1) Spannvorrichtungen zur Befestigung der Ableiterscheibe
- (2) Bleche aus Aluminium zum Abführen der Wärme

5.2.2 Iterative Messungen im Rahmen des „Impulse-Ageings“

Die Messung der mit Impulsen beanspruchten Metalloxid-Ableiterscheiben wurde in einem Labor des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Temperaturbereich, in welchem die Messungen stattfanden, möglichst konstant war. Die regelmäßig durchgeführten Messungen wurden laut einem vorher definierten Prüfverfahren, welches in Bild 5-18 und Bild 5-19 grafisch dargestellt ist, durchgeführt. Um einen Vergleich zwischen den beiden beschleunigten Alterungsverfahren, welche im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, zu ermöglichen, wurden dieselben Parameter wie während des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens aufgenommen. Nachfolgend werden diese angeführt und erläutert.

U_c	Maximal zulässige Dauerwechselspannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe
i_c	Leckstrom, welcher bei Anliegen der maximal zulässigen Dauerbetriebsspannung durch die Metalloxid-Ableiterscheibe fließt
$U_{(1\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 1 mA anliegt
$U_{(2\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 2 mA anliegt
$U_{(5\text{ mA})}$	Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 5 mA anliegt

- $U_{(10\text{ mA})}$ Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 10 mA anliegt
- $U_{(20\text{ mA})}$ Spannung an der Metalloxid-Ableiterscheibe, welche beim Fließen eines Wechselstromes von 20 mA anliegt

Bild 5-16 und Bild 5-17 zeigen den Aufbau zur Messung der elektrischen Parameter im Rahmen des „Impulse-Ageing“. Die Umgebungstemperatur während aller Messungen lag immer im Bereich von $22\text{ °C} \pm 0,4\text{ K}$, damit wurden auch die Anforderungen seitens der IEC Norm 60099-4 erfüllt. Um die erzeugte Wärmeenergie, die während der Messung durch auftretende Verlustleistung an der Metalloxid-Ableiterscheibe entstand, abzuführen, wurde die gesamte Prüflingsaufnahme mit einem Ventilator gekühlt. Ohne Kühlung würden diese Messungen wesentlich mehr Zeit in Anspruch nehmen, da der Ableiter nach jedem Messpunkt auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden muss. Wird dies nicht berücksichtigt, würde es durch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Parameter der Metalloxid-Ableiterscheibe zu temperaturbeeinflussten Messergebnissen führen.

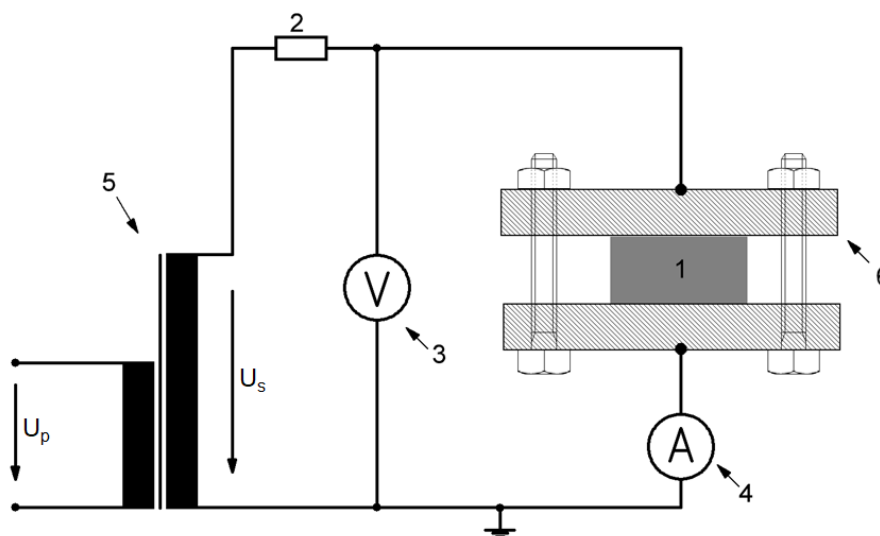


Bild 5-16: Aufbau zur Bestimmung der elektrischen Parameter

- (1) Metalloxid-Ableiterscheibe
- (2) 50 k Ω Schutzwiderstand (Strombegrenzung)
- (3) Vielfachmessgerät Amprobe DM9C mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung
- (4) Vielfachmessgerät Fluke 89-IV zur Messung des Stromes
- (5) Hochspannungstransformator MWB TEO 100/10
- (6) Prüflingsaufnahme

Das folgende Bild zeigt den Messaufbau, welcher zur Bestimmung der elektrischen Parameter im Zuge des „Impulse-Ageings“ verwendet wurde. Um den Fehlerstrom im Falle eines elektrischen Überschlages oder einem Versagen einer Metalloxid-Ableiterscheibe zu begrenzen, wurde ein 50 k Ω Widerstand verwendet. Das Messgerät zur Messung des Stromes hatte die Bezeichnung Fluke 89-IV und wurde auch beim beschleunigten thermischen Alterungsverfahren verwendet, jenes zur Spannungsmessung hatte die Bezeichnung Amprobe DM9C. Die Eigenschaften und Spezifikationen der verwendeten Messeinrichtungen werden im Anhang E aufgelistet. Die zu messende Metalloxid-Ableiterscheibe befindet sich in der Prüflingsaufnahme zwischen den beiden Messingelektroden. Die Spannung wird von außerhalb über ein Regelpult unter Zuhilfenahme des Spannungsmessgerätes auf die gewünschten Werte eingestellt.



Bild 5-17: Messaufbau im Labor

- (1) Prüflingsaufnahme mit Metalloxid-Ableiterscheibe
- (2) Vielfachmessgerät Amprobe DM9C mit Hochspannungstastkopf HVP-40 zur Messung der Spannung
- (3) Vielfachmessgerät Fluke 89-IV zur Messung des Stromes
- (4) 50 k Ω Schutzwiderstand (Strombegrenzung)
- (5) Hochspannungstransformator MWB TEO 100/10

5.2.3 Ablauf des „Impulse-Ageings“

Die Vorgehensweise und der zeitliche Bedarf der einzelnen Schritte ist in Bild 5-18 und in Bild 5-19 grafisch dargestellt.

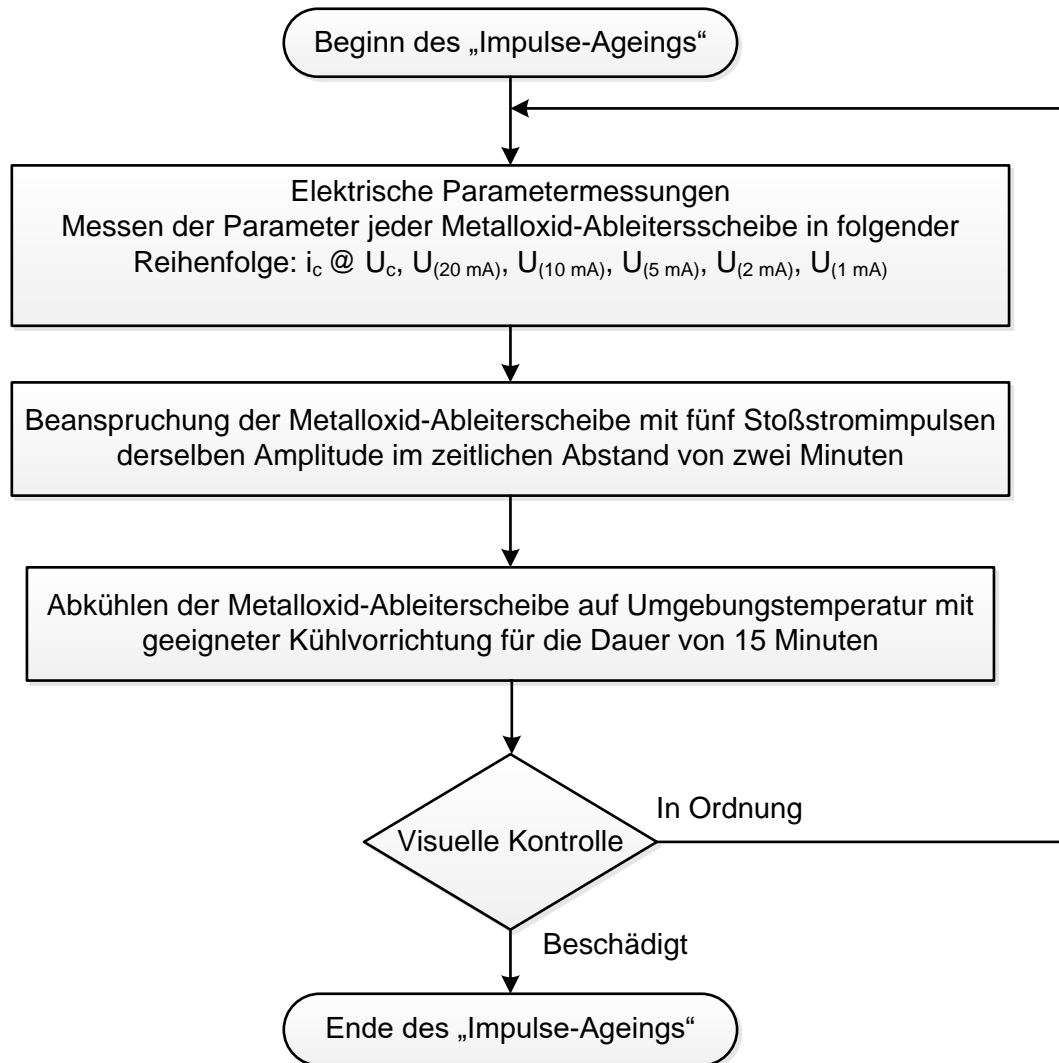


Bild 5-18:Ablaufkonzept des „Impulse-Ageings“

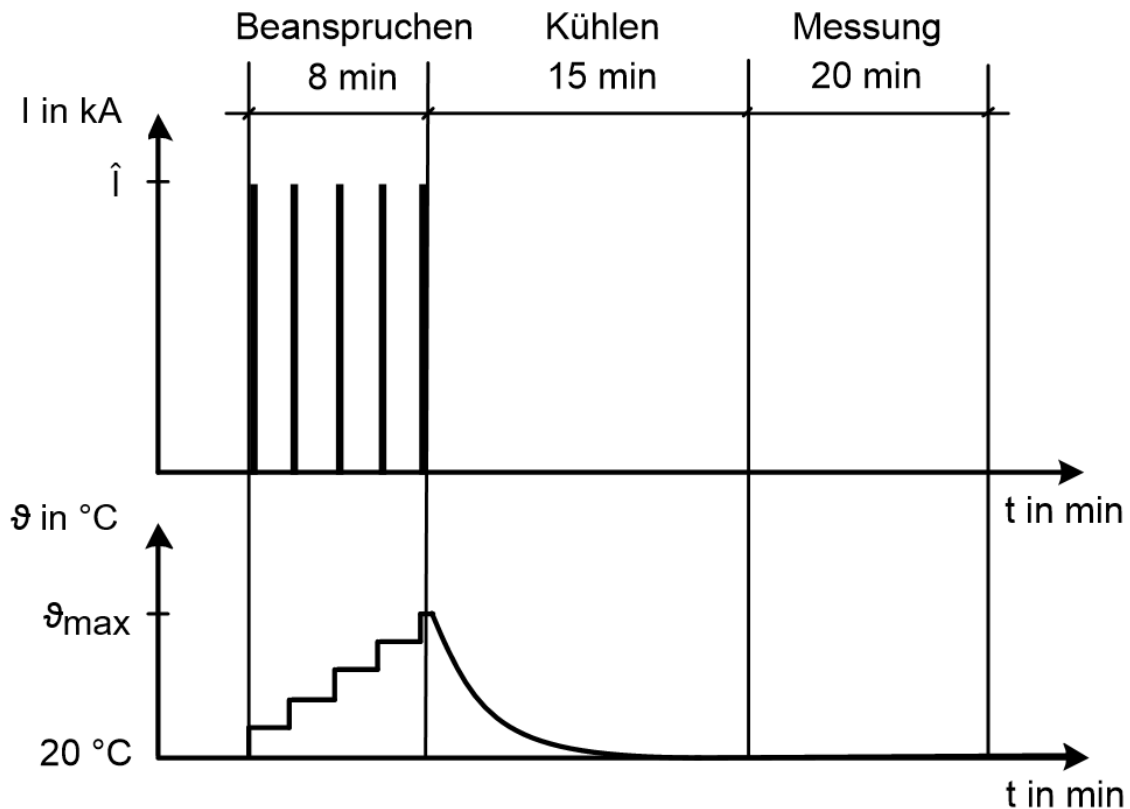


Bild 5-19: Vorgehensweise und zeitlicher Ablauf des „Impulse-Ageings“

5.2.4 Ergebnisse des „Impulse-Ageings“

Es wurde derselbe Typ von Metalloxid-Ableiterscheiben wie im Rahmen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens verwendet. Dabei handelte es sich um fabriksneue Exemplare, welche seit der Anlieferung noch keinem Stoßstrom ausgesetzt wurden. Es standen insgesamt drei Stück für das „Impulse-Ageing“ zur Verfügung. Jede Metalloxid-Ableiterscheibe wurde immer mit Stoßströmen derselben Amplitude beansprucht. Ableiter 3 wurde mit dem Nennableitstrom von 10 kA, Ableiter 4 mit dem 1,5-fachen Nennableitstrom und Ableiter 5 mit dem doppelten Nennableitstrom beansprucht. Es zeigte sich, wie zu erwarten, dass Ableiter 5, welcher mit der höchsten Stoßstromamplitude beansprucht wurde, als erstes der Testobjekte während einer Stoßstrombeanspruchung versagte. Ableiter 4 versagte nach etwa der 1,75-fachen Impulsanzahl des Ableiters 5, was durch den 0,5-fach niedrigeren Stoßstrom und der daraus resultierenden kleineren Energiemenge pro Beanspruchung erklärbar ist. Lediglich Ableiter 3 wurde durch den häufigen Wechsel zwischen Stoß-, Kühl- und Messelektroden am Randbereich des Isolationsmantels beschädigt und versagte etwas früher als ursprünglich erwartet. Die Ursache für das Versagen war ein Überschlag entlang der Mantelfläche, wie in Bild 5-20 (1) ersichtlich.

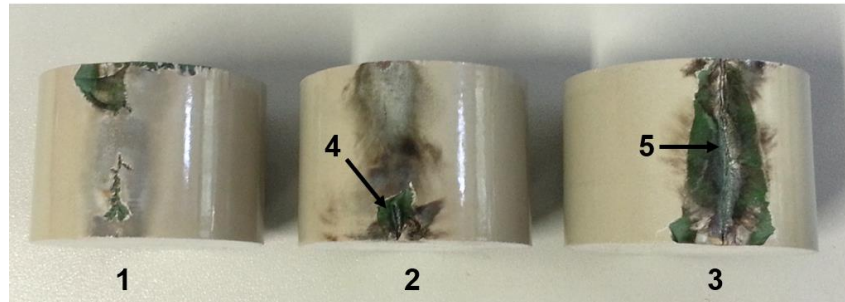


Bild 5-20: Mechanische Beschädigungen an der Mantelfläche von Metalloxid-Ableiterscheiben

- (1) Ableiter 3
- (2) Ableiter 4
- (3) Ableiter 5
- (4) Austrittspunkt des Lichtbogens bei Ableiter 4
- (5) Verlauf des Lichtbogens bei Ableiter 5

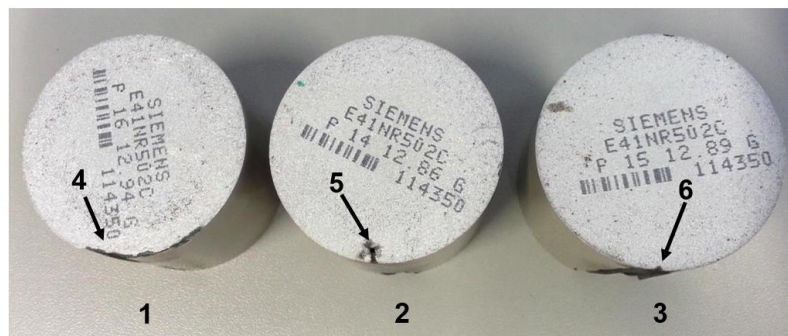


Bild 5-21: Mechanische Beschädigungen an der Kontaktfläche von Metalloxid-Ableiterscheiben

- (1) Ableiter 3
- (2) Ableiter 4
- (3) Ableiter 5
- (4) Beschädigung des Isoliermantels an Ableiter 3
- (5) Eintrittspunkt des Lichtbogens an Ableiter 4
- (6) Eintrittspunkt des Lichtbogens an Ableiter 5

In Bild 5-20 sind die Mantelflächen der mechanisch beschädigten Metalloxid-Ableiterscheiben in ansteigender Reihenfolge abgebildet. Werden die Kontaktflächen in Bild 5-21 der Metalloxid-Ableiterscheiben verglichen, so fällt auf, dass die mögliche Ausfallursache bei Ableiter 4 und 5 auf einen Durchschlag im Ableitermaterial zurückzuführen ist. Bei Ableiter 5 bildete sich demnach ein Lichtbogen durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheibe aus und führte durch den daraus resultierenden transienten Druckanstieg innerhalb der Metalloxid-Ableiterscheibe zu einem mechanischen Bruch der Isoliermantelfläche. Der Verlauf des Lichtbogens durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheibe ist in Bild 5-20 deutlich zu erkennen. Wird die Kontaktfläche von Ableiter 5, wie sie in Bild 5-21 dargestellt ist, betrachtet, so ist zu erkennen, dass sich der Lichtbogen seinen Weg aus-

gehend vom Rand der Metalloxid-Ableiterscheibe durch das Volumen gebahnt hat. Auch die Kontaktfläche von Ableiter 4 weist einen Durchschlagspunkt auf, allerdings hatte der Lichtbogen eine nicht ausreichende Energiemenge, um den Isoliermantel wie im Falle von Ableiter 5 zu beschädigen. Es ist lediglich der Austrittspunkt des Lichtbogens durch eine mechanische Beschädigung im unteren Bereich zu erkennen. Die Brandspuren oberhalb des Austrittspunktes stammen durch die Hitzeentwicklung des Lichtbogens. Wird das Schadensbild von Ableiter 3 mit den beiden anderen Schadensbildern verglichen, so fällt auf, dass dieser durch eine andere Ursache ausgefallen ist. Hierbei bahnte sich der Lichtbogen den Weg nicht durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheibe, sondern wanderte ausgehend von der Beschädigung der Isoliermantelfläche über diesen zur Erdelektrode. Ausgehend vom brennenden Lichtbogen wurde die Isoliermantelfläche des Ableiters 3 weiter beschädigt, wie in Bild 5-20 dargestellt.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die elektrischen Parameter in Abhängigkeit der Anzahl der Beanspruchungen analysiert. Bild 5-22 zeigt den Verlauf der Leckstromes, welcher durch die Metalloxid-Ableiterscheiben bei Anliegen der maximal zulässigen Dauerwechselspannung U_c fließt. Auch bei dieser Alterungsmethode kommt es wie beim beschleunigten thermischen Alterungsverfahren bis auf einzelne Messpunkte eher zu einer Verbesserung dieses elektrischen Parameters.

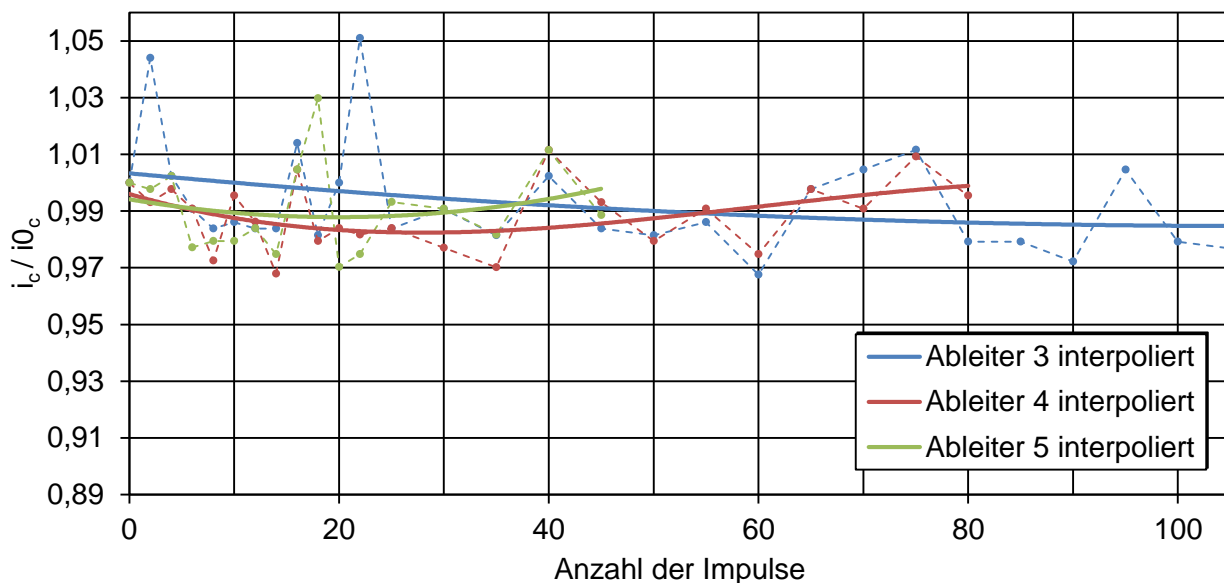


Bild 5-22: Verhalten des Leckstromes i_c durch die Metalloxid-Ableiterscheiben bei Anliegen der Spannung U_c mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert i_{0c} .

Ableiter 3 hatte einen durchschnittlichen Leckstrom von 0,43 mA, das Minimum von 0,42 mA wurde nach einer Beanspruchung mit 60 Stoßstromimpulsen erreicht und das Maximum, welches nach 22

Stoßstromimpulsen gemessen wurde, lag bei 0,45 mA. Prozentual gesehen verbesserte sich der Leckstrom im Vergleich zum ersten Messwert um 3 %.

Der durchschnittliche Leckstrom durch Ableiter 4 betrug 0,43 mA, das Minimum lag bei 0,42 mA und wurde nach einer Beanspruchung mit 14 Stoßstromimpulsen erreicht. Das Maximum, welches nach 40 Stoßstromimpulsen erreicht wurde, lag bei 0,44 mA. Prozentual gesehen verbesserte sich der Leckstrom im Vergleich zum ersten Messwert um 3 %.

Auch Ableiter 5 hatte einen durchschnittliche Leckstrom von 0,43 mA. Das Minimum wurde nach 20 Beanspruchungen mit Stoßstromimpulsen erreicht und betrug 0,42 mA, das Maximum nach 18 Beanspruchungen und wies einen Wert von 0,45 mA auf. Der Leckstrom verbesserte sich im Vergleich zum ersten Messwert um 3 %.

Auch beim „Impulse-Ageing“ ist es wie beim beschleunigten thermischen Alterungsverfahren zu einer Verbesserung der Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ gekommen. Bild 5-23 zeigt das Verhalten des kapazitiven Stromes der Metalloxid-Ableiterscheibe.

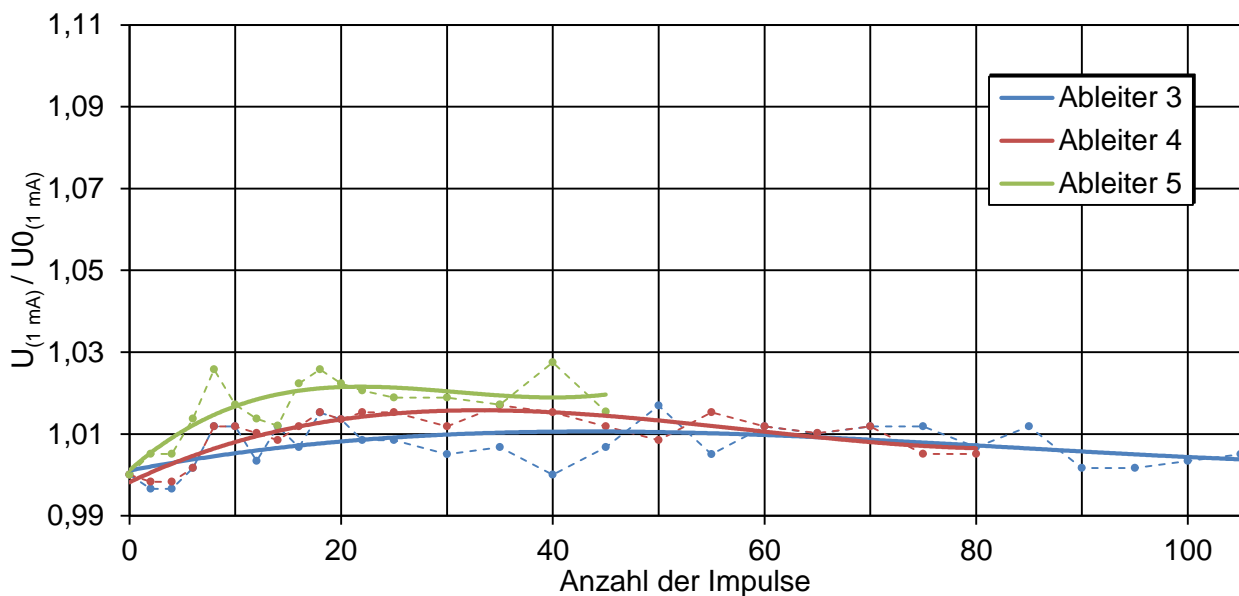


Bild 5-23: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(1\text{ mA})}$

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 1 mA durch Ableiter 3 zu treiben, betrug 5,95 kV. Das Minimum, welches nach 2 Beanspruchungen mit Stoßstromimpulsen erreicht wurde, lag bei 5,89 kV und das Maximum, welches nach 50 Beanspruchungen erreicht wurde, lag bei

6,01 kV. Prozentual stellte sich eine Verbesserung dieses Parameters im Vergleich zum ersten Messwert um 2 % ein.

Auch Ableiter 4 hatte wie Ableiter 3 eine durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 1 mA zu treiben, von 5,95 kV. Das Minimum, welches nach 2 Beanspruchungen mit Stoßstromimpulsen erreicht wurde, lag bei 5,88 kV und das Maximum, welches nach 35 Beanspruchungen erreicht wurde, lag bei 5,99 kV. Auch hier stellte sich eine Verbesserung dieses Parameters im Vergleich zum ersten Messwert um 2 % ein.

Ableiter 5 hatte eine etwas geringere durchschnittliche Hochspannung mit einem Wert von 5,92 kV, um einen Strom von 1 mA zu treiben. Das Minimum wurde am noch unbelasteten Ableiter gemessen und betrug 5,82 kV. Das Maximum wurde nach 40 Beanspruchungen mit 5,98 kV gemessen. Dieser Parameter hat sich um 3 % im Vergleich zum ersten Messwert verbessert.

Die Referenzspannung $U_{(2\text{ mA})}$ verbesserte auch mit steigender Impulsanzahl (siehe Bild 5-24). Das bedeutet, dass sich auch das ohmsche Verhalten der Metalloxid-Ableiterscheiben verbessert hat.

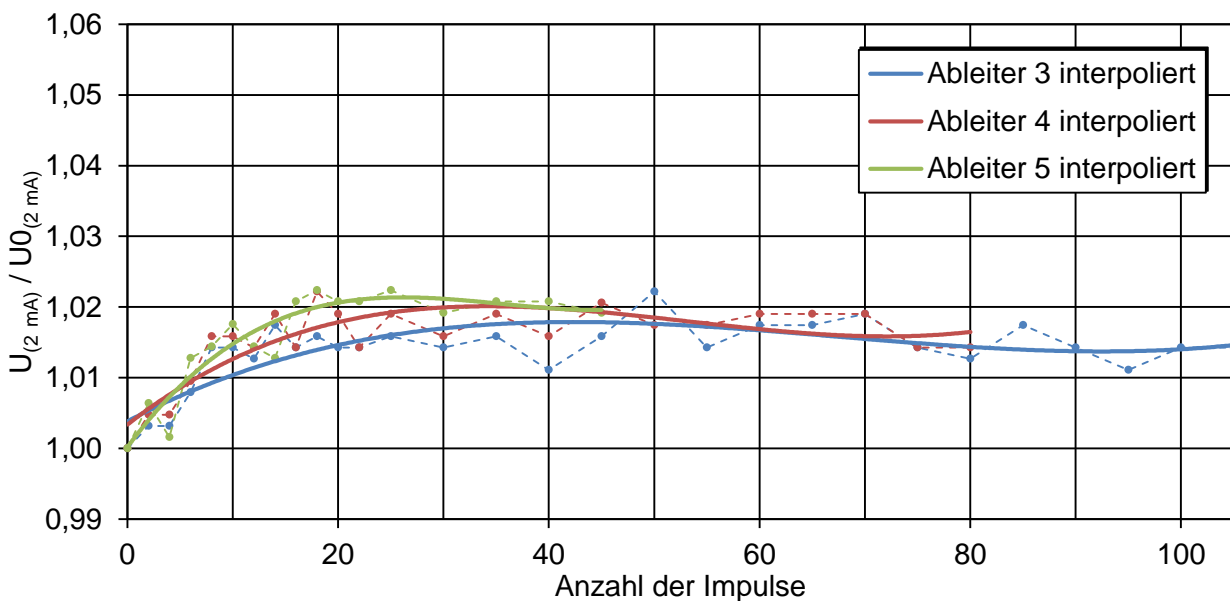


Bild 5-24: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(2\text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(2\text{ mA})}$

Die durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 2 mA durch Ableiter 3 zu treiben, betrug 6,40 kV. Das Minimum, welches am noch unbelasteten Prüfling gemessen wurde, hatte einen Wert von 6,31 kV und das Maximum, welches nach 50 Beanspruchungen erreicht wurde, lag bei 6,45 kV. Dieser Parameter verbesserte sich im Vergleich zum ersten Messwert um 2 %.

Auch Ableiter 4 hatte eine durchschnittliche Hochspannung, um einen Strom von 2 mA zu treiben, von 6,41 kV. Das Minimum wurde im noch unbelasteten Zustand mit einem Wert von 6,31 kV gemessen. Der Wert des Maximums betrug 6,45 kV und wurde nach 18 Beanspruchungen erreicht. Auch hier stellte sich eine Verbesserung von 2 % im Vergleich zum ersten Messwert ein.

Auch Ableiter 5 hatte eine etwas geringere durchschnittliche Hochspannung mit einem Wert von 6,36 kV, um einen Strom von 2 mA zu treiben. Das Minimum wurde ebenfalls am noch unbelasteten Ableiter gemessen und betrug 6,26 kV. Das Maximum wurde nach 18 Beanspruchungen mit 6,40 kV gemessen. Dieser Parameter hat sich um 3 % im Vergleich zum ersten Messwert verbessert.

Eine Analyse aller Messwerte zeigte, dass Ableiter 5 nach 46 Belastungen mit Stoßstromimpulsen versagte, Ableiter 4 nach 82 und Ableiter 3 nach 106. Wird beachtet, dass der Stoßstrom des Ableiters 5 die 1,5-fache Amplitude des Ableiters 4 hatte, so könnte das Versagen anhand der aufgenommenen Energiemenge erklärt werden. Setzt man die Anzahl der Stöße ins Verhältnis, ergibt sich der Faktor 1,78. Das heißt, dass Ableiter 4 etwa nach einer aufgenommenen Energiemenge ausfiel, die etwa das 1,28-fache der Ausfallenergiemenge des Ableiters 5 betrug. Leider wurde Ableiter 3 beim manuellen Handling beschädigt, sodass dieser früher als erwartet versagte. Daher ist es leider nicht möglich Ableiter 3 anhand der vorgestellten Analyseverfahren zu bewerten.

Für weitere Impulsalterungsversuche an Metalloxid-Ableiterscheiben wäre es zweckmäßig, für jede Metalloxid-Ableiterscheibe eine eigene Spann- bzw. Haltevorrichtung zu konstruieren, welche während aller Untersuchungen bzw. Beanspruchungen zum Einsatz kommt. Der Vorteil wäre, dass es nicht mehr möglich wäre, die Metalloxid-Ableiterscheibe durch den Wechsel von einer Haltevorrichtung zur anderen ungewollt zu beschädigen und so einen Überschlag und den damit verbundenen Ausfall während einer Stoßstrombeanspruchung zu vermeiden. Um eine bessere Aussagekraft der Ergebnisse zu erzielen und eventuelle Schwankungen in der Produktion der Metalloxid-Ableiterscheiben zu berücksichtigen, wäre es in Zukunft notwendig, mehr als eine Scheibe desselben Typs und eine Auswahl unterschiedlicher Fertigungslose mit derselben Stoßstromamplitude zu belasten.

Als weiteres Bewertungskriterium im Rahmen der Auswertungen wurde beim „Impulse-Ageing“ die Ableitrestspannung, welche an der Metalloxid-Ableiterscheibe während eines Ableitvorganges anliegt, analysiert. Die Ableitrestspannung zeigte während aller Messungen keine Abhängigkeit zur Anzahl der Beanspruchungen. Strom- und Spannungsverläufe aus ausgewählten Messungen sind im Anhang B dargestellt, ein Beispiel ist in Bild 5-25 angeführt. Es handelt es sich um normalisierte Verläufe, welche sich auf die maximale Amplitude des jeweiligen Signales beziehen. Die Verläufe

wurden normalisiert, da die Amplitude des Stoßstromes eine maximale durchschnittliche Abweichung von etwa 0,5 kA aufwies und somit keinen direkten Vergleich der Kurvenverläufe zulässt. Bild 5-25 zeigt den Verlauf des Stoßstromes und der Ableitrestspannung von Ableiter 3 während des fünften bzw. des 80. Stoßes. Daraus ist ersichtlich, dass beim verwendeten Ableitertyp der Verlauf der Ableitrestspannung mit zunehmender Anzahl der Beanspruchungen nahezu gleich bleibt.

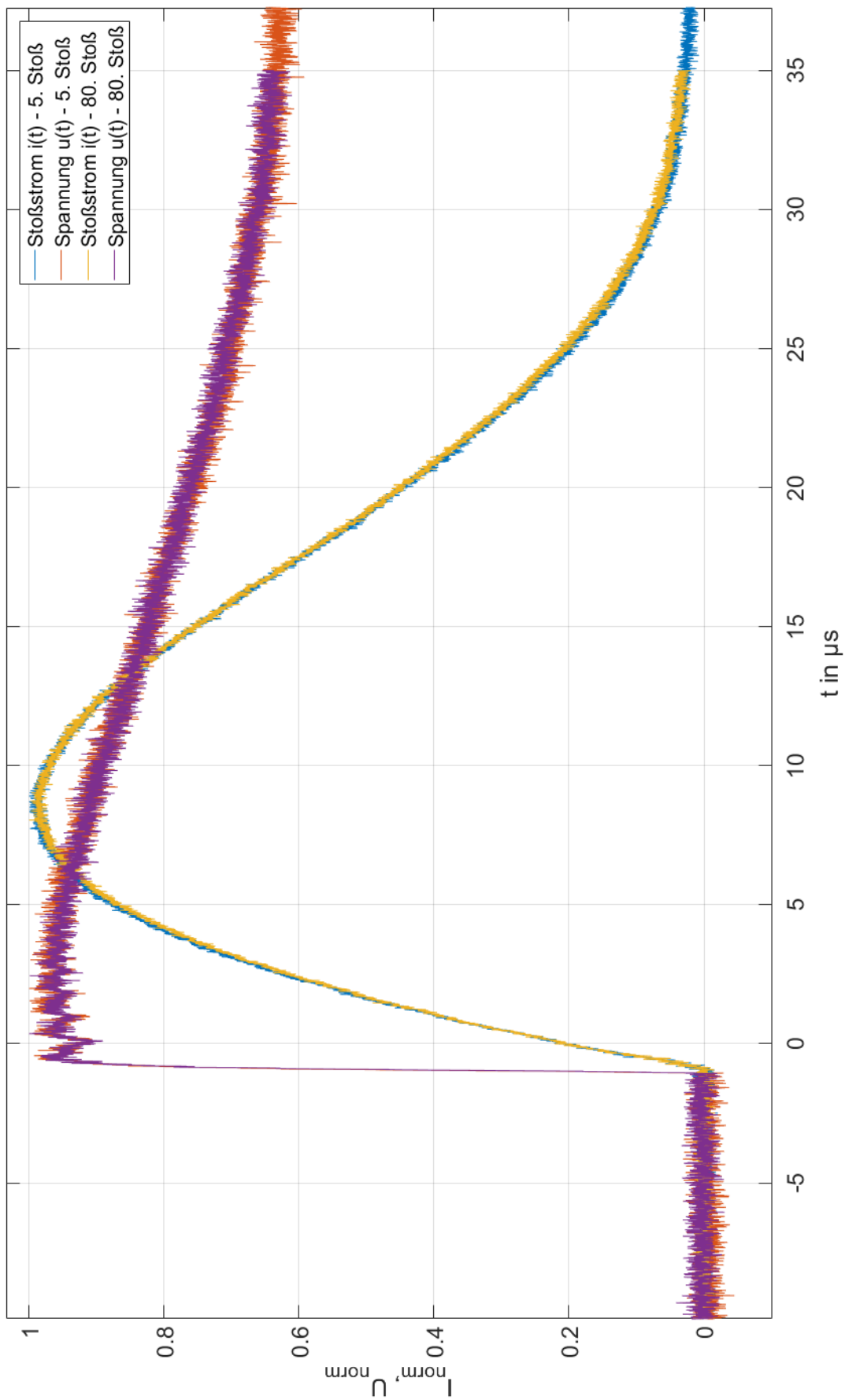


Bild 5-25: Ableitrestspannungen am Ableiter 3, in unterschiedlichen Alterungsstadien, bezogen auf den Maximalwert

- (1) Nach fünfmaliger Beanspruchung mit einem Stoßstrom von 10 kA
- (2) Nach 80 Beanspruchungen mit einem Stoßstrom von 10 kA

5.3 DISKUSSION BEIDER BESCHLEUNIGTER ALTERUNGSVERFAHREN

Wie in den ausgewählten vorangegangenen Diagrammen zu erkennen, ist der Verlauf der elektrischen Parameter der impulsgealterten zu jenen der konventionell gealterten Metalloxid-Ableiterscheiben durchaus ähnlich. Die Messungen der thermischen beschleunigten Alterung wurden immer bei einer Temperatur von 115 °C durchgeführt. Der Temperaturbereich in welchen die mit Impulsen gealterten Metalloxid-Ableiterscheiben gemessen wurde lag immer in einem Bereich von 22 °C \pm 0,4 K. Da die elektrischen Parameter stark von der Temperatur der jeweiligen Metalloxid-Ableiterscheibe abhängig sind, wurden die Parameter auf den jeweils ersten Messwert der Messreihen bezogen. Der Grund dafür ist, dass zum Beispiel der Leckstrom durch die Metalloxid-Ableiterscheiben, welcher bei einer Umgebungstemperatur von 115 °C gemessen wurde, um etwa 42 % höher ist als jener, der bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C gemessen wurde. Diese doch sehr starke Temperaturabhängigkeit aller elektrischen Parameter macht einen direkten Vergleich der Messgrößen aus beiden Alterungsverfahren unmöglich. Aus diesem Grund wurden alle Messwerte auf den jeweils ersten Messwert der Messreihe bezogen, um so die Auswirkungen der beiden beschleunigten Alterungsverfahren auf die elektrischen Parameter der Metalloxid-Ableiterscheiben direkt gegenüberzustellen und vergleichen zu können.

Bei einem Vergleich der normalisierten Diagramme des jeweiligen elektrischen Parameters fällt auf, dass bis auf die Spannung, die nötig ist um einen Strom von 10 bzw. 20 mA zu treiben, die beschleunigte thermische Alterung eine etwas größere Beeinflussung der elektrischen Parameter verursacht. Der Verlauf der elektrischen Parameter beider beschleunigten Alterungsverfahren ist aber durchaus vergleichbar. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung des „Impulse-Ageings“ ähnliche Alterungseffekte der elektrischen Parameter wie bei Anwendung der beschleunigten thermischen Alterung erzielt werden konnten.

Bei den mit dem „Impulse-Ageing“ gealterten Metalloxid-Ableiterscheiben fällt auf, dass die Amplitude des Stoßstromes nur einen sehr geringen Einfluss auf elektrischen Parameter hat. Einzig die Anzahl der Impulse, bei der die jeweilige Metalloxid-Ableiterscheibe versagte, korreliert mit der Amplitude des Stoßstromes.

5.4 WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

In dieser Arbeit wurde eine Basis für die weitere Erforschung des Alterungsverhaltens von Metalloxid-Ableiterscheiben geschaffen. Für weitere Untersuchungen stehen sowohl der Alterungsprüfstand, in dem beschleunigte thermische Alterungsverfahren durchgeführt werden können, als auch die Stoßstromanlage samt transienten Messsystem zur Verfügung.

Eine gute Möglichkeit die elektrischen Parametermessungen, die während der Alterungsdauer mehrmals durchgeführt werden müssen, zu erleichtern und mit einer höheren Messgenauigkeit auszustatten, wäre ein stromgeregeltes Messsystem. Diese Einrichtung könnte unter anderem die Eigenschaft besitzen, ein zuvor festgelegtes Messprogramm autonom zu durchlaufen und somit die erforderliche Zeitspanne wesentlich zu verringern. Durch die Auswertung einer großen Anzahl von Messungen während verschiedener Alterungsverfahren könnte es in Zukunft möglich werden, eine Messgröße oder eine mathematische Beziehung zu finden, welche Auskunft über den aktuellen Zustand der Metalloxid-Ableiterscheibe gibt.

Ein weiterer Vorteil eines automatisierten Messstandes wäre die erhöhte Genauigkeit bei der Einstellung eines gewünschten Stromes durch die Metalloxid-Ableiterscheibe, die sich mit einer solchen Einrichtung realisieren lassen würde. Um die Hochspannung, welche an der Metalloxid-Ableiterscheibe anliegt, möglichst genau einstellen zu können, kann unter anderem ein Thoma-Regler verwendet werden, welcher in Anhang F genauer erläutert wird. Den Grund für diese hohen Anforderungen bezüglich der Spannungseinstellung stellt die extrem nichtlineare Kennlinie der Metalloxid-Ableiterscheiben dar.

In Zuge nachfolgender Arbeiten sollte auch ein Programm an Haltevorrichtungen für die unterschiedlichen Typen und Baugrößen von Metalloxid-Ableiterscheiben zusammengestellt werden. Diese zukünftigen Haltevorrichtungen sollten dafür ausgelegt sein, die Metalloxid-Ableiterscheibe während der gesamten Alterungsdauer aufzunehmen und somit häufige Wechsel von Halteeinrichtungen und eventuelle Beschädigungen der Metalloxid-Ableiterscheibe zu vermeiden. Diese zukünftigen mechanischen Einrichtungen müssen allerdings auch so ausgelegt sein, zahlreiche Beanspruchungen zu überstehen. Diese sind zum einen thermischer (beschleunigte thermische Alterung) und zum anderen auch mechanischer (Elektro- und thermodynamische Kräfte) Natur.

Im Wärmeschrank, der im Rahmen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens verwendet wurde, herrschen sehr trockene Umgebungsbedingungen. Ziel einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit könnte es sein, das Alterungsverfahren bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten durchzuführen. Mit Hilfe solcher Untersuchungen könnte das Alterungsverhalten von Metalloxid-Ableiterscheiben in Abhängigkeit der Luftfeuchte analysiert werden und so neue Erkenntnisse auf diesem Themengebiet gewonnen werden.

Ein weiteres großes Aufgabengebiet stellt die Alterung mit Stoßstromimpulsen dar. In dieser Arbeit konnte bei einem Typ einer Metalloxid-Ableiterscheibe eine Abhängigkeit zwischen der Beanspruchung mit Stoßstromimpulsen und dem Alterungsverhalten beobachtet werden. Daher sind in Zukunft weitere Versuche mit verschiedenen Typen von Metalloxid-Ableiterscheiben und einer wesentlich größeren Stückzahl der einzelnen Typen erforderlich, um dieses Themengebiet weiter zu erforschen. Weitere Untersuchungen könnten auch aus Versuchen mit anderen Impulsformen bestehen. Dazu könnte zum Beispiel der Rechteckstoßstrom oder der Stoßstrom mit der Form $4/10 \mu\text{s}$ sein. Parallel zum sogenannten „Impulse-Ageing“ müssen thermische Alterungen mit Metalloxid-Ableiterscheiben desselben Typs durchgeführt werden. Konkretisieren sich die in dieser Arbeit beobachteten Abhängigkeiten durch weiterführende Arbeiten auf diesem Gebiet, so könnte sich die Alterung mit Impulsen als alternatives Verfahren zur normgerechten Alterung in der Zukunft etablieren.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Vorliegende Arbeit ist in zwei Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt, der theoretische Teil, beschäftigt sich mit den Grundlagen und physikalischen Eigenschaften von Metalloxid-Ableiterscheiben. Im zweiten Abschnitt werden die durchgeführten praktischen Versuche und Messungen, die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, genauer erläutert und im Anschluss analysiert.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die aktuelle Ableitertechnik, sowie die Materialzusammensetzung moderner Metalloxid-Ableiterscheiben. Es werden unter anderem die allgemeinen Eigenschaften und die Vorgangsweise bei der Dimensionierung von Überspannungsableitern, wie sie heutzutage im Hochspannungsnetz verwendet werden, diskutiert. Darüber hinaus werden die elektrischen Eigenschaften und die Betriebsbereiche anhand der Spannungs- und Strom-Kennlinie erklärt. Das Verhalten einer Metalloxid-Ableiterscheibe bei Anliegen von Referenzspannung, maximaler Betriebsspannung wird mit Hilfe des elektrischen Ersatzschaltbildes erläutert.

Im dritten Kapitel dieser Arbeit werden die Beanspruchungen der Metalloxid-Ableiterscheiben für die praktischen Versuche genauer erläutert. Dazu wird unter anderem der exponentielle Stoßstrom samt dessen elektrischen Eigenschaften und Kenngrößen beschrieben. Ein weiterer Punkt dieses Kapitels sind die Einrichtungen zur Messung und Erzeugung von Stoßströmen. Die für diese Arbeit erforderliche transiente Messtechnik wurde ausgewählt. Außerdem wurden Messungen mit verschiedenen hochspannungsseitigen Dämpfungswiderständen eines rein kapazitiven Messteilers durchgeführt, diese analysiert und ausgewertet. Die Versuche in diesem Kapitel stellen die Grundlage für alle nachfolgenden Messungen, welche unter Verwendung der Stoßstromanlage durchgeführt wurden, dar. Die transiente Messtechnik ist ein sehr anspruchsvolles Aufgabengebiet, bei der auch eine Vielzahl von Störeinflüssen berücksichtigt werden muss.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der transienten Temperaturmessung und der Auswertung der Aufteilung des Stoßstromes durch das Volumen der Metalloxid-Ableiterscheiben. Hierbei werden die Messungen, welche mit einem optischen Messsystem aufgenommen wurden, bewertet und analysiert. Zusätzlich werden verschiedene Beschichtungsarten der Metalloxid-Ableiterscheiben bezüglich deren mechanischer Widerstandsfestigkeit bei einer Beanspruchung mit einem Stoßstrom evaluiert. Es hat sich während der Untersuchungen gezeigt, dass das optische Messsystem das transiente Temperaturverhalten nicht darstellen kann und somit eine Auswertung der Stromaufteilung im Ableitervolumen nicht möglich war.

Kapitel 5 stellt den Hauptaufgabenbereich der praktischen Versuche dieser Arbeit dar. Es wird unter anderem beschrieben, welche Einrichtungen für die Alterungsversuche an Metalloxid-Ableiterscheiben konstruiert werden mussten. Auch die elektrischen Eigenschaften und das Verhalten bei einem

Versagen des Prüflings dieser Einrichtungen wird erläutert. Es wurden zwei beschleunigte Alterungsverfahren von Metalloxid-Ableiterscheiben durchgeführt und deren Einfluss auf das Betriebsverhalten sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Das erste beschleunigte Alterungsverfahren ist das normgerechte Verfahren, welches allerdings viel Zeit in Anspruch nimmt und große Anforderungen bezüglich der erforderlichen Einrichtungen stellt. Als Alternative kam das sogenannte „Impulse-Ageing“-Verfahren zum Einsatz, bei dem die Metalloxid-Ableiterscheiben einer rein elektrischen Alterung mit Stoßstromimpulsen der Form $8/20 \mu\text{s}$ unterzogen wurden. Es konnte bei beiden Alterungsverfahren eine Beeinflussung der elektrischen Parameter nachgewiesen werden. Da es sich um moderne Metalloxid-Ableiterscheiben handelte, welche sich aus alterungsbeständigen Material zusammensetzen, kam es vorwiegend zu einer Verbesserung der elektrischen Parameter anstatt zu einer Verschlechterung. Durch eine Gegenüberstellung der Diagramme der elektrischen Parameter des thermischen Alterungsverfahrens mit jenen des „Impulse-Ageings“ ist zu erkennen, dass beide Alterungsverfahren einen durchaus ähnlichen Einfluss auf das Alterungsverhalten haben. Die größte Ähnlichkeit (Abweichung $< 1 \%$) wurde bei den Spannungen, die nötig sind um einen Strom 10 mA bzw. 20 mA zu treiben, erzielt. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass das „Impulse-Ageing“ einen größeren Einfluss im ohmschen Bereich als im kapazitiven Bereich hat. Die Parameter im vorwiegend kapazitiven Bereich unterscheiden sich um etwa 5 % von jenen des beschleunigten thermischen Alterungsverfahrens.

Der letzte Teil dieses Kapitel listet Möglichkeiten zur weiteren Erforschung dieses Themengebietes auf. Es wurden unter anderem konkrete Vorschläge erarbeitet, wie zukünftige Messungen von elektrischen Parametern der Metalloxid-Ableiterscheiben durch den Einsatz von moderner Softwaretechnologie und Elektronik vereinfacht und verbessert können.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] SIEMENS: „Ableiterhandbuch 3. Auflage“. 2011
- [2] V. Hinrichsen: „Metalloxid-Ableiter Grundlagen“. Siemens Eigenverlag, 2. Auflage. 2001
- [3] ABB: „Überspannungsschutz: Metalloxidableiter in Mittelspannungsnetzen“. 2011
- [4] A. Rocks: „Einsatz von Metalloxid-Varistoren zum Überspannungsschutz pulsumrichter- gespeister Drehfeldmaschinen“. 2009
- [5] IEC: „Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems - 60099-4“. 2004
- [6] W. G. A3.17: „MO Surge Arresters Stresses and Test Procedures“. 2013
- [7] S. Pack: „Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung“. 1996
- [8] M. Reinhard: „Experimentelle Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von Metalloxidwiderständen eingesetzt in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums“. 2009
- [9] K. Schon: „Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik“. 2010
- [10] IEC62475: „High current test techniques – General definitions, test requirements and measuring systems (Entwurf CDV)“. 2010
- [11] HAEFELY: „Unterlagen zur Stoßstromanlage“. 1971
- [12] S. Jaufer: „Transiente Untersuchungen der Kreisparameter einer Stoßstromanlage“. 2001
- [13] N. Tsukamoto, S. Imato, Y. Baba, M. Ishii: „Current Distribution in MOV Element Stressed by 4/10 μ s Impulse Current“. 2016
- [14] M. Gießel, V. Hinrichsen, VDE, IEEE, R. Göhler: „Potentialsteuerung funkenstreckenloser Metalloxid-Ableiter für Höchst- und Ultrahochspannungsnetze und deren Auswirkung auf die thermische Stabilität“. 2017
- [15] M. R. Raghuvver, X. Qiu: „Detection of Impulse Current Caused Ageing in Valve Element of A Distribution Class Metal Oxide Surge Arrester“. 1995
- [16] C. de Salles, M. L. B. Martinez, Á. A. A. de Queiroz: „Surge Ageing of Metal Oxide Varistors“. 2015

- [17] C. de Salles, M. L. B. Martinez, Á. A. Alencar de Queiroz: „Ageing of Metal Oxide Varistors due to Surges“. 2011
- [18] E. Marx: „Hochspannungs-Praktikum“. 1941
- [19] W. Rußwurm: „Strukturelle und elektrische Eigenschaften von ZnO-Varistorkeramik und deren Bi₂O₃-haltigen Nebenphasen“. 1987
- [20] F. Greuter, G. Blatter, M. Rossinelli, F. Stucki: „Conduction Mechanism in ZnO-Varistors: an Overview“. 1989
- [21] S. Arrhenius, O. Sackur: „Untersuchungen über die galvanische Leitfähigkeit der Elektrolyte“. 1907

ANHANG A – STOßSTROMANLAGE

A.1 ALLGEMEINES ZUR ANLAGE

Es handelt sich um einen Stoßstromgenerator der Firma HAEFELY, welcher im Jahre 1972 in der kleinen Hochspannungshalle des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der TU Graz errichtet wurde.



Bild A-1: Stoßstromanlage des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Der Aufbau der Anlage entspricht einem einstufigen RLC-Kreis, welcher mit einer getriggerten Kugelfunkenstrecke und einem Impulssteuergerät, der sogenannten Trigatron-Steuereinheit auslösbar ist. Die maximale Stoßenergie der Kondensatoren beträgt 100 kJ, durch geeignete Zusammenschaltung der Kondensatoren können unterschiedliche Ladespannungen von 50, 100 und 200 kV generiert und Stoßkapazitäten in der Größe von 2,5 bis 80 μF erreicht werden.

A.2 ELEKTRISCHE DATEN DER ANLAGE

1. Exponentialstoßstrom

- maximale Ladeenergie 100 kJ

200-kV-Schaltung:

- Stoßkapazität $C_S = 4,92 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 98 \text{ kA}$

100-kV-Schaltung:

- Stoßkapazität $C_S = 19,68 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 140 \text{ kA}$

50-kV-Schaltung:

- Stoßkapazität $C_S = 78,22 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 173 \text{ kA}$

Standard-Stoßformen:

- Hochstromstoß 4/10 μs
- Stoßstrom 8/20 μs
- Stoßstrom 10/350 μs mit 100 kA (Crowbarschaltung)

2. Rechteckstoßstrom

- maximale Ladeenergie 50 kJ

16-gliedriger Kettenleiter

- Kapazität pro Glied $C_l = 4,92 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 1,2 \text{ kA}$
- Dauer des Impulses $T_D = 2260 \mu\text{s}$
- Stirnzeit des Impulses $T_S = 107 \mu\text{s}$
- Abfallzeit des Impulses $T_{\text{Ab}} = 560 \mu\text{s}$

8-gliedriger Kettenleiter $C_1 = 10 \mu\text{F}$ / Glied

- Kapazität pro Glied $C_1 = 9,84 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 2,25 \text{ kA}$
- Dauer des Impulses $T_D = 1080 \mu\text{s}$
- Stirnzeit des Impulses $T_S = 105 \mu\text{s}$
- Abfallzeit des Impulses $T_{\text{Ab}} = 335 \mu\text{s}$

8-gliedriger Kettenleiter $C_1 = 2,5 \mu\text{F}$ / Glied

- Kapazität pro Glied $C_1 = 2,46 \mu\text{F}$
- Maximalstrom $I_{\text{max}} = 1,18 \text{ kA}$
- Dauer des Impulses $T_D = 590 \mu\text{s}$
- Stirnzeit des Impulses $T_S = 56 \mu\text{s}$
- Abfallzeit des Impulses $T_{\text{Ab}} = 145 \mu\text{s}$

A.3 KONSTRUKTIVER AUFBAU

Die gesamte Anlage besteht im wesentlichen aus vier Gruppen:

- Der Gleichrichter- und Ladeeinrichtung
- Den Stoßkondensatoren
- Den ölgefüllten Umschaltkessel mit Kugelfunkenstrecke und Reuse
- Der Steuerwarte

A.3.1 Gleichrichter- und Ladeeinrichtung

Der aus Selenventilen bestehende Ladegleichrichter ist gemeinsam mit dem Hochspannungstransformator und einem hochohmigen Messwiderstand in einem ölgefüllten Eisenkessel untergebracht. Um positive als auch negative Stoßströme zu erzeugen, ist ein Polaritätswechsel notwendig. Ein solcher Polaritätswechsel wird durch eine Umschalteinrichtung, die vom Pult aus gesteuert wird, ermöglicht.

A.3.2 Stoßkondensatoren

Die Kondensatoren befinden sich auf zwei separaten Gestellen, die isoliert rund 1,7 m über den Boden aufgestellt sind. Jedes Gestell beherbergt vier Kondensatorgruppen, die aus je vier Einzelkondensatoren zu je $2,5 \mu\text{F}$ bestehen. Die Stoßenergie wird also in insgesamt 32 Kondensatoren, welche in Aluminiumgehäusen untergebracht sind, gespeichert. Ein Pol ist mit dem Aluminiumgehäuse verbunden, der andere wird über eine Durchführung aus dem Kessel

herausgeleitet. Im Umschaltkessel ist es möglich, die Kondensatoren zu Parallelschaltungen zusammenzufassen und so die Stoßkapazität und Stoßenergie zu erhöhen.

Die einzelnen Kondensatorgruppen sind über Hochspannungskabel mit dem Umschaltkessel verbunden. Zwischen der Verbindung Kondensatorgruppe und Hochspannungskabel ist es möglich einen seriellen Dämpfungswiderstand in die Schaltung zu integrieren. Die Dämpfungswiderstände werden verwendet, um die gewünschte Kurvenform (Stirnzeit, Rückenhalbwertszeit) einzustellen. Ein weiterer positiver Aspekt von gedämpften Stößen ist die drastisch erhöhte Lebensdauer der Kondensatoren [12]. Unterhalb der Kondensatorgestelle können Kettenleiterspulen zur Erzeugung von rechteckförmigen Stoßströmen angebracht und mit den Kondensatoren verschalten werden.

Durch die neue 800-kV-Gleichspannungsanlage, welche im Zuge der Modernisierung der kleinen Hochspannungshalle errichtet wurde, muss sehr großen Wert auf die korrekte Erdung der Kondensatoren im ausgeschalteten Betrieb der Anlage gelegt werden. Der Grund dafür ist die hohe Gleichspannung in unmittelbarer Nähe zu den Kondensatoren. Diese könnten sich durch diese unbemerkt aufladen und eine sehr große Gefahr im Falle einer Berührung durch eine Person darstellen.

A.3.3 Ölgefüllter Umschaltkessel mit Kugelfunkenstrecke und Reuse

Diese Baueinheit stellt das zentrale Element der Anlage dar. Der Kessel ist auf vier 2,1 m langen isolierten Stützrohren aufgestellt. Zwischen den Stützrohren ist am unteren Kesselrand die sogenannte Reuse angebracht, die fast bis zum Boden reicht. Unterhalb des Kessels in der Mitte des Käfigs befindet sich die getriggerte Funkenstrecke. [11]

Diese Funkenstrecke besteht aus zwei Halbkugeln, die obere ist fest verbaut, die untere ist beweglich ausgeführt und durch einen Motorantrieb verstellbar. Je nach gewünschter Ladespannung der Kondensatoren ist der Abstand der Elektroden zu verändern, um ein ungewolltes und zu frühes Auslösen der Funkenstrecke zu verhindern. Die korrekte Auslösung beim gewünschten Ladespannungswert erfolgt mit Hilfe einer Zündeinrichtung, dem Zündstift, welcher in der unteren Elektrode integriert ist. Angesteuert wird diese Zündeinrichtung durch das Trigatron, welches sich in der Steuerwarte befindet.

Am Umschaltkessel seitlich sind je zwei paar Hochspannungsdurchführungen für 200 kV bzw. 100 kV montiert. Über diese Durchführungen werden die Anschlüsse der einzelnen Kondensatorgruppen ins Kesselinnere geführt. Um die elektrischen Abstände der einzelnen Anschlusspunkte zu verringern, ist der Kessel mit einem Isolieröl befüllt. Hierbei handelt es sich um ein gewöhnliches Mineralöl, welches auch bei Transformatoren eingesetzt wird. Das Füllvolumen des Ölkessels beträgt etwa 450 Liter.

Je nach gewünschter Spannung kann die Verschaltung der Kondensatorgruppen geändert werden. Dazu gibt es für die Spannungen 50 kV, 100 kV und 200 kV jeweils einen Satz von Verbindungsstößeln, welche auf einer Plexiglasplatte fixiert sind, die ein falsches Zusammenschalten unmöglich macht und somit eine Beschädigung der Kondensatorgruppen verhindert.

Das folgende Bild zeigt die bisher vorgestellten Baugruppen der Stoßstromanlage.



Bild A-2: Bauelemente der Anlage

- (1) Ladeeinrichtung
- (2) Kondensatorgruppe mit einer Kapazität von $10 \mu\text{F}$
- (3) Umschaltkessel zur Wahl der Spannungsebene
- (4) Prüflingsraum
- (5) Kapazitiver Hochspannungsteiler
- (6) Shuntwiderstand zur Messung des Stoßstromes $R_{\text{Sh}} = 5,13 \text{ m}\Omega$

A.3.4 Steuerwarte

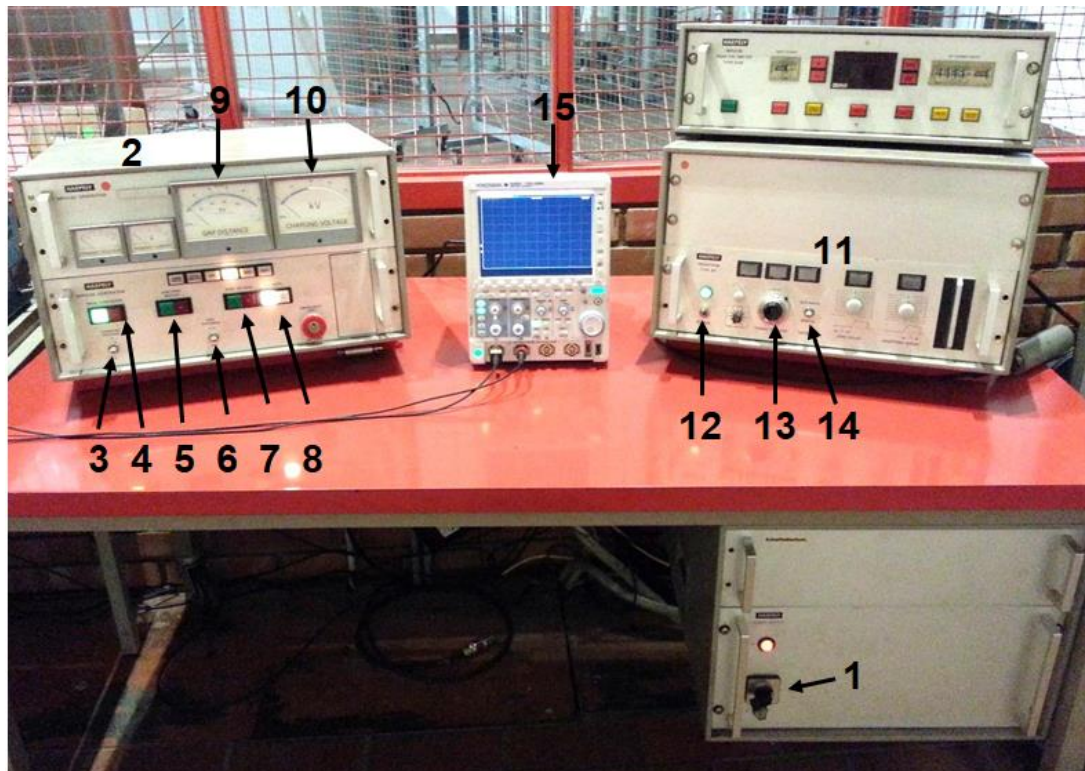


Bild A-3: Baugruppen in der Steuerwarte

- (1) Hauptschalter der gesamten Anlage
- (2) Hafely Impulse Generator
- (3) Schalter zur Einstellung der primären Ladespannung
- (4) „Main Contactor“-Taste
- (5) „Earthing Switch“-Taste
- (6) Schalter zur Einstellung des Abstandes der Kugelfunkenstrecke
- (7) „High Voltage“-Taste
- (8) Taste zur Wahl der Polarität
- (9) Anzeige des aktuellen Abstandes der Kugelfunkenstrecke
- (10) Anzeige der aktuellen Kondensatorladespannung
- (11) Hafely Trigatron Type 90
- (12) Hauptschalter der Zündeinrichtung
- (13) Präzisionspotentiometer zur Einstellung der Kondensatorladespannung
- (14) Schalter zum Auslösen der Funkenstrecke
- (15) Yokogawa DLM 2054 mit Tastkopf 1:10 für den Strom bzw. 1:100 für die Spannung

Links befindet sich die Ladesteuereinrichtung. Sie steuert die Ladespannung, den Abstand der Funkenstrecke sowie die Freigaben der Erdungsschalter und der Hochspannung. Der Abstand der Funkenstrecke muss so groß eingestellt werden, dass diese nicht vor dem Erreichen der gewünschten Ladespannung zündet.

Auf der rechten Seite befindet sich die Auslöseeinrichtung der Kugelfunkenstrecke, das sog. Trigatron. Mit dieser Einrichtung ist es möglich, die Kugelfunkenstrecke bei einer zuvor an einem Präzisionsmehrgangspotentiometer eingestellten Ladespannung zu zünden.

Unterhalb des Steuerpults befindet sich der Hauptschalter der Stoßstromanlage, der Schieflastschutz und der Trenntransformator. Der Schieflastschutz schützt die Anlage bei Verwendung der 100 kV und 200 kV Schaltung vor ungleichmäßiger Aufladung der Kondensatoren, indem er die Anlage abschaltet. Um eine schiefe Aufladung zu detektieren, wird die Spannung an einem Gestell gemessen und mit der Ladespannung verglichen. Stimmt das Verhältnis innerhalb einer gewissen Grenze ($< 5\%$) nicht, hervorgerufen durch defekte Kondensatoren oder Steuerwiderstände, wird eine Abschaltung und Erdung vorgenommen. Der Trenntransformator schützt die Steuerung vor Strömen, die in Erdschleifen durch den Stoßstrom entstehen können. [12]

Die Stoßstromanlage wird über eine durch einen Schutzkäfig und dickes Glas geschützte Steuerwarte bedient. Diese Schutzmaßnahmen sind notwendig, da bei der Prüfung eine sehr große Energiemenge auf den Prüfling einwirkt. Falls es zu einem Versagen des Prüflings kommen würde, könnte es durch ein Zerbersten desselbigen zu einem gefährlichen Splitterflug in der Hochspannungshalle kommen, der unter Umständen auch zu Verletzungen führen könnte.

A.4 BEDIENUNG DER ANLAGE

Um die Anlage bedienen zu können, ist eine grundlegende Einschulung durch Fachpersonal notwendig. Bei allen Arbeiten muss stets darauf geachtet werden, dass die Kondensatoren nach den Messungen durch die Erdungsschalter entsprechend geerdet werden, indem sichergestellt wird, dass auch jeder Einzelne korrekt funktioniert. Schließt ein Erdungsschalter nicht ordnungsgemäß, darf auf keinen Fall im Nahbereich der Anlage gearbeitet werden – es besteht durch die möglicherweise noch aufgeladenen Kondensatoren höchste Lebensgefahr. Nach den Vorbereitungen bzw. Umbauarbeiten für Messungen muss sichergestellt werden, dass sich keine Werkzeuge oder ähnliche Gegenstände im Prüfaufbau befinden.

Bevor mit einer Messung begonnen wird, muss im Vorhinein festgelegt werden, wie hoch die Amplitude des gewünschten Stoßstromes sein soll. Anschließend muss die erforderliche Ladespannung U_L an der Auslöseeinrichtung eingestellt werden. Danach ist es notwendig die „Main Contactor“ Taste am Bedienpult zu drücken, die primäre Ladespannung kann nun eingestellt werden. Anschließend muss die Funkenstrecke so eingestellt werden, dass sie beim Erreichen der eingestellten Ladespannung der Kondensatoren nicht ungewollt oder zu früh zündet. Ist alles für die Messung vorbereitet, können die Erdungsschalter durch Betätigen der „Earthing Switch“ Taste geöffnet werden. Um dem Ladevorgang der Kondensatoren zu beginnen, muss die „High Voltage“

Taste betätigt werden. Die Kondensatoren werden nun bis zur eingestellten Ladespannung aufgeladen, dies kann je nach eingestellter primärer Ladespannung und gewünschter Kondensatorladespannung etwas dauern. Wenn die Auslöseeinrichtung auf manuell gestellt ist, wird der Ladevorgang bei Erreichen der eingestellten Ladespannung beendet und die Kugelfunkenstrecke kann durch Betätigen des Auslösetasters der Zündeinrichtung gezündet werden. Bei Schalterstellung auf Automatik wird der Stoßstrom bei Erreichen der eingestellten Ladespannung automatisch durch einen Zündfunken an der Funkenstrecke ausgelöst.

Nach Abschluss der Messung muss, um sich wieder gefahrlos der Anlage nähern zu können, zuerst die „High Voltage“ Taste zur Unterbrechung des Ladevorganges unmittelbar nach der Messung betätigt werden. Anschließend müssen die Kondensatoren mit Hilfe der Erdungsschalter geerdet werden, dazu muss die Taste „Earthing Switch“ betätigt werden. Um eine Beschädigung der Erdungsschalter zu verhindern, muss stets darauf geachtet werden, dass die Kondensatoren nicht schon durch das Nachladen der Ladeeinrichtung auf eine zu hohe Spannung aufgeladen sind. In einem solchen Fall empfiehlt es sich die Messung zu wiederholen und sofort nach dem Impuls die „High Voltage“ Taste zu drücken. Sind weitere Messungen geplant, empfiehlt es sich die „Main Contactor“ Taste nicht zu drücken, da ansonsten die primäre Ladespannung vor jeder Messung neu eingestellt werden muss.

A.5 WIEDERINBETRIEBNAHME DER STOßSTROMANLAGE

Im Zuge der Wiederinbetriebnahme wurden erste Vorversuche mit der Stoßstromanlage durchgeführt, bei denen der Dämpfungswiderstand zwischen $0,8 \Omega$ und $2,8 \Omega$ variiert wurde. In der Auswertung wurde untersucht, wie sich die Kurvenform in Abhängigkeit des Dämpfungswiderstandes verändert. Es wurde versucht, die genormte Kurvenform $8/20 \mu\text{s}$ durch eine geeignete Auswahl der Dämpfungswiderstände zu generieren.

Die Ergebnisse wurden mit denen der Diplomarbeit von Stefan Jauer [12] verglichen. In weiterer Folge wurde ein Dämpfungswiderstand von $0,561 \Omega$, durch eine Parallelschaltung von fünf $2,8 \Omega$ Widerständen eingebaut, eine Ladespannung von $6,044 \text{ kV}$ eingestellt und somit eine vorgeschlagene Realisierungsvariante aus dieser Diplomarbeit auf die korrekte Kurvenform hin überprüft. Es sollte ein Stoßstrom einer Kurvenform von $8/20 \mu\text{s}$ mit einer Amplitude von 10 kA erzeugt werden.

Im praktischen Versuch wurde der Stoßstrom als erstes an einer kurzgeschlossenen Anordnung erzeugt und ausgewertet. Es zeigte sich, dass die gewünschte Kurvenform mit der vorgeschlagenen Anlagenkonfiguration erzeugt werden konnte. Anschließend wurde ein Prüfling vom Typ E80KV340

in den Aufbau integriert und der Versuch wiederholt. Da die Amplitude des Stoßstroms zu gering war, wurde die Ladespannung in 1 kV Schritten erhöht und weitere Messungen durchgeführt, bis eine Amplitude von 10 kA erreicht wurde. Dafür war eine Ladespannung von etwa 12 kV notwendig. Anschließend musste die Kurvenform auf Einhaltung der Norm überprüft werden. Um die Vorgaben der Norm bezüglich der Kurvenform einzuhalten, durfte der Stoßstrom mit der Form 8/20 μ s folgende Toleranzbereiche nicht überschreiten: eine Stirnzeit von $8 \mu\text{s} \pm 1 \mu\text{s}$ und eine Rückenhalbwertszeit von $20 \mu\text{s} \pm 2 \mu\text{s}$. Diese Anforderungen wurde erfüllt.

A.6 KONFIGURATION DER ANLAGE FÜR VERSCHIEDENE STOßSTROMKURVENFORMEN

Mit Hilfe eines MATLAB-Programmes, welches von Stefan Jauer im Rahmen seiner Diplomarbeit „Transiente Untersuchungen der Kreisparameter einer Stoßstromanlage“ im Jahre 2001 an der Abteilung für Hochspannungstechnik des Institutes für elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik der Technischen Universität Graz erstellt wurde, ist es möglich, die für den gewünschten Stromimpuls elektrische Konfiguration der Stoßstromanlage zu ermitteln.

Als Eingabeparameter werden die gewünschte Amplitude, die Stirn- sowie die Rückenhalbwertszeit eingegeben. Die Software berechnet nun selbstständig, mit welchen Anlagenkonfigurationen ein solcher Stoßstromimpuls zu erzeugen ist. Als Ausgabe erhält man eine Liste mit allen möglichen Konfigurationen, mit welchen ein solcher Stoß zu realisieren ist. Die Ausgabeparameter sind: die Ladespannung U (einstellbar am Bedienpult), die Stoßkapazität C (von $2,5 \mu\text{F}$ bis $80 \mu\text{F}$, je nach Verschaltung der einzelnen Kondensatoren), die Kreisinduktivität L und den Kreiswiderstand R , welcher mit Hilfe der Dämpfungswiderstände beeinflusst werden kann.

Im folgenden Abschnitt wird die Bedienung dieses Programmes anhand eines Beispiels erläutert.

Realisierung eines 8/20 μ s Stoßstromes mit einer Amplitude von 10 kA

Übergabeformat der Parameter des MATLAB-Programmes von Stefan Jauer:

```
[u,c,l,r]=RECHNEN(10,8,20)
```

Tabelle A-1: Ausgabeliste des MATLAB-Programmes mit Kennwerten der erforderlichen Anlagenkonfiguration, um die gewünschte Impulsform und Amplitude zu erhalten

U_{Lade}	$C_{Sto\beta}$	L_K	R_D
kV	μF	μH	Ω
48,36	2,50	24,78	2,06
24,17	5,00	12,39	1,03
16,11	7,50	8,26	0,68
12,08	10,00	6,19	0,51
9,67	12,50	4,95	0,41
8,05	15,00	4,13	0,34
6,90	17,50	3,54	0,29
6,04	20,00	3,09	0,26
5,34	22,50	2,75	0,23
4,83	25,00	2,47	0,21
4,39	27,50	2,25	0,18
4,02	30,00	2,06	0,17
3,71	32,50	1,90	0,16
3,45	35,00	1,77	0,14
3,22	37,50	1,65	0,14
3,02	40,00	1,54	0,13
2,84	42,50	1,45	0,12
2,68	45,00	1,38	0,11
2,54	47,50	1,30	0,11
2,41	50,00	1,23	0,10
2,30	52,50	1,18	0,10
2,20	55,00	1,13	0,09
2,10	57,50	1,11	0,09
2,01	60,00	1,03	0,09
1,93	62,50	0,99	0,08
1,85	65,00	0,95	0,08
1,79	67,50	0,92	0,08
1,72	70,00	0,89	0,07
1,66	72,50	0,85	0,07
1,61	75,00	0,83	0,07
1,56	77,50	0,80	0,07
1,51	80,00	0,77	0,06

In unseren praktischen Versuchen bestand eine Kondensatorgruppe aus jeweils 4 parallel geschalteten Kondensatoren mit je 2,5 μF . Somit waren Stoßkapazitäten von 10 μF , 20 μF , 30 μF , 40 μF , 50 μF , 60 μF , 70 μF und 80 μF realisierbar.

ANHANG B – FESTLEGEN EINES HOCHSPANNUNGSSEITIGEN DÄMPFUNGSWIDERSTANDES

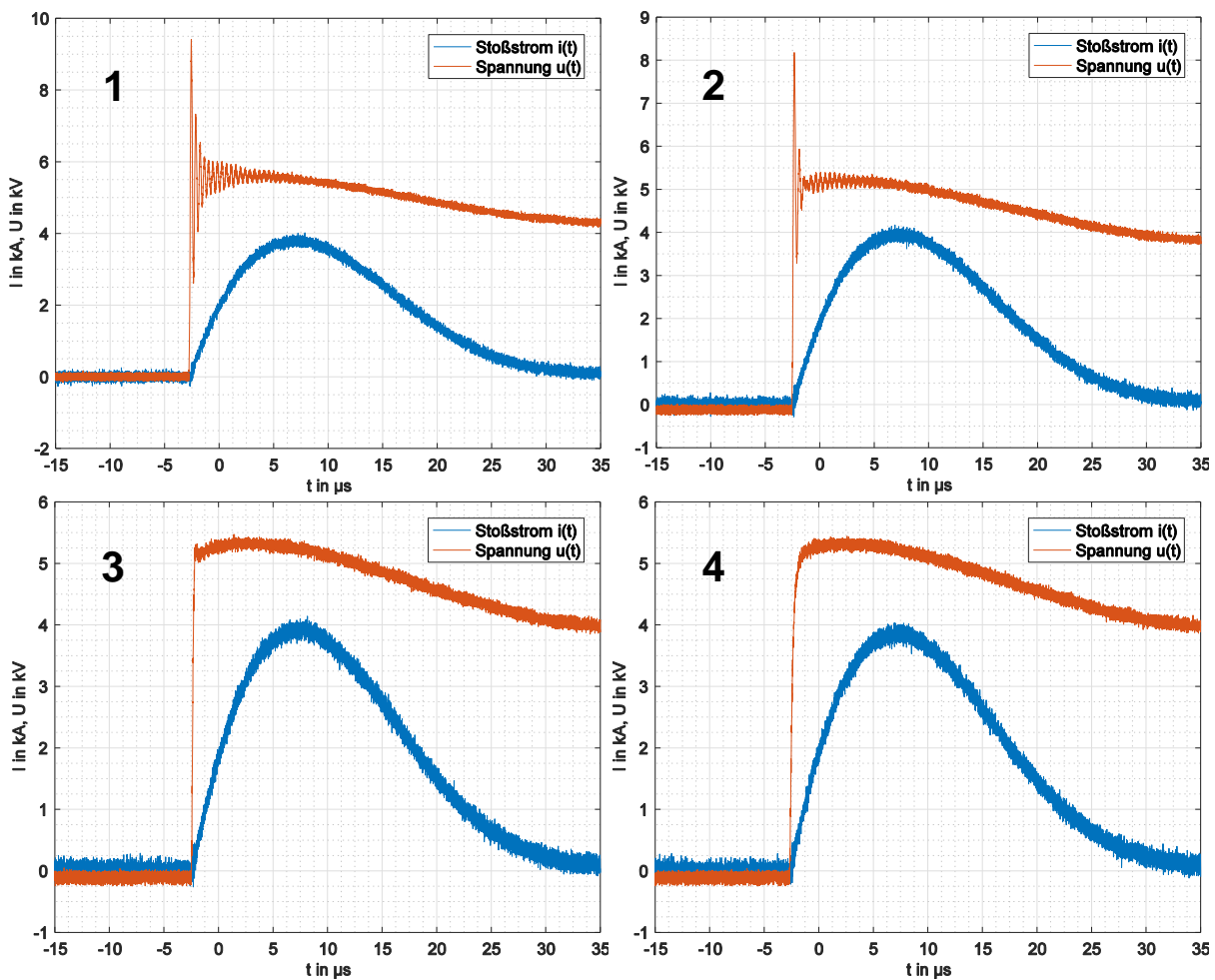


Bild B-1: Strom- und Spannungsverlauf an einer Metalloxid-Ableiterscheibe vom Typ E80KV342 bei Variation des hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes R_d

- (1) $R_d = 0 \Omega$
- (2) $R_d = 30 \Omega$
- (3) $R_d = 125 \Omega$
- (4) $R_d = 250 \Omega$

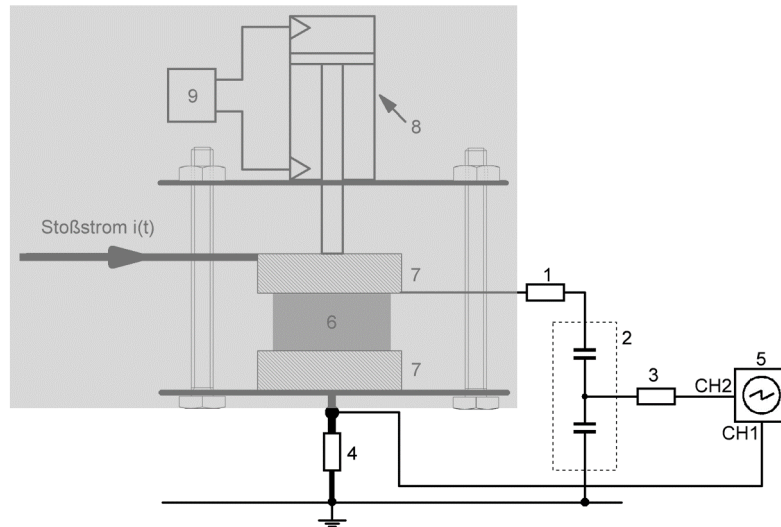


Bild B-2: Messaufbau zur Festlegung des passenden Dämpfungswiderstandes

- (1) Hochspannungsseitiger Dämpfungswiderstand R_d
- (2) Kapazitiver Hochspannungsteiler
- (3) Widerstand zur Längsanpassung R_a
- (4) Shuntwiderstand R_{sh} , zur Messung des Stoßstromes
- (5) Oszilloskop mit Tastkopf 1:10 für den Strom bzw. 1:100 für die Spannung
- (6) Metalloxid-Ableiterscheibe
- (7) Kontaktelektroden
- (8) Druckluftzylinder
- (9) Druckluftsteuereinheit

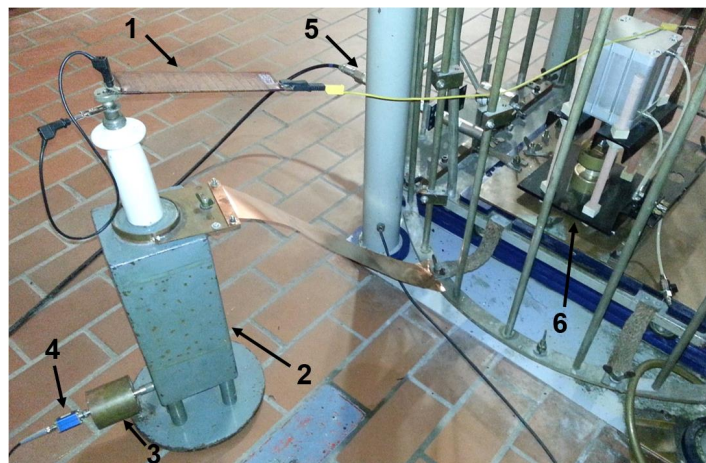


Bild B-3: Aufbau zur Bestimmung des hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes R_d

- (1) Hochspannungsseitiger Dämpfungswiderstand R_d
- (2) Hochspannungsseitige Kapazität des Teilers „Siemens Normal-Kondensator“
- (3) Unterseitige Kapazität
- (4) Widerstand zur Längsanpassung R_a
- (5) Shuntwiderstand R_{sh} , zur Messung des Stoßstromes
- (6) Haltevorrichtung mit Metalloxid-Ableiterscheibe

Wie im Bild Nr. 1 von Bild B-1 zu erkennen, kommt es ohne den Einsatz eines hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstandes R_d zu Oszillationen der Spannung $u(t)$. Um dieses ungewünschte Verhalten zu vermindern, wurden mehrere Messungen mit unterschiedlichen hochspannungsseitigen Dämpfungswiderständen durchgeführt, um so einen optimalen Widerstandswert für den Dämpfungswiderstand zu ermitteln. Bild Nr. 2 zeigt die Messung mit einem hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand in der Höhe von 30Ω , dabei ist der Effekt durch das Integrieren eines Widerstandes bereits gut durch eine Verminderung der Amplitudes des Überschwingens zu erkennen. In Bild Nr. 3 ist die Messung mit einem hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand von 125Ω dargestellt, bei dieser Messung wurde das beste Ergebnis erzielt und somit wurde dieser Widerstandswert bei allen Messungen der Spannung am Ableiter bei einer Beanspruchung mit Stoßstrom verwendet. Bild Nr. 4 ist ein gutes Beispiel für einen zu großen hochspannungsseitigen Dämpfungswiderstand. Hierbei wird bereits der Anstieg des Signals deutlich gedämpft, was die Messung natürlich verfälscht und die Performance des transienten Messsystems mindern würde.

ANHANG C – DIAGRAMME DER BESCHLEUNIGTEN ALTERUNGSVERSUCHE

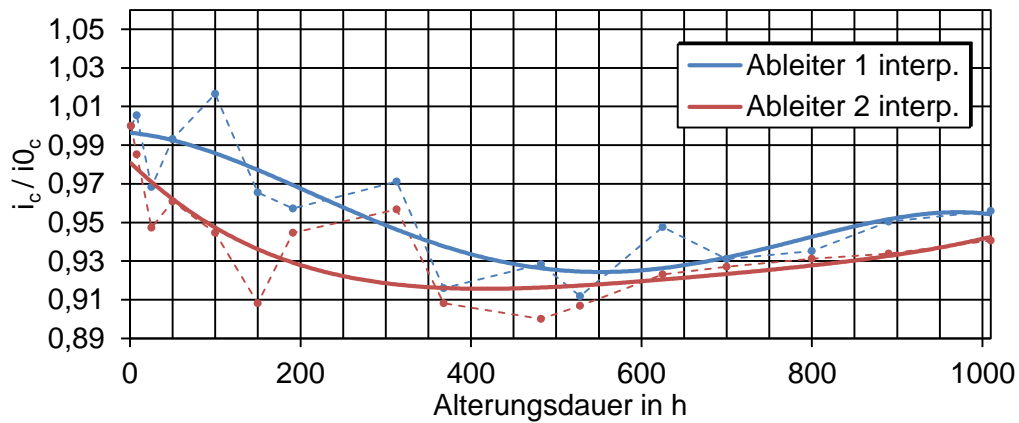


Bild C-1: Verhalten des durch die Metalloxid-Ableiterscheiben fließenden Leckstromes i_c mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert i_{0c}

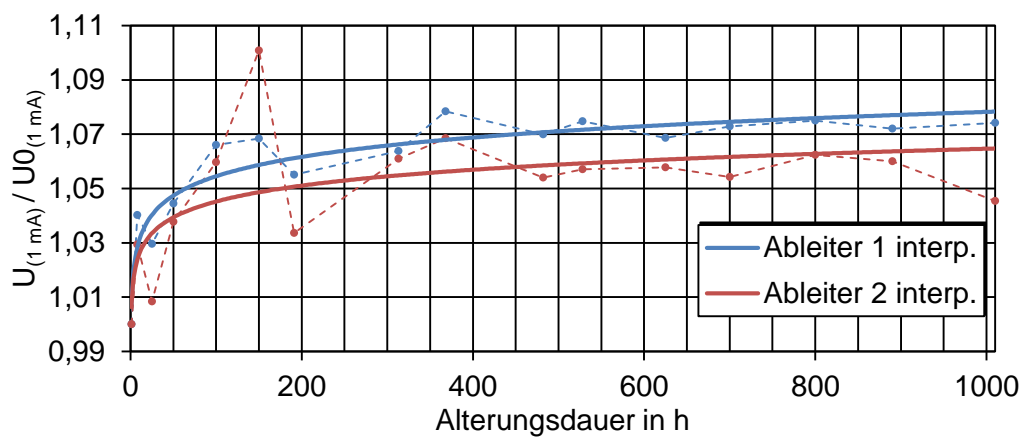


Bild C-2: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(1\text{ mA})}$

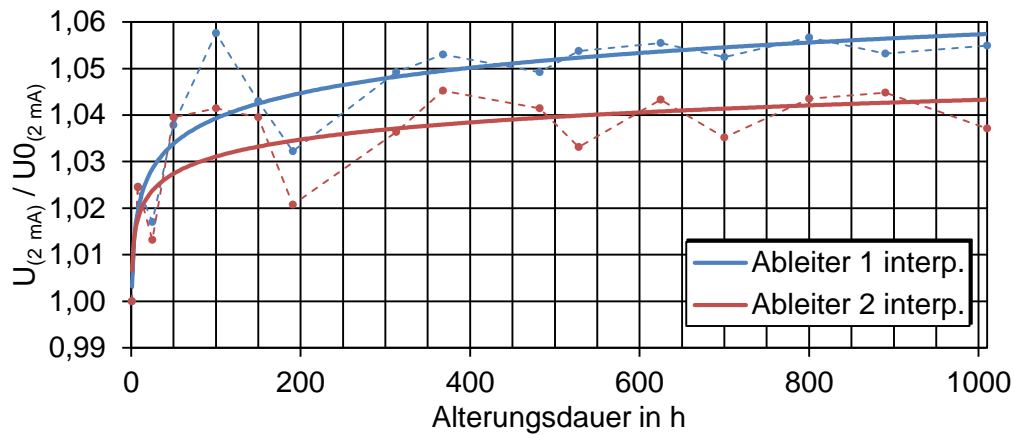


Bild C-3: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(2 \text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(2 \text{ mA})}$

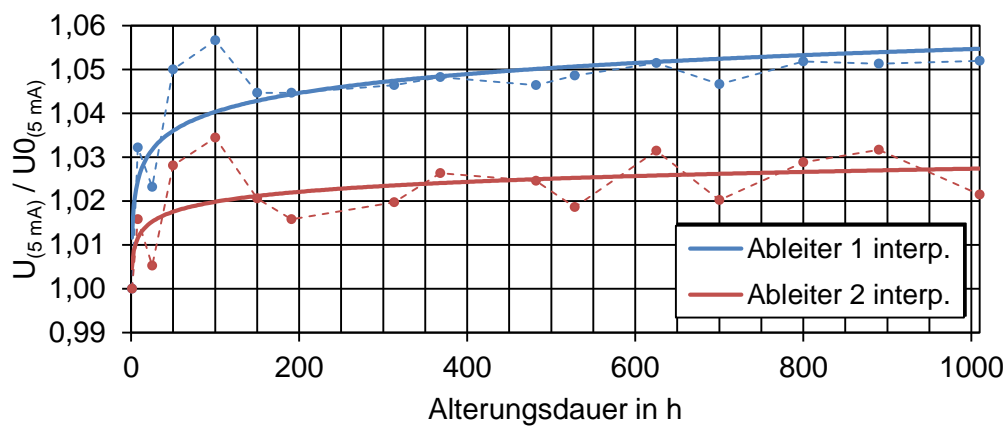


Bild C-4: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(5 \text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(5 \text{ mA})}$

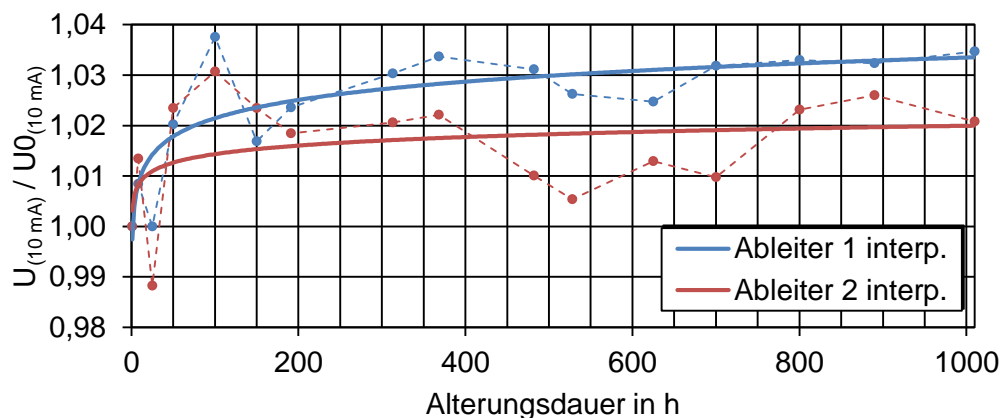


Bild C-5: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(10 \text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(10 \text{ mA})}$

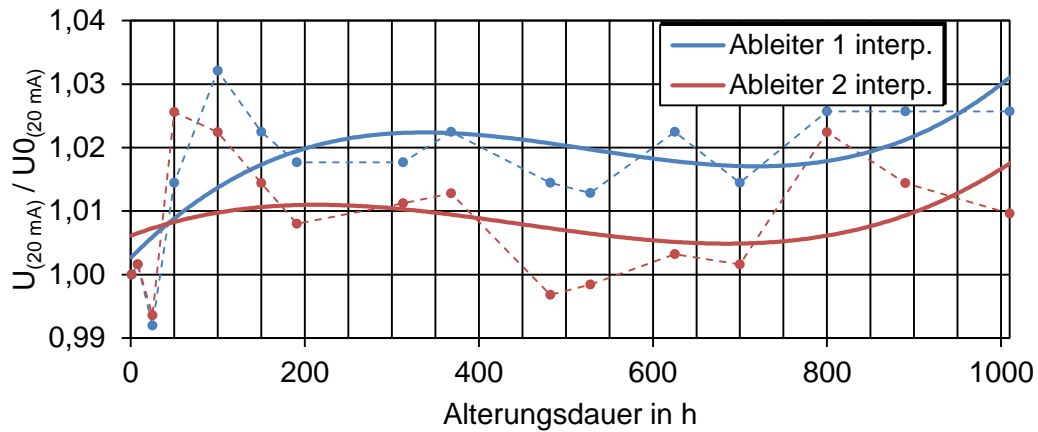


Bild C-6: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(20\text{ mA})}$ mit fortschreitender Alterungsdauer, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(20\text{ mA})}$

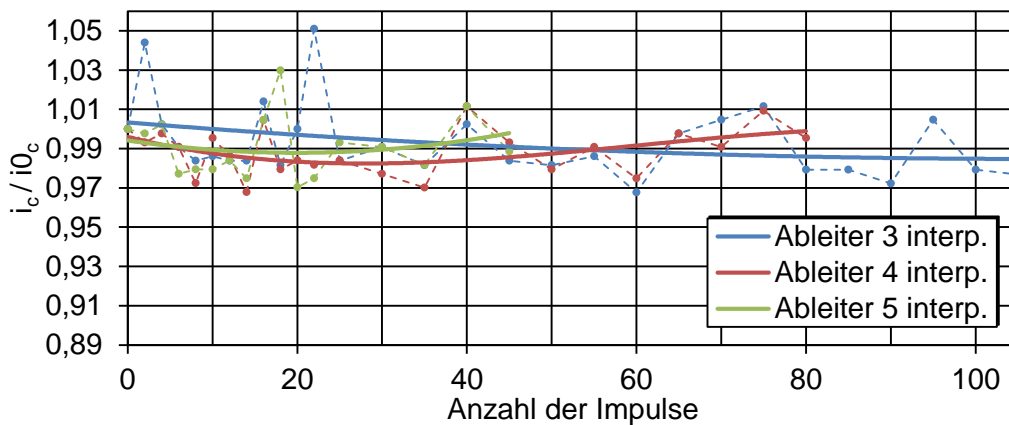


Bild C-7: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe umgesetzten Verlustleistung P_{vert} mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $P_{0\text{vert}}$

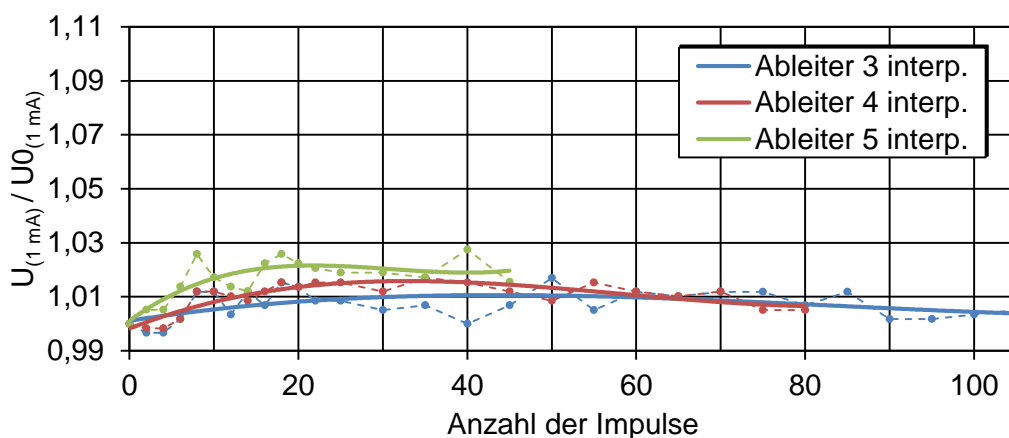


Bild C-8: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(1\text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(1\text{ mA})}$

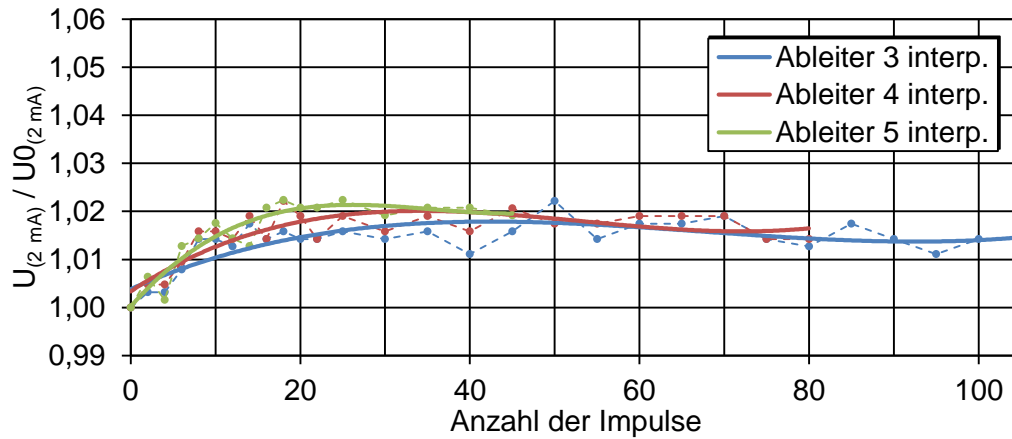


Bild C-9: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(2 \text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(2 \text{ mA})}$

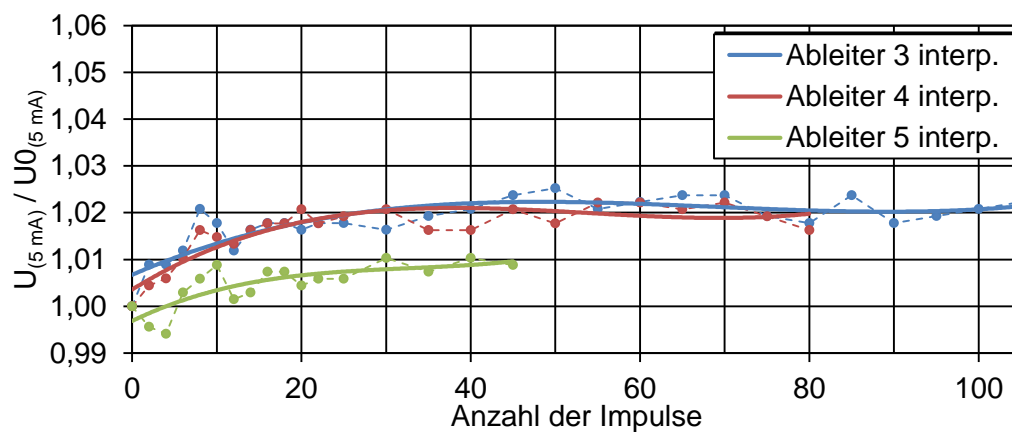


Bild C-10: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(5 \text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(5 \text{ mA})}$

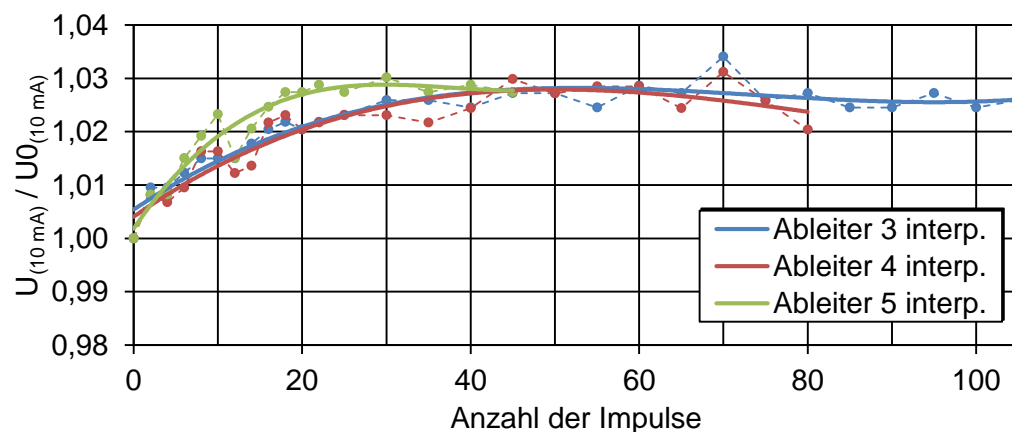


Bild C-11: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(10 \text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(10 \text{ mA})}$

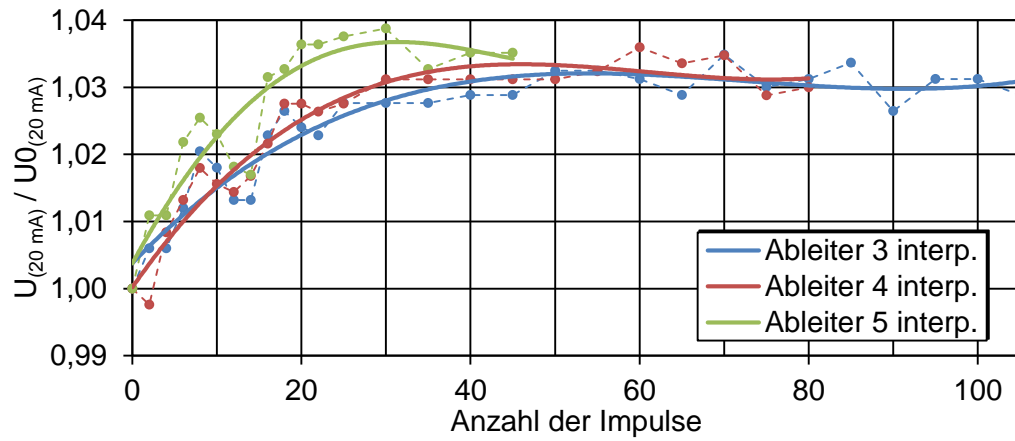


Bild C-12: Verhalten der an der Metalloxid-Ableiterscheibe abfallenden Spannung $U_{(20\text{ mA})}$ mit steigender Anzahl der Beanspruchungen, bezogen auf den ersten Messwert $U_{0(20\text{ mA})}$

ANHANG D – STEUEREINHEIT DES THERMISCHEN ALTERUNGSPRÜFSTANDES

In Bild D-1 ist die Hauptsteuereinheit abgebildet, welche sich außerhalb des thermischen Alterungsprüfstandes befindet. Diese wurde eigens der Anforderungen für das beschleunigte thermische Alterungsverfahren aufgebaut.



Bild D-1: Hauptsteuereinheit außerhalb des Alterungsprüfstandes

- (1) „Not-Aus“
- (2) „Ein“-Taster
- (3) „Aus“-Taster
- (4) Anschluss des PHYWE Stelltransformators
- (5) Einrichtung zum Einstellen des maximal zulässigen Stromes

Diese Einrichtung ermöglicht es, von außerhalb und gefahrlos die Versorgung des gesamten Prüfstandes ein- bzw. auszuschalten, den Primärstrom des Hochspannungstransformators durch eine Überstromschutzeinrichtung zu begrenzen, sowie die Not-Aus Funktion zu betätigen. Ist der Prüfstand unter Spannung, wird dies durch die rote, blinkende Warnleuchte innerhalb des Prüfstandes bzw. durch das Leuchten der grünen Lampe an der Hauptsteuereinheit signalisiert. Der Überstromschutz sollte so eingestellt werden, dass der Hochspannungstransformator nicht unzulässig belastet bzw. beschädigt wird. Bei Erreichen des eingestellten Maximalstromes löst die Überstromschutzeinrichtung aus, und das gesamte beschleunigte Alterungsverfahren wird abgeschaltet und so eine Beschädigung der verbauten Komponenten verhindert. Da die Hauptsteuereinheit so ausgelegt wurde, dass sie sich im Falle einer Unterbrechung der Energieversorgung oder einer Auslösung durch den Überstromschutz nicht wieder selbstständig einschaltet, ist, um den Versuch wieder zu starten, eine erneute Betätigung des „Ein“-Tasters erforderlich. Der Schaltplan der Hauptsteuereinheit ist in Bild D-2 dargestellt.

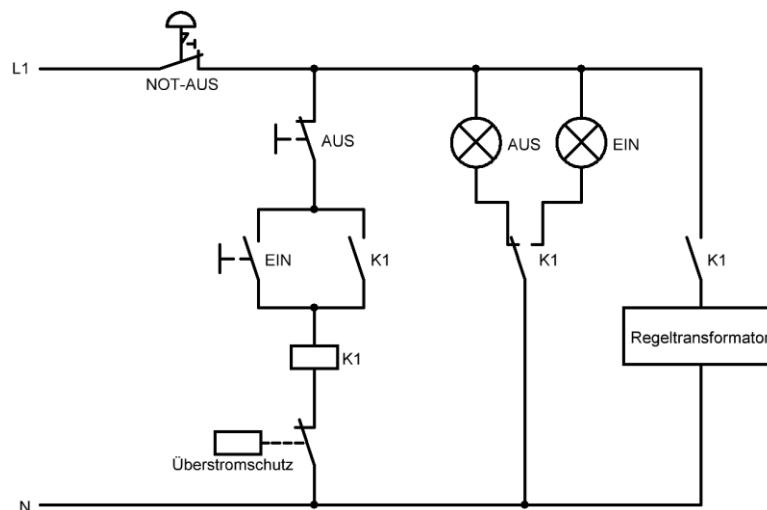


Bild D-2: Schaltplan der Steuerung des Alterungsversuchsstandes

Die Schaltung in der Hauptsteuereinheit entspricht einer sogenannten Selbsthaltungsschaltung, die durch Betätigen des „Ein“-Tasters den Stelltransformator mit Spannung versorgt. Die Schaltkontakte mit den Bezeichnungen K1 werden durch ein Relais gesteuert, welches unter anderem für die Selbsthaltung verwendet wird. Durch das Betätigen des „Aus“-Tasters oder einem Ansprechen des Überstromschutzes wird der gesamte beschleunigte Alterungsversuch abgeschaltet, indem die Erregerspule des Relais vom Netz getrennt wird.

ANHANG E – GERÄTEVERZEICHNIS

Messeinrichtungen

Wärmebildkamera FLIR E60 mit einer Bildrate von 30 fps

Vielfachmessgerät des Herstellers V&A vom Typ VA18B
Genauigkeit im verwendeten AC-Spannungsmessbereich von 6 V bzw. 60 V: $\pm (1 \% + 3 \text{ Digit})$

Vielfachmessgerät des Herstellers Fluke vom Typ 89-IV
Genauigkeit im verwendeten AC-Strommessbereich bis 50 mA: $\pm (0,75 \% + 20 \text{ Digit})$

Vielfachmessgerät des Herstellers Amprobe vom Typ DM9C
Genauigkeit im verwendeten AC-Spannungsmessbereich von 4 V bzw. 40 V: $\pm (1,3 \% + 5 \text{ Digit})$

Hochspannungstastkopf des Herstellers Voltcraft vom Typ HVP-40
Übertragungsverhältnis: 1:1000
Genauigkeit im verwendeten AC-Spannungsmessbereich von 1 kV bis 15 kV: $\pm (2 \%)$

Oszilloskop Yokogawa DLM 2054

Modulartastkopf 1:10 des Herstellers Testtec vom Typ TT-HF 312

Modulartastkopf 1:100 des Herstellers PMK vom Typ PHV 641-L

Transienter Hochspannungsteiler bestehend aus Siemens Normalkondensator mit 1000 pF und zugehöriger Unterkapazität mit 56,9 nF

Shuntwiderstand in Röhrenbauform mit 5,13 m Ω

Elektrische Einrichtungen

HAFELY Stoßstromgenerator
Hochspannungstransformator MWB TEO 100/10 mit 5 kVA
Hochspannungstransformator Dipl.-Ing. Huemer & Ziegler mit 60 VA
Stelltransformator MWB SRP 0,5/5 5 kVA 0...230 V
PHYWE Stelltransformator 380 VA 0...230 V
Einstellbarer Prüf Widerstand mit max. 400 Ω
Steuereinheit des thermischen Alterungsprüfstandes

Sonstige Einrichtungen

Wärmeschrank des Herstellers Binder vom Typ FD115 E2
Feuchte- und Temperaturmesswertgeber des Herstellers VAISALA vom Typ HMT 333
Luftfeuchtemessgerät des Herstellers EXTECH vom Typ 445703

ANHANG F – THOMA-REGLER

Beim sogenannten Thoma-Regler ist die sekundäre Blankwicklung drehbar angeordnet [18]. Der Abgriff der Spannung erfolgt mit einer Bürste, die sich frei auf den drehbar gelagerten Windungen bewegen kann und somit eine stufenlose Regelung der Spannung ermöglicht [8]. Durch diese stufenlose Regelbarkeit hat der Thoma-Regler im Vergleich zu einem Stelltransformator, welcher die Spannung nur in gewissen Stufen bedingt durch dessen Aufbau regeln kann, einen nicht unerheblichen Vorteil für die Untersuchungen an Metalloxid-Ableiterscheiben.

Bild F-1 zeigt einen Thoma-Regler.

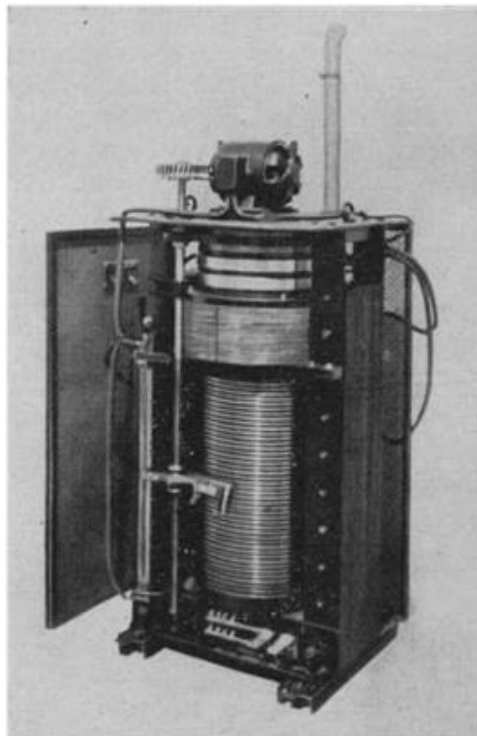


Bild F-1: Thoma-Regler für 100 kVA, 0 bis 380 Volt [18]