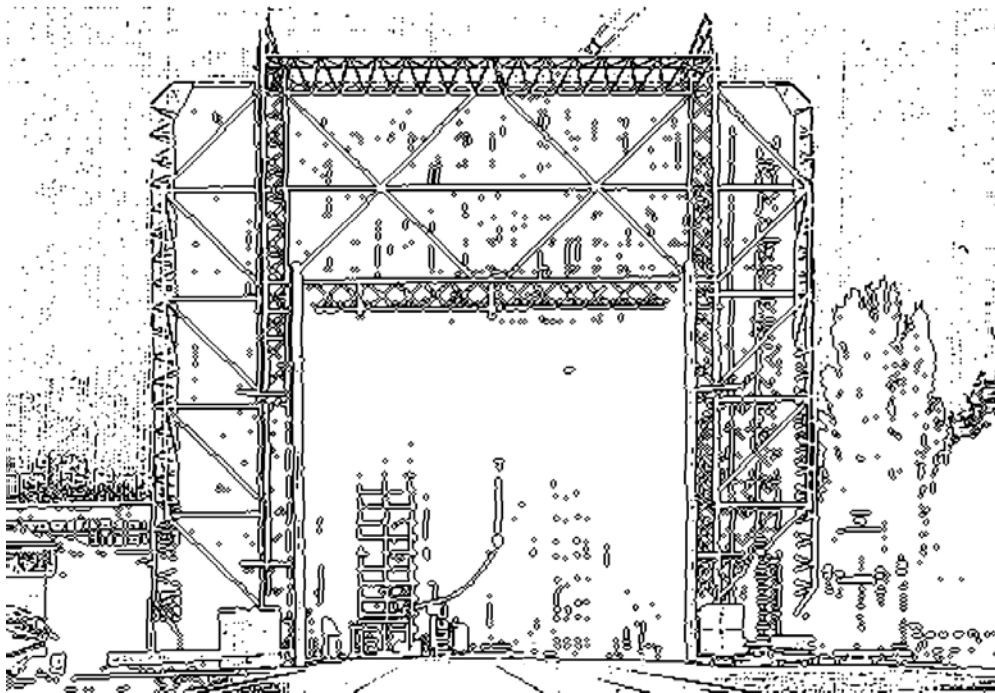


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**MASTERARBEIT**

Michael Walch, BSc

Oktober 2014



INSTITUT FÜR  
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT

UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

# THERMISCHE UNTERSUCHUNG AN EINEM KOTEF 220-kV-KOMBIWANDLER

THERMAL INVESTIGATION OF A COMBINED INSTRUMENT TRANSFORMER -  
KOTEF 220-kV

Masterarbeit

durchgeführt an der



Technischen Universität Graz

am



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, im Sommersemester 2014

Verfasser: Michael Walch, BSc  
Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz  
Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebene Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

Meinem Vater Georg († 2011)

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH an der Technischen Universität Graz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz, der mir diese Arbeit ermöglichte und mich allzeit während der Abschlussarbeit und während meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt unterstützt hat.

Besonders möchte ich hier Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Plesch danken, der durch seine Messprogramme zur Realisierung der Regelung beitrug.

Kollegialen Dank gebührt den Mitarbeiter der Versuchsanstalt und des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, die mich durch zahlreiche fachliche Gespräche unterstützten.

Ausdrücklich danke ich hier auch Barbara Müllner für die Korrekturen dieser Masterarbeit und der Unterstützung während der Erstellung.

Graz im Oktober 2014

Michael Walch

# I. Kurzfassung

Die voranschreitende Energiewende in Europa stellt die nationalen Übertragungsnetzbetreiber vor neue Herausforderungen. Der schnelle Ausbau der Wind- und Solarenergie und die daraus resultierende, nicht im Voraus berechenbare, Energieproduktion in Europa fordert umso mehr ein zuverlässiges und stabiles Netz.

Durch lange Vorlauf- und Genehmigungszeiten für neue Energietransportprojekte, wie der Bau von neuen Trassen oder der zusätzlichen Installation von Leitersystemen, kann es im Netz zu Engpässen kommen. Für den Netzbetreiber gewinnt dadurch die Betriebssicherheit der Betriebsmittel immer mehr an Bedeutung.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit frühzeitigen Ausfällen von Kombimessewandlern der 220-kV-Spannungsebene. Der gemeinsame Nenner der Ausfälle liegt in der Seriennummer bzw. dem Baujahr sowie im Ausfall nach einer Hitzeperiode.

Die Untersuchung beschäftigte sich mit dem thermischen Verhalten des Kombiwandlers und dessen Klemmverbindungen. Ein Wärmeeintrag bzw. Wärmeverzug durch lokale Hot-Spots wurde durch die Variation des Anzugsmomentes der Klemmverbindungen untersucht.

Zur Untersuchung wurde im Prüffeld eine Wärmekabine installiert. Die Untersuchungen wurden in 40°C Umgebungstemperatur und mit 1575 A durchgeführt.

Es wurden Prüfvorbereitungen für die Dauerversuche mit dem thermischen Strom durchgeführt. Im Prüffeld wurde ein Dauerversuch für die Vergleichsuntersuchung zum idealen und realen Wandleranschluss im Prüffeld vorgenommen. Begleitend zu den Messungen wurden Ölproben zur Wasser- und Gasgehaltsbestimmung am Prüfobjekt entnommen, Abschätzungsberechnungen gemacht und Simulationen erstellt.

## **Stichwörter:**

- Kombimessewandler
- thermische Untersuchung
- Wärmeeintrag
- Klemmverbindungen
- Dauerversuch

## II. Abstract

In the century of the energy-revolution through Europe, network operators have to overcome new challenges. Due to the production of wind and solar power and the fluctuation of energy production, a reliable, capable and stable grid is becoming more important.

New projects in the energy industry, like new lines, have a time-consuming approval process. During the realization of investments, the power demand also increasing constantly. Hence the reliability of the installed equipment has to be ensured.

This paper investigates a 220 kV combined instrument transformer and deals with the research of the thermal behaviour of this equipment. This was prompted by some abnormal failures of two instrument transformers in the Austrian Power Grid (APG) after a heat wave in summer 2013.

In the test facility a heat chamber was installed. The inspections had been carried out at 1575 A by an ambient temperature of 40°C. The thermal behaviour of the system, the heat development of the primary current winding and its contact joints, were the main focus of the investigation. Simulations and calculations of the ampacity and the resistance had been undertaken.

Endurance tests, to estimate the development of moisture, as well as oil samplings for moisture and gas-in-oil analyses were taken in the lab.

### **Keywords:**

- combined instrument transformer
- thermal investigation
- heat introduction
- clamp-connection
- endurance test

# III. Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Messwandler im Hochspannungsnetz</b> .....	<b>4</b>
3.1	Spannungswandler .....	4
3.1.1	Induktive Spannungswandler .....	4
3.1.2	Kapazitive Spannungswandler.....	6
3.2	Stromwandler.....	7
3.2.1	Ausführungsformen.....	8
<b>4</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>11</b>
4.1	Öl-Papier-Isolierung.....	11
4.1.1	Mineralöl .....	13
4.1.2	Isolierpapier.....	18
4.1.3	Feuchte Wechselwirkung zwischen Öl und Papier.....	21
4.2	Erwärmungsvorgang bei Messwandlern .....	23
4.2.1	Wärmequellen.....	27
4.2.2	Stromverdrängung.....	28
4.2.3	Wärmedurchschlag.....	31
4.3	Stromtragfähigkeit.....	32
4.3.1	Klemmverbindungen .....	32
<b>5</b>	<b>Untersuchungsobjekt Kombiwandler 220-kV</b> .....	<b>35</b>
5.1	Wandleraufbau.....	35
5.2	Fehlerbild KOTEF 220-kV, Baujahr 2006.....	37
5.3	Berechnungen .....	39
<b>6</b>	<b>Untersuchungsanordnung</b> .....	<b>43</b>
6.1	Untersuchungsablauf .....	43
6.2	Prüffeld .....	47
6.2.1	Aufbau der Prüfkabine .....	47
6.2.2	Strombeaufschlagung.....	49
6.2.3	Magnetische-Felder im Nah-/Verkehrsbereich.....	51
6.2.4	Messtechnik.....	52
6.2.5	Sicherheitstechnik .....	55
6.2.6	Regel- und Messkreisautomatisierung.....	56



<b>7</b>	<b>Untersuchungen.....</b>	<b>59</b>
7.1	Kalibrierung der Thermoelemente.....	59
7.2	Widerstandsmessung – WI_DC.....	61
7.2.1	Aufbau der Messung.....	62
7.2.2	Messergebnisse.....	65
7.2.3	Berechnungen.....	65
7.3	Einfluss des Anzugsmomentes – AM_AS_#.....	67
7.4	Bestimmung der Zeitkonstante – EW_ZK_AS.....	73
7.5	Dauerversuch – DA_VG_AS.....	76
7.6	Ölmessungen – ÖM_KF_/ÖM_DGA_#.....	80
7.6.1	Ölentnahme.....	80
7.6.2	Messergebnisse – Karl-Fischer-Titration.....	81
7.6.3	Messergebnisse – DGA, Verbund Umwelttechnik.....	84
<b>8</b>	<b>Weiterführende Untersuchungen.....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>88</b>
<b>V.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>90</b>
<b>VI.</b>	<b>Diagrammverzeichnis.....</b>	<b>92</b>
<b>VII.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>93</b>
<b>VIII.</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>95</b>
<b>IX.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>96</b>

## IV. Abkürzungen zum Thema

$A_K$	Abgabevermögen Konvektion
$A_S$	Abgabevermögen Strahlung
$A_\vartheta$	Wärmeabgabevermögen
$C_\vartheta$	Wärmekapazität
$E$	elektrische Feldstärke
$J_\vartheta$	Wärmestromdichte
$K$	absolute Temperatur
$\dot{Q}$	Wärmemenge
$Q_e$	zugeführte Wärmemenge
$Q_v$	abgeführte Wärmemenge
$R_\vartheta$	Thermischer Widerstand
$T_\vartheta$	absolute Übertemperatur
$U$	elektrische Spannung
$W_d$	dielektrische Verlustleistung
$c_K$	spezifische Wärme
$c_L$	Konvektionsbeiwert Luft
$c_S$	Wärmekapazität
$\gamma_p$	Porengröße
$\gamma_z$	Porengröße Zellulose
$\varepsilon$	Materialkonstante
$\lambda_\vartheta$	Wärmeleitfähigkeit
$\vartheta_{\ddot{u}}$	Übertemperatur
$\vartheta_{max}$	maximale Temperatur
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
$I_{th}$	thermischer Dauergrenzstrom
J	Stromdichte
O	Sauerstoff
OH	Hydroxygruppe
$T_{Amb}$	Umgebungstemperatur
tan $\delta$	Verlustfaktor
$\omega$	Kreisfrequenz
F	Kraft in Nm

# 1 Motivation

Hochspannungs-Messwandler sind essentielle Betriebsmittel für den problemlosen Betrieb eines Hochspannungsnetzes. Messwandler werden als einfache Spannungs- oder Stromwandler, beziehungsweise auch als Kombiwandler, Strom- und Spannungsmessung in Einem, ausgeführt.

Im Netz des österreichischen Übertragungsnetzbetreibers, der APG – Austrian Power Grid, sind Kombiwandler in der 110-kV und 220-kV Spannungsebene in Verwendung. Aufgrund vermehrter, atypischer Ausfälle, die bis zum Brand des Wandlers führten, wurde beschlossen, die Kombiwandler einer Untersuchung zu unterziehen.

Nicht nur wegen der Ausfälle, sondern auch aufgrund fehlender Daten und Untersuchungen seitens des Herstellers der Messwandler, sollen aus dem Netz der APG ausgewählte Messwandler auf elektrisches und thermisches Verhalten untersucht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Konzeptionierung der Untersuchung, des Untersuchungsablaufes und des Aufbaus sowie die Durchführung erster Untersuchungen durchgeführt werden. Der Aufbau soll eine konstante Temperatur von 40°C und Prüfströme bis 3150 A ermöglichen.

Die Untersuchungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit sollen das Temperaturverhalten des Primärleitersystems und deren Klemmverbindung sein. Anschließend sollen Dauerversuche mit begleitenden Ölanalysen in Bezug auf Feuchte- und Wassergehalt durchgeführt werden.

Durch die Dauer der Untersuchungen soll diese Arbeit als Grundlage für die weiterführenden Arbeiten dienen. Im Rahmen des gesamten Projektes soll, nach Abschluss der Analyse des ersten Prüfobjektes, ein zweiter, auffälliger Kombimeschwandler untersucht werden.

## 2 Einleitung

In Zeiten der forcierten und notwendigen Energiewende stellt sich die Energiewirtschaft immer neuen Herausforderungen. Durch den stetig steigende Bedarf an elektrischer Energie und aufgrund der langen Vorlaufzeiten für zusätzlichen Trassenbau bzw. zusätzlichen, parallel verlaufenden Systemen, sowie Teilabschnitte, die an ihren Belastbarkeitsgrenzen betrieben werden, wird der zuverlässige und gefahrlose Betrieb aller notwendigen Betriebsmittel wichtiger denn je.

Der Betrieb immer näher am zulässigen Grenzwert fordert vom Betriebsmittelhersteller die Sicherstellung der benötigten Dimensionierung und eine sorgfältigen Fertigung. In diversen Fällen konnte im Laufe der Zeit bei verschiedenen Herstellern aller Arten von Betriebsmitteln einerseits eine zum Teil temporäre, in Bezug auf den Zeitraum von Produktchargen und andererseits eine andauernde Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften beobachtet werden. Begründet liegt dies in vielen verschiedenen Entwicklungen, wie zum Beispiel in der Abwanderung des Know-Hows, dem Kostendruck immer billiger zu produzieren, in der Änderung des Grundstoffes vom Zulieferer oder in der Zusammenlegung von Bereichen oder Standorten.

Im Falle von Kombiwandlern für die 220-kV Ebene wurden Probleme festgestellt die bei zwei von drei bis zum Durchschlag führten. Zudem wurden vom Hersteller Veränderungen am Produktionsprozess und an diversen Einzelteilen vorgenommen und die zulässigen Grenzwerte lediglich hochgerechnet und nicht getestet.

Es wurden Ausfälle von Chargen direkt nach längeren Hitzeperioden beobachtet. Diese Tatsache deutet auf ein thermisches Problem hin. Um einen Wärmeeintrag durch Leiterseil, Seilklemmen, Verschaltungsverbindungen oder Federscheiben auszuschließen, wurden die Stromtragfähigkeit und die Verbindungs-/Kontaktwiderstände näher untersucht und beschrieben. Die thermische Untersuchung mit dem zulässigen Grenzstrom wurde weiters in einer eigens dafür aufgebauten Prüfkabine durchgeführt. Die Regelung der Umgebungstemperatur von 40°C wurde über Temperatursensoren und Heiz-/Umlüfter durch ein Mess- und Regelprogramm realisiert.

Während des thermischen Dauerversuchs werden Ölproben zur DGA (Dissolved Gas Analyses) und Wassergehaltsmessung entnommen und überprüft. Die Entwicklung der Oberflächentemperatur an den Verschaltungen und Klemmen des Wandlers werden mittels einem 16-fach Temperaturmessgerät und einer darauf gerichteten Infrarot-Kamera untersucht. Der Vergleich zwischen optimaler und realer Anbindung soll für

weitere Empfehlungen zur Handhabung, zu den Anforderungen und zum Anschluss an den Messwandler führen.

Durch betriebsbedingte Temperaturunterschiede sind Isolations- und Dichtungskomponenten zusätzlicher thermischer Belastung ausgesetzt. Das sogenannte Atmen des Wandlers, die Ausdehnung und Beruhigung, wird durch zyklische Stromeinprägung nach den thermischen Zeitkonstanten beobachtet.

Zudem sollten weiterführende Untersuchungen beschrieben und vorbereitet werden.

### 3 Messwandler im Hochspannungsnetz

Messwandler im Hochspannungsnetz haben vorwiegend die Aufgabe betriebsfrequente Ströme und Spannungen zu erfassen. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten müssen sie außerdem Störungen durch Über- oder Unterspannung und Erd- oder Kurzschlüsse detektieren können [1, 2].

In der Mittelspannungsebene findet man meist Sammelschienen-Spannungswandler und Stromwandler in den Abzweigen. In Hochspannungsschaltanlagen von 110-kV und mehr werden hingegen in jedem Abzweig Strom- und Spannungswandler installiert. Durch diese Anordnung im Umspannwerk wird eine hohe Selektivität des Netzes erreicht. [3]

Literaturbedingt werden in diesem Kapitel die Grundlagen und die verschiedenen Ausführungsformen von Strom- und Spannungswandlern behandelt. Die Ausführungsformen und Eigenschaften der Spannungswandler in Topfbauweise und Stromwandler in Kopfbauweise sind auf Kombimeswandler, Strom- und Spannungsmessung in einem umlegbar.

#### 3.1 Spannungswandler

Die Klassifikation der Spannungswandler erfolgt auf Hinsicht ihrer Genauigkeit. Wandler für Messzwecke sind in die Genauigkeitsklassen 0,1, 0,2 und 0,5 eingeteilt und werden für Verrechnungsmessungen verwendet. Betriebsmessungen erfolgen hingegen mit Messwandlern der Klassen 1 und 3. Durch die Klassenzugehörigkeit wird der maximal erlaubte Übertragungsfehler und in weiterer Folge der Arbeitsbereich festgelegt. Die Fehlergrenze bei Spannungswandlern für Messzwecke wird in der Regel bei 0,8 bis 1,2-facher Nennspannung und für Schutzzwecke bei 0,05 bis 1,9-facher Nennspannung, eingehalten [2, 4].

##### 3.1.1 Induktive Spannungswandler

Der Aufbau von induktiven Spannungswandlern lässt sich mit dem von Prüftransformatoren vergleichen. Die Erregung erfolgt überspannungsseitig mit der zu messenden Spannung. Das Messsignal wird unterspannungsseitig, welche mit einer Messimpedanz belastet ist, proportional und phasengleich abgegriffen. Üblicherweise liegt die Höhe der Sekundär-Nennspannung bei 100 V bzw.  $100/\sqrt{3}$  V [1].

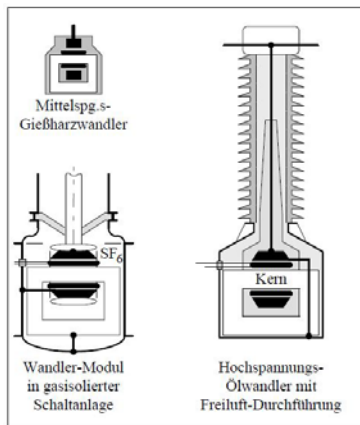


Abbildung 3-1: Ausführungen induktiver Spannungswandler [1]

Im Mittelspannungsbereich werden induktive Spannungswandler in trockener Bauweise, sogenannte Gießharzwandler, verwendet, siehe Abbildung 3-1 links oben. Früher kamen ölarme Wandler mit Quarzsand für vorhandene Zwischenräume als Füllstoff zum Einsatz [5].

Im Hochspannungsnetz werden induktive Spannungswandler in gasisolierten Schaltanlagen mit Folien und  $\text{SF}_6$  als Isolationssystem, und in Freiluftschaltanlagen, mit Öl-Papier-Isolierung, verwendet. Bei einpoligen Wandlern mit Öl-Papier-Isolation wird je

nach Anordnung der Aktivteile konstruktiv zwischen Topf- und Isoliermantelbauweise unterschieden, siehe Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4. Die Bauweise des 800-kV Spannungswandlers als Kaskadenschaltung ermöglicht eine Bemessung jeder Spule von nur einem Viertel der Gesamtspannung. Die verschiedenen Ausführungsformen erlauben einen Einsatz bis über die 800-kV Spannungsebene hinaus [4, 6].

Metallgekapselte  $\text{SF}_6$ -Wandler weisen Gießharz- oder gasimprägnierte Kunststofffolien als Feststoffisolierung auf. Der auf die Mittelspannungsebene begrenzte Einsatz von rein mit Gießharz eingegossenen Wicklungen liegt in dem nicht hohlraumfreien Aufbau der Isolierung und dem damit verbundenen, geringen teilentladungsfreien Einsatzbereich von bis knapp über 100 kV begründet. Eine Kombination von  $\text{SF}_6$  und Gießharzisolierung ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Darin sind mit 1 die Gießharzisolierung, mit 2 die Primärwicklung, mit 3 die Sekundärwicklung, mit 4 der Steckkontakt und mit 5 die Kontakttulpe eines 110-kV- $\text{SF}_6$  Spannungswandlers dargestellt [4].

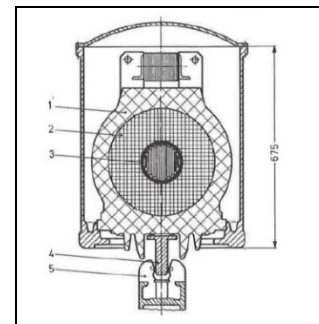


Abbildung 3-2:  $\text{SF}_6$  Spannungswandler, [4]

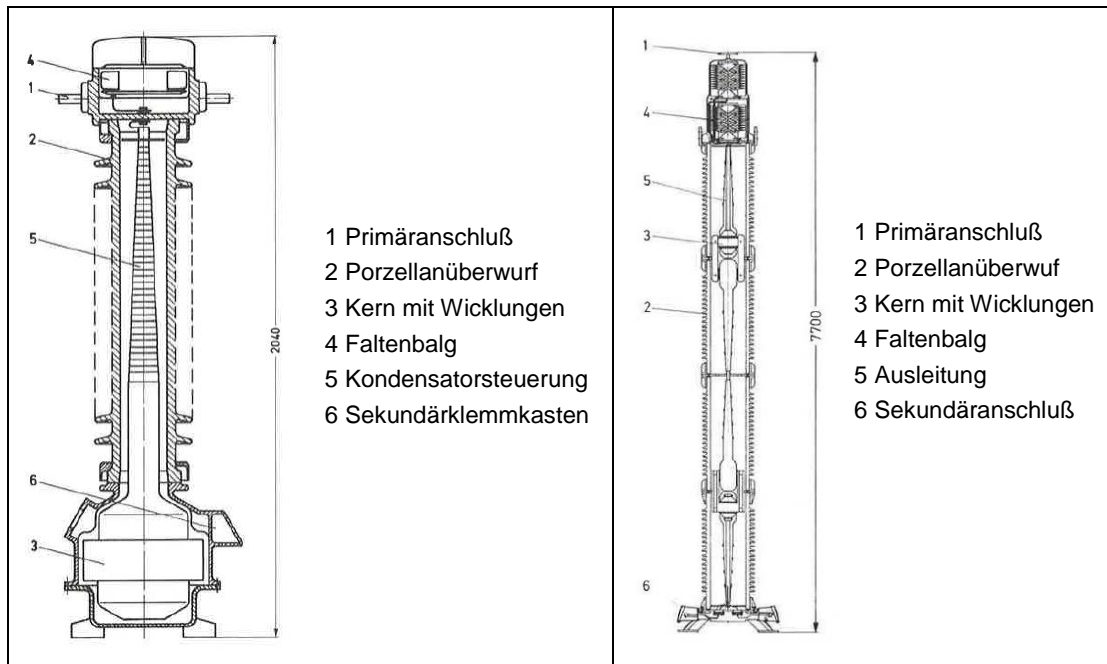


Abbildung 3-3: 110-kV-Spannungswandler [3]  
-Topfbauweise

Abbildung 3-4: 800-kV-Spannungswandler, [4]  
- Kaskadenschaltung,  
- Isoliermantelbauweise

### 3.1.2 Kapazitive Spannungswandler

Im Bereich der Hoch-, speziell in der Höchstspannungsebene sind kapazitive Spannungswandler wirtschaftlicher als induktive, die für diese Spannungen eine hohe Anzahl an Windungen aufweisen müssten. [2]

Der grundsätzliche Aufbau eines kapazitiven Spannungswandlers liegt in der Reihenschaltung von Kondensatorwickeln mit Mittelspannungsabgriff, an der ein induktiver Mittelspannungswandler für die Bereitstellung der genormten Sekundärspannung und gewünschten Potentialtrennung angeschlossen ist, siehe Abbildung 3-5. Dargestellt sind mit 1 der Primäranschluß, mit 2 der Porzellanüberwurf, mit 3 der Hochspannungskondensator, mit 4 die Resonanzdrossel und mit 5 der Zwischenwandler. Primärseitig beläuft sich die zugeführte Spannung im Bereich von 10 bis 30 kV, die, neben einer Öl-Papier ausgeführten Bauweise, eine gießharzummantelte Bauweise des Mittelspannungswandlers zulässt [4].

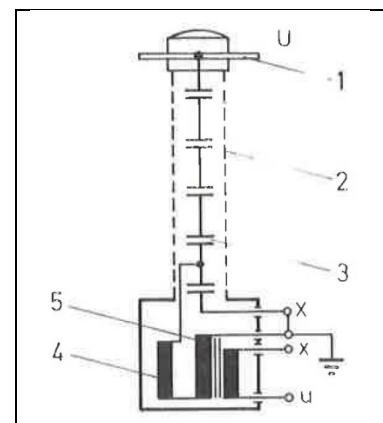


Abbildung 3-5: Kapazitiver Spannungswandler, [4]

Weitere Vorteile eines kapazitiven Spannungswandlers liegen in der möglichen Verwendung als Koppelkondensator oder für die Trägerfrequenzübertragung auf



Hochspannungsleitungen (TFH) zur Informationsübermittlung. In Europa wird diese jedoch zunehmend durch die Lichtwellenleitertechnik verdrängt [2, 4].

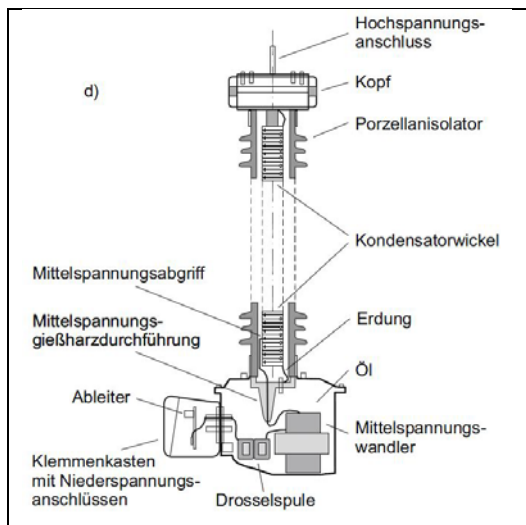


Abbildung 3-6: kapazitiver Spannungswandler Aufbau, [4]

Nicht vernachlässigbare Nachteile des kapazitiven Spannungswandler sind die fehlende Fähigkeit der Ableitung von Restladungen abgeschalteter Anlagenteile und die Anfälligkeit für Schwingungen. Diese Ferroresonanzschwingungen bilden sich zwischen der oberen Teilerkapazität und der in Serie liegenden Hauptinduktivität des Mittelspannungswandlers aus. Dadurch werden erhebliche Überspannungen und eine unzulässige Erwärmung verursacht. Mit Berücksichtigung der zulässigen Messtoleranzen

können Dämpferglieder an der e-n-Wicklung Abhilfe schaffen [2, 4].

### 3.2 Stromwandler

Stromwandler werden rein induktiv aufgebaut und entsprechen ihrer Wirkungsweise jener eines kurzgeschlossenen Transformators. Die Dimensionierung der sekundärseitigen Spule erfolgt nach DIN VDE 0414-44-2, damit im Bemessungsbetrieb ein Nennstrom von 1 A bzw. 5 A gemessen wird. Im Sekundärkreis darf keine Absicherung erfolgen, da Stromwandler mit offenen Sekundärklemmen durch den Spannungsabfall an der vergleichsweise großen Hauptinduktivität unzulässig hohe Ausgangsklemmenspannungen aufweisen würden. Die fehlenden Gegenströme würden überdies im Eisen durch die nicht vorhandene Kompensationswirkung ein starkes Feld erzeugen, was zur Überhitzung und in weiterer Folge zum Eisenbrand führen kann. [2, 4]

Analog zum Spannungswandler werden die Stromwandler nach Verwendungszweck und Genauigkeit in Klassen unterteilt. Zusätzlich steht für Betriebsmessungen die Genauigkeitsklasse 5 zur Verfügung [2, 5].

Einen weiteren Faktor neben der Bemessungsleistung  $S_r$  und der Klasse zur Einteilung eines Stromwandlers stellt der Überstrom-Begrenzungsfaktor  $F_S$  dar. Dieser gibt an, ab welchem Multiplikationsfaktor des primären Bemessungsstroms der Sättigungsbereich der Magnetisierungskennlinie erreicht wird [2, 4].

Im Vergleich zu Spannungswandlern besitzen Stromwandler größere Arbeitsbereiche, für Messzwecke das 0,05- bis 1,2-fache des Messstroms und für Schutzzwecke bis über das 10-fache des Nennstroms. Der notwendig große Messbereich von einigen 100 A im Bemessungsbereich und bis zu 80 kA im Kurzschlussfall erfordert aufgrund der Nichtlinearität der Magnetisierungskennlinie einen Aufbau mit mehreren Kernen, siehe Abbildung 3-7, [2, 4]. Im Vergleich zu Spannungswandlern sind die Übertragungseigenschaften deutlich besser. Die relativ geringe Anzahl an sekundärseitigen Wicklungen resultiert in einem geringen Einfluss von Streuinduktivitäten und Eigenkapazität. Wirbelstromeffekte und nichtlineares Magnetisierungsverhalten begrenzen den Linearitätsbereich [2].

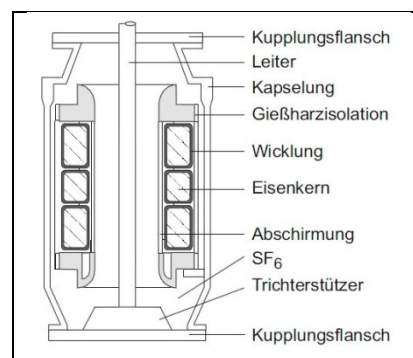


Abbildung 3-7: Mehrfachkern eines SF<sub>6</sub>-isolierten Stromwandlers, [4]

### 3.2.1 Ausführungsformen

Konstruktiv wird zwischen Einleiter- und Wickelstromwandler und abhängig vom Einbauort, zwischen Stützer- und Durchführungswandler unterschieden, dargestellt in Abbildung 3-8. Bei Einleiterstromwandler lassen sich hohe Messleistungen bei wirtschaftlichen Kernabmessungen erst ab 1000 A bewerkstelligen. Der Aufbau als gerader Leiterstab bringt jedoch im Kurzschlussfall die notwendige Festigkeit [4, 5].

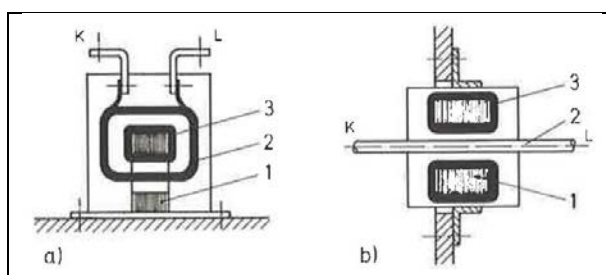


Abbildung 3-8: a) Stützerwandler, b) Durchführungswandler, [4]

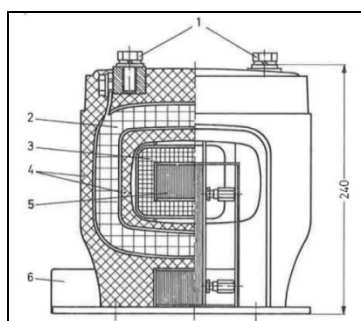


Abbildung 3-9:  
Gießharzisolierter  
Stützerstromwandler  
für 10 kV, [4]

Gießharzisierte Stromwandler werden bis Spannungen von 110 kV eingesetzt. Im Vergleich zu früheren Porzellanausführungen besitzen sie durch die voll umgossene Wicklung eine höhere Kurzschlussfestigkeit. In Abbildung 3-9 wird ein Stützerstromwandler mit Gießharzisolierung für 10 kV dargestellt. Die einzelnen Komponenten sind 1 der Primäranschluß, 2 die Primärwicklung, 3 die Sekundärwicklungen mit Mess- und Hilfswicklung für Erdschlußerfassung, 4 der Gießharkörper, 5 der Kern und 6 der Sekundäranschlußkasten [4].

In Freiluftanlagen kommen ölisolierte Stromwandler zum Einsatz. Die Anordnung der Aktivteile unterscheidet sich hier zwischen Topf-, Isoliermantel- und Kopfbauweise, wobei Kopfstromwandler bei hohen Nenn- und Kurzschlussströmen Vorteile durch die kurze primärseitige Zuleitung aufweisen, siehe Abbildung 3-10 [4].

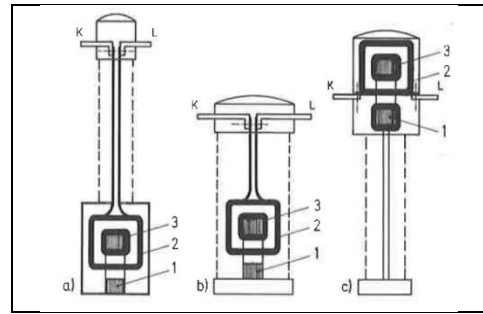


Abbildung 3-10: Stromwandler für Freiluftanlagen, a) Topfbauweise, b) Mantelbauweise, c) Kopfbauweise, [4]

In Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 sind ölisolierte Kopf- und Topfstromwandler dargestellt. Die Kopfbauweise ist hierbei als Einleiterstromwandler ausgeführt. Die Amperewindungszahl ist gleich der primären Stromstärke, die Genauigkeit nimmt jedoch mit sinkender Stromstärke stark ab.

Die U-förmige Konstruktion des Primärleiters beim Topfstromwandler erlaubt einen sehr übersichtlichen Isolationsaufbau.

Beide Wandler sind mit einem Stickstoffpolster als Ölabschluss ausgeführt. Heutzutage wird wegen der Kraftentwicklung im Fehlerfall vermehrt auf mit Faltenbalg abgeschlossene Wandler zurückgegriffen [5].

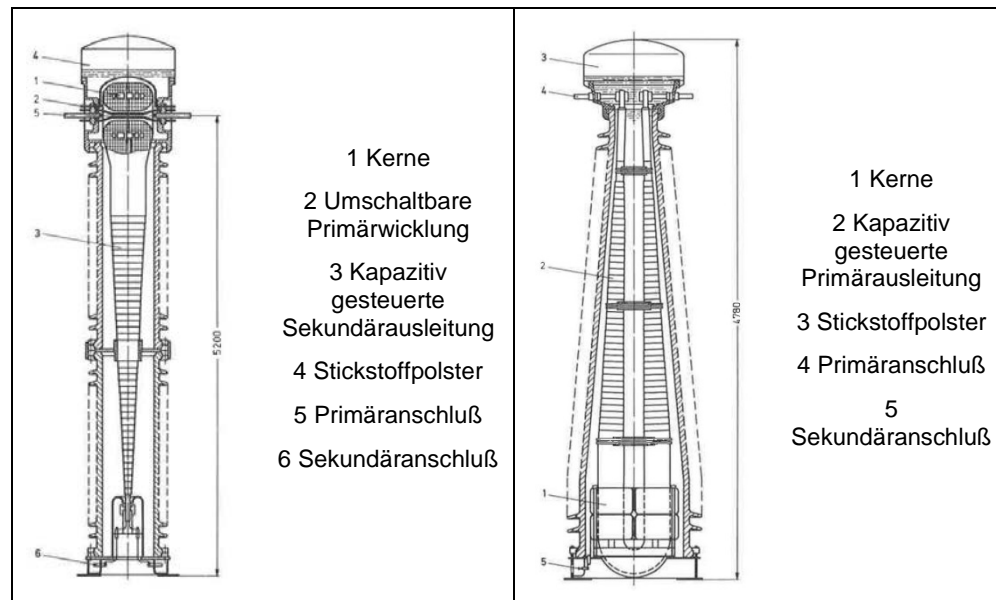


Abbildung 3-11: 400 kV -Kopfstromwandler [4]

Abbildung 3-12: 500 kV-Stromwandler mit U-förmiger Primärleiter [4]

Die einfachste Ausführungsform von Stromwandlern höherer Spannungen bietet die Anwendung für koaxiale Isolieranordnungen. Kabel, Transformator durchführungen oder SF<sub>6</sub>-Sammelschienen ermöglichen die Konstruktion als Einleiterstromwandler ohne sonderliche Isolierung. Abbildung 3-13 zeigt einen Ringkernstromwandler an einer SF<sub>6</sub>-GIS. Der Rohinnenleiter bildet 1 die Einleiterprimärwicklung, die durch SF<sub>6</sub> zur Erde am Rohraußenleiter 4 isoliert wird. Der Erdbelag befindet sich somit außerhalb des Stromwandlers. Weitere Komponenten sind 2 der Ringkern mit Sekundärwicklung, 3 die Schirmelektrode, 5 der Sekundärklemmenkasten und 6 die gasdichte Durchführungsplatte [4].

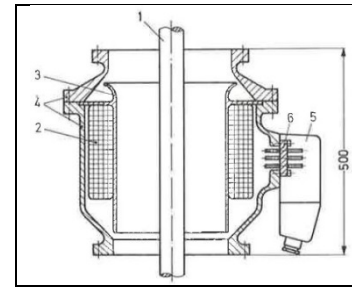


Abbildung 3-13:  
Ringkernstromwandler für  
GIS-Anlage, [4]

## 4 Grundlagen

### 4.1 Öl-Papier-Isolierung

Grundsätzlich gilt im Wandlerbau, dass die innere dielektrische Festigkeit größer als die äußere sein soll. Dadurch wird beim Erreichen der äußeren Überschlagsfestigkeit ein Durchschlag der inneren Isolation vermieden. Günstiges Messverhalten lässt sich zudem mit einem hohen Ausnutzungsfaktor der Isolation verwirklichen. Dies muss jedoch mit der notwendigen dielektrischen Festigkeit in Einklang gebracht werden [5].

Bei Strom- und Spannungswandlern werden die auf Erdpotential liegenden Kerne der Sekundärwicklung zur Hochspannung der Primärwicklung isoliert. In Abbildung 3-14 ist der Aufbau eines Stromwandlers dargestellt.

Ersichtlich ist eine bestehende Potentialverbindung von der äußersten Potentialsteuerung zum Gehäuse. Somit muss die Sekundärwicklung radialsymmetrisch zur Kernachse gleich stark isoliert werden. Die Spannungsabsteuerung zur Erde und die Isolierung der Ausleitung erfolgt in Form einer kapazitiv gesteuerten Isolieranordnung. Hierfür sind leitende Folien zur Potentialsteuerung in die Isolierung nach festgelegten Abständen eingearbeitet. Durch die somit erreichte definierte Kapazitätsaufteilung wird ein sanfter Spannungsabbau über die Isolierung erreicht. Im Fall eines 400-kV Stromwandlers kommen 12 bis 19 Potentialsteuerfolien zum Einsatz. Im Vergleich zu einer Durchführung eines Leistungstransformators gleicher Spannungsebene, bei dem bis zu 100 Steuerfolien eingearbeitet werden, bedeutet diese jedoch eine verstärkte dielektrische Beanspruchung [7, 8].

Die Öl-Papier-Isolierung wird aufgrund der hohen Durchschlagsfestigkeit in Hochspannungsbetriebsmitteln eingesetzt. Ölprägniertes Papier lässt sich durch den lagenweisen Aufbau und durch die Faserrichtung des Papiers als Serienschaltung von Öl und Papier darstellen. Man erhält die resultierende Dielektrizitätszahl durch die folgende Formel [4, 7].

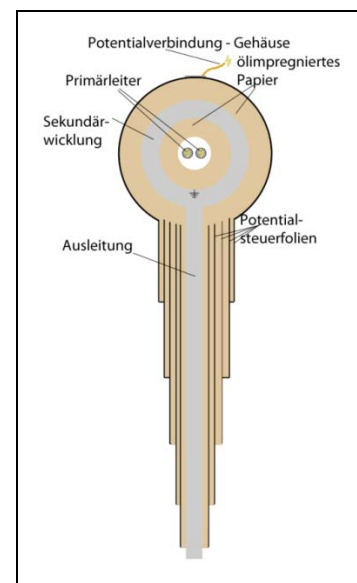


Abbildung 3-14: kapazitiv abgesteuerte Durchführungsausleitung

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 * \varepsilon_2 (s_1 + s_2)}{\varepsilon_1 * s_2 + \varepsilon_2 * s_1} \quad \text{mit } s_1 + s_2 = s \dots \text{Dicke} \quad (3-1)$$

Wird die Schichtdicke  $s$  durch das Porenvolumen  $v$  ersetzt und eine vollständige Tränkung,  $v$  gleich dem Ölvolumen  $v_1$ , des Papiers, dass  $v_2 = 1 - v_1$  ist, vorausgesetzt, ergibt sich Formel ( 3-1 ), [4], zu

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 * \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + v_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (3-2) \quad v = 1 - \frac{\gamma_p}{\gamma_z} \quad (3-3)$$

mit  $\gamma_p$  ...Dichte porenbehaftetes Papier

$\gamma_z$  ...Dichte reiner Zellulose

Wird überdies die elektrische Beanspruchung der Öl/Papier-Schichtung mit üblichen Werten von  $e_1 = 2,2$  und  $e_2 = 5,6$  untersucht, mit

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \approx 2,55 \quad (3-4)$$

wird verdeutlicht, dass das Öl stärker als das Papier beansprucht wird.

Die sehr hohen Durchschlagsfeldstärken einer Öl-Papier-Isolierung werden folglich durch eine große Anzahl an sogenannten Ölfilmen im Dielektrikum erreicht. Das ölprägnierte Papier übernimmt die Bildung dünner Ölschichten. Der schichtweise Aufbau der Isolierung dient zudem als Sperre für Verschmutzungen und gewährleistet die mechanische Stabilität. Wegen der um etwa eineinhalb Zehnerpotenzen geringeren Kriechstromfestigkeit im Vergleich zur Durchschlagsfestigkeit müssen die Papierlagen Äquipotential-Flächen bilden. Dafür werden schmale Papierstreifen als Papierbandagen verwendet und mittels Leim aufgetragen. Diese Technik kommt nur im Bereich des Strom- und Spannungswandlerbaus zum Einsatz. Dadurch sollte ein hoher Ausnutzungsfaktor der Isolation ermöglicht werden können [4, 5].

Messwandler sind im Vergleich zu anderen Betriebsmitteln einer hohen dielektrischen Beanspruchung ausgesetzt und werden meist wartungsarm, speziell ohne Ölwartung, über die gesamte Lebensdauer betrieben bzw. für diese hergestellt. Durch den Abschluss des Ölraumes mittels Stickstoffpolster oder Faltenbalg wird die Verschmutzung und Verfeuchtung des Öls an der Luft verhindert. Dennoch kommt es im Laufe der Lebensdauer zur Alterung des ölprägnierten Papiers, was bei der Dimensionierung nicht unberücksichtigt bleiben darf [4, 5].

Trotz der herausragenden dielektrischen Eigenschaften dieses Isoliersystems führt die Überbeanspruchung zu einer beschleunigten Alterung, die durch eine Kombination von Wärme, Feuchte und hoher Spannungsbeanspruchung verursacht wird [8].

#### 4.1.1 Mineralöl

Durch die Formel ( 3-4 ) und deren Ergebnis ist die Hauptaufgabe des Isolieröls ableitbar, die elektrische Isolation der Komponenten. Zusätzlich dient es zur Füllung von Poren der Papiersolation bzw. von vorhandenen Hohlräumen im System. Durch die Fähigkeit der Umwälzung und einer vergleichsmäßig hohen Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur Luft dient das Öl zum Abtransport der entstandenen Verlustwärme [9, 10].

Die Anforderungen an das Isolieröl nach Einfüllung und vor Inbetriebnahme richten sich nach IEC 60422:2006 und sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Anforderungen an das Isolieröl nach IEC 60422:2006 [11]

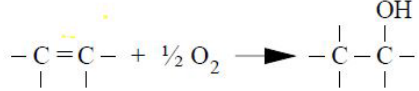
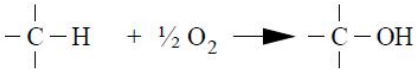
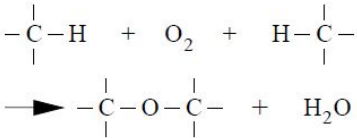
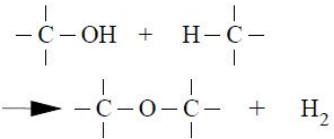
Eigenschaft	Einheit	Höchste Spannung des Betriebsmittels (kV)		
		<72,5	72,5 bis 170	>170
Durchschlagsspannung	kV	>55	>60	>60
Wassergehalt	mg/kg	20	<10	<10
Verlustfaktor	tan $\delta$	max. 0,015	max. 0,015	max. 0,010
spez. Widerstand	G $\Omega$ m	min. 60	min. 60	min. 60

Diese Werte stellen die Mindestanforderungen der Ölqualität dar. Je nach Ölsorte kann die Durchschlagsspannung bis über 90 kV reichen, siehe [9].

#### ***Oxidationsmechanismen***

Durch aufgenommene Feuchtigkeit, Gaslösung oder Verunreinigungen im Öl werden in Kombination von Sauerstoff und Wärme, UV-Strahlung oder Teilentladungen verschiedene Oxidationsprozesse in Gang gesetzt. [1]. Diese führen zu einem Anstieg des Verlustfaktors, sowie zu einer Minderung der Durchschlagsfestigkeit. Wie aus Untersuchungen hervorgeht wirken blanke Kupferleiter katalytisch und sollten daher vermieden werden. Die Alterung von Mineralöl durch Oxidationsprozesse ist in nachfolgender Tabelle beschrieben [1, 10, 12].

Tabelle 3-2: Oxidationsmechanismen im Öl, [1]

<b>Oxidation - Aufbrechen von Doppelbindungen und Anlagerung polarer Gruppen</b>	
<p><i>Folgen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>irreversible Polarisationsverluste, <math>\tan \delta</math> steigt</li><li>Vernetzung und Verharzung</li></ul>	
<p><i>Maßnahmen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Einsatz von Olefine - Öle mit geringem Anteil ungesättigter Kohlenwasserstoffe</li></ul>	
<b>Oxidation durch TE-, UV- oder Lichteinwirkung</b>	
<p><b>Oxidation durch Ölmoleküle</b></p> <p><i>Folgen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>irreversible Polarisationsverluste, <math>\tan \delta</math> steigt</li><li>Zersetzungsprodukte, Säuren, Schlamm</li></ul>	
<p><i>Maßnahmen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Einsatz von Olefine - Öle mit geringem Anteil ungesättigter Kohlenwasserstoffe</li></ul>	
<p><b>Oxidation und Polykondensation</b></p> <p><i>Folgen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Wasserabspaltung bewirkt Senkung der Durchschlagsfeldstärke</li><li>Verlustfaktor und Leitfähigkeit steigt an</li><li>Vernetzung bewirkt Schlamm- und Verharzung</li></ul>	
<p><i>Maßnahmen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Trocknung des Öls</li></ul>	
<b>Oxidation mit anschließender Vernetzung - X-Wachsbildung</b>	
<p><i>Folgen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>irreversible Polarisationsverluste, <math>\tan \delta</math> steigt</li><li>Vernetzung, Gasbildung (Wasserstoff)</li><li>X-Wachs-Bildung</li><li>Volumenverringern</li><li>Verharzung</li></ul>	
<p><i>Maßnahmen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Teilentladungsfreier Aufbau</li><li>Vollständige, hohlraumfreie Imprägnierung</li><li>Gasfeste Öle verwenden</li></ul>	



Die Entstehung von Wasser kann zum Beispiel durch die Verharzung des Öls aufgrund von vernetzten Sauerstoffbrücken als Kondensationsprodukt auftreten. Die Sauerstoffbrücken entstehen hierbei durch vorhandene polare OH-Gruppen, die einen Anstieg des Verlustfaktors bewirken und Säuren und unlöslichen Schlamm bilden [1].

Die X-Wachs-Bildung stellt unter den Oxidationsmechanismen eine besonders starke Minderung der elektrischen Festigkeit dar. Unter dem Einfluss von Teilentladungen oxidiert vorhandener Sauerstoff die Ölmoleküle. Das unlösliche Wachs wird unter Abgabe von Wasserstoffgas durch längere Beanspruchung gebildet. Es diffundiert ins Öl und vermindert die elektrische Festigkeit. Beobachtet wird X-Wachs meist bei Ölkabeln, Kondensatoren, in delaminierten Hartpapierdurchführungen mit Öleinbruch und in unvollständig imprägnierten Isolierungen [1].

### Verlustfaktor $\tan \delta$

Der Verlustfaktor repräsentiert die Wärmeverluste im Öl, dieser nimmt durch Alterung zu. Nachfolgende Grafik soll die Abhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors zum Wassergehalt und der Temperatur verdeutlichen [13].

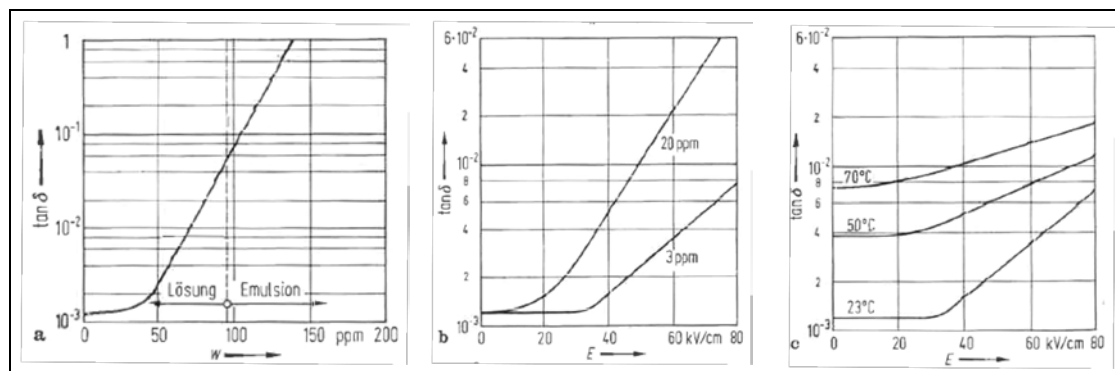


Abbildung 3-15: Verlustfaktor in Abhängigkeit von a) Wassergehalt bei 40°C, b) Feldstärke und Wassergehalt Raumtemperatur, c) Temperatur und Feldstärke, [13]

Der Einfluss des Wassers und der Temperatur auf den Verlustfaktor ist sehr gut zu erkennen. In Abbildung 3-15 a) ist der nahezu exponentielle Anstieg des Verlustfaktors mit steigendem Wassergehalt ersichtlich, bei niederen Wasseranteilen ist er jedoch annähernd unbeeinflusst. Aufgrund des Wien-Effektes, der Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Feldstärke, steigt der Verlustfaktor mit zunehmender Feldstärke an, siehe Abbildung 3-15 b) und c) [13, 14].

### Durchschlagsfestigkeit

Die Durchschlagsfestigkeit ist maßgeblich durch den Gas- und Wassergehalt und die im Öl vorhandenen Verunreinigungen bestimmt. Die Abnahme der Festigkeit ist in Abbildung 3-16 deutlich dargestellt [13].

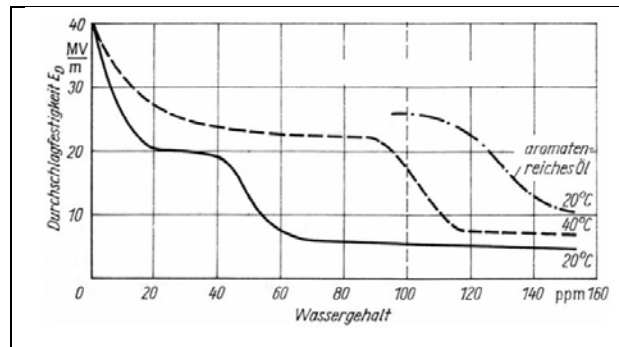


Abbildung 3-16: Durchschlagsfestigkeit von Mineralöl zur absoluten Feuchte, [14]

Die meist in der Literatur angegebene Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von der Temperatur ist nur eine scheinbare Abhängigkeit. Durch die erhöhte Temperatur verändert sich nur die relative Feuchte im Öl und somit die Durchschlagsfestigkeit, absolut gesehen bleibt der Wassergehalt jedoch gleich [13].

Um die Grenze des Feuchtegehaltes von  $< 10$  ppm seitens des Herstellers einzuhalten muss dieser eventuell während der Fertigung Maßnahmen wie eine Vakuumtrocknung setzen [15].

Das Alterungsbestreben des Mineralöls steigt sehr stark mit erhöhter Temperatur. Die Grenztemperatur liegt bei ca.  $100^\circ\text{C}$ , wobei ab  $80^\circ\text{C}$  je Dauertemperaturerhöhung von  $10^\circ\text{C}$  in Verbindung mit Luft eine Verdoppelung der Alterung vorstattengeht. Messwandler werden hingegen auch bei ungünstigen Rahmenbedingungen selten eine Temperatur über  $60^\circ\text{C}$  erfahren. Dennoch ist der Einfluss der Temperatur in Verbindung mit Wasser im Isolationssystem nicht vernachlässigbar, siehe 4.1.3 [5].

### Wasserbestimmung – Karl-Fischer-Titration

In Isolierölen erfolgt die Wassergehaltsbestimmung hauptsächlich mittels Karl-Fischer-Titration nach IEC 60814. Hierbei kann zwischen dem coulometrischen und dem volumetrischen Messprinzip unterschieden werden [12].

Die volumetrische Karl-Fischer-Titration stellt die klassische Methode dar. Durch die Verwendung von methanolischen Lösung von Jod, Schwefeldioxid und einer Base als

Puffersubstanzen werden durch Zugabe einer wasserhaltigen Probe verschiedenste Reaktionen begünstigt [16].

Bei der volumetrischen Titration ist das Jod in der Lösung vorhanden, bei der coulometrischen Titration wird das Jod auf elektrochemischen Weg erzeugt, dadurch muss kein Titer bestimmt werden. Durch die bekannte Maßlösung und der Summengleichung der Reaktionen, kann auf den Wassergehalt zurückgeschlossen werden [16].



Die Umsetzung von Schwefeldioxid in Verbindung mit Jod und Wasser ist maßgebend für die Bestimmung der Wasserkonzentration. Durch den Verbrauch des Wassers der Ölprobe kommt es zu einem Jodüberschuss, der durch eine bekannte Ladungsmenge entstanden ist und den Wassergehalt widerspiegelt [12]. Aufgrund der geringen Wasserkonzentrationen in Betriebsmitteln kommt die coulometrische Titration zum Einsatz, denn für die volumetrische Titration muss die Probe einen Wassergehalt von >50 µg/g enthalten [16].

### **Gas-in-Öl-Analyse – DGA**

Durch dielektrische Vorgänge und den Abbau des Isolationssystems werden im Öl charakteristische Gase gelöst. Durch die Bestimmung der Schlüssel- und Begleitgase mittels Gaschromatographie kann auf verschiedenste Fehler wie Teilentladungen, Lichtbögen, Zelluloseabbau oder auf Hot-Spots zurückgeschlossen werden [12, 17].

Maßgebend für die entstandenen Gase ist die Temperatur des Fehlers. Bräunliche Verfärbungen des Papiers werden von thermischen Fehlern bei ca. 150°C verursacht und erzeugen hauptsächlich Wasserstoff (H<sub>2</sub>). Die Karbonisierung des Papiers und die X-Wachsbildung bei ca. 300°C hat die Bildung von Ethen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), Ethan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Propen (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) und geringe Anteile von Methan (CH<sub>4</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zur Folge [17]. Entladungen niedriger Energie bilden hauptsächlich Ethin (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) und Methan, begleitet von Wasserstoff und Propen. Funkenentladungen und Lichtbögen in der Öl-Papier-Isolierung sind durch zusätzliche Bildung von Ethin gekennzeichnet. Co und CO<sub>2</sub> werden beim thermischen Abbau der Zellulose freigesetzt [12, 13, 17].

Bei der Analyse der Gaskonzentration im Öl sind die Quotienten der Gase aussagekräftiger als deren absolute Konzentration. Die Auswertung der Ergebnisse kann zum Beispiel durch Methoden nach Dornenburg, Rogers und Duval ausgewertet werden.

Die Klassifizierung der Fehler erfolgt nach unterschiedlichen Quotienten. Die wichtigsten fünf nach CIGRE SC15 sind in nachfolgend dargestellt.[12, 17, 18]

$$K_1 = \frac{\text{Ethin } (C_2H_2)}{\text{Ethan } (C_2H_6)} \quad (3-6)$$

$$K_2 = \frac{\text{Wasserstoff } (H_2)}{\text{Methan } (CH_4)} \quad (3-7)$$

$$K_3 = \frac{\text{Ethen } (C_2H_4)}{\text{Ethan } (C_2H_6)} \quad (3-8)$$

$$K_4 = \frac{\text{Kohlendioxid } (CO_2)}{\text{Kohlenmonoxid } (CO)} \quad (3-9)$$

$$K_5 = \frac{\text{Ethin } (C_2H_2)}{\text{Wasserstoff } (H_2)} \quad (3-10)$$

#### 4.1.2 Isolierpapier

Mineralöl wird fast ausschließlich in Verbindung mit Papier verwendet und Papier erreicht erst durch die Imprägnierung mit Öl seine elektrische Festigkeit. Dielektrisch dient der Faserstoff zudem als Barriere. Das sogenannte Ölpapier wird aus Holzzellstoff gefertigt und sorgt für die mechanische Festigkeit der Isolation [1, 19].

Im Wandlerbau wird sogenanntes Kraftpapier, auch Krepp-Papier genannt, verwendet. Die Zellulose darf kurzzeitig einer Temperatur bis 120°C ausgesetzt werden, jedoch beschleunigt sich die Alterung ab über 90°C unzulässig schnell [1].

Wie eingangs erwähnt in Kapitel 4, wird die elektrische Festigkeit durch die Schichtung bzw. deren Barrierenwirkung erreicht. Das Ziel ist es, das Volumen in sehr viele Ölspalte oder auch durch Poren hoher Festigkeit zu unterteilen. Der Einfluss der Porengröße ist in Bezug auf die Dielektrizitätszahl in Abbildung 3-17 dargestellt [13].

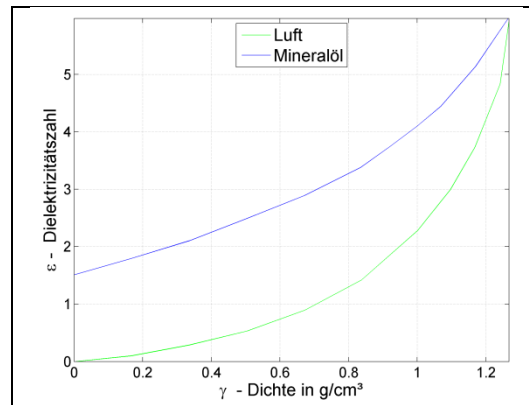


Abbildung 3-17: Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit der Rohdichte [13]

Dünnes hochverdichtetes Isolierpapier weist eine Porenweite im Bereich von 1 bis 3  $\mu\text{m}$  und bei weniger stark verdichtetem Material im Bereich von 10 bis 20  $\mu\text{m}$  auf. Dabei lassen sich folgende Dichten für die Einteilung heranziehen [1].

Tabelle 3-3: Isolierpapierdichte nach Verdichtung, [1]

Isolierpapier	Dichte
	$\delta$
	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
hochverdichtetes Material	1,25
weniger verdichtetes Material	0,8

Die Höhe der Dichte hat direkten Einfluss auf die Porenform und in weiterer Folge auf die Feldaufteilung und Ölaufnahme. Hochverdichtetes Material weist zum Beispiel eine 8%ige Ölaufnahmefähigkeit auf, im Vergleich dazu das weniger verdichtete Material 50 % [1].

Während der Fertigung werden die Lagen des Papiers auf die zu isolierenden Komponenten aufgebracht. Die Verklebung erfolgt meist mit Leim, einem Kaseinkleber, und ist somit wasserlöslich und wasserdurchlässig. Erfolgt die Herstellung der isolierenden Komponenten nicht in auf Wüstenklima angepasste Fertigungshallen muss umso genauer auf eine ordnungsmäßige Trocknung geachtet werden [10, 15].

Durch die Trocknungsöfen in der Produktion (Wärme-Vakuum-Trocknung) wird dem Aktivteil bzw. der darauf befindlichen Papierisolierung das Wasser entzogen. Die Heißlufttrocknung bewirkt eine gleichbleibend schnelle Trocknung an der Oberfläche. Die Geschwindigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe der Feststoffisolierung ab. Dieser Vorgang lässt sich wie in Abbildung 3-18 ersichtlich in drei Bereiche unterteilen. Bereich Nummer 1 beschreibt die Geschwindigkeit der Verdampfung auf der Oberfläche,

Nummer 2 das Durchdiffundieren des Wasser aus tieferliegenden, feuchten Bereichen und Nummer 3 den hygroskopische Trocknungsbereich [10, 20].

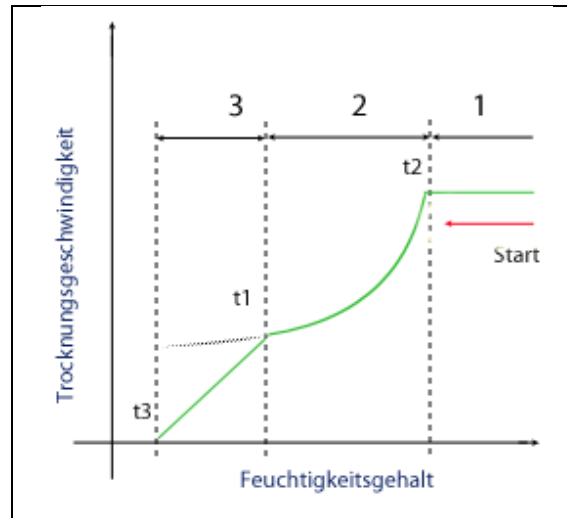


Abbildung 3-18: Phasen der Trocknung [20]

Zudem ist während der Trocknung zu achten, dass die Papierlagen keine Falten werfen. Dies kann durch eine langsame Trocknung bewerkstelligt werden.

Da die elektrische Festigkeit der Papierisolierung nur in Verbindung mit Öl vorherrscht wird der Einfluss der Feuchtigkeit nachfolgend in 4.1.3 behandelt. Zusammenfassend zeigt folgende Abbildung die Effekte der Alterungsfaktoren in einer Öl-Papier-Isolierung.

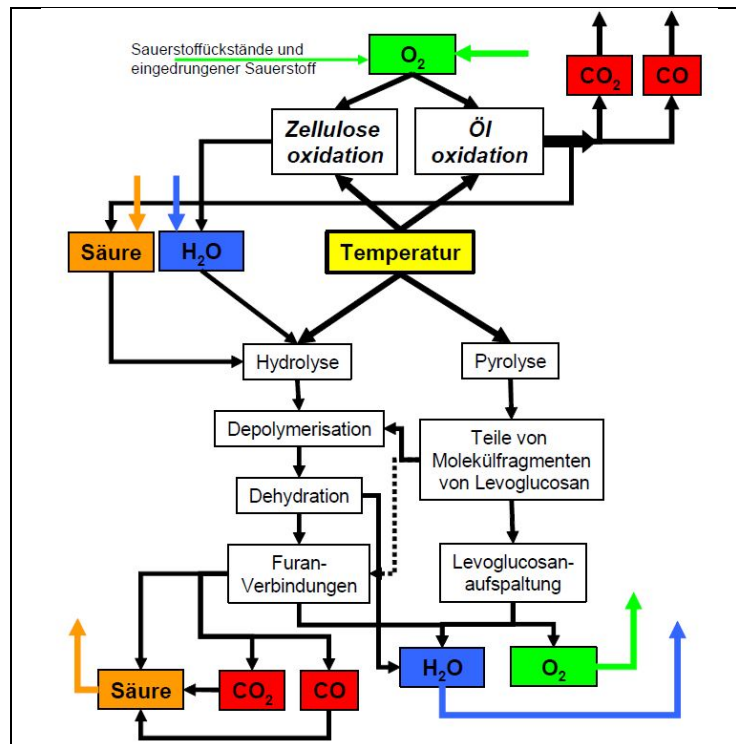


Abbildung 3-19: Einfluss von Temperatur und Wasser auf die Alterungsfaktoren, [21, 22]

### 4.1.3 Feuchte Wechselwirkung zwischen Öl und Papier

Die Papierfeuchte von ölprägnierten Papier trägt zur Senkung der elektrischen Festigkeit sowie zur Alterung des Papiers bei. Zudem wird die mechanische Festigkeit der Zellulose durch Depolimerisation beeinträchtigt [10, 15, 23]. Eine Verzehnfachung des Feuchtegehaltes würde auch eine Verzehnfachung der Alterung bedeuten, Vergleich 1 % und 0,1 % [20].

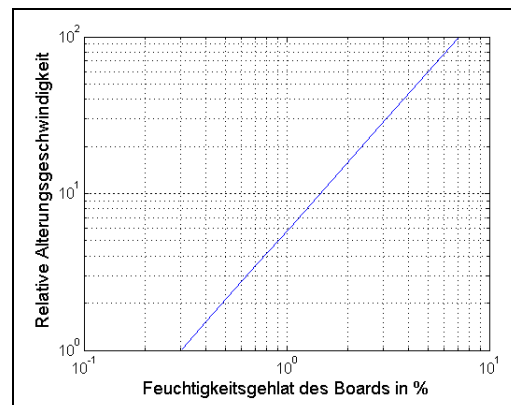


Diagramm 3-1: Relative Alterungsgeschwindigkeit der Zellulose, [20]

Wie in Kapitel 4 ersichtlich ist sinkt auch die Durchschlagsspannung von Öl mit zunehmendem Wassergehalt. Das Gesamtsystem erfährt daher durch Feuchteinfluss eine Alterung und Schwächung. Die Feuchte ist daher der wichtigste negative Parameter in der Lebensdauer eines Öl-Papier-Isolationssystem.

Vorhandenes Wasser befindet sich normalerweise vorwiegend in der Feststoffisolierung. Durch betriebsbedingte Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge bewirkt das temperaturabhängige Wasserlösungsvermögen des Mineralöls, Abbildung 3-20, Ausgleichsvorgänge zwischen Öl und Papier. Durch eine erhöhte Temperatur steigt im Öl die Aufnahme von Wassermolekülen aus dem Papier und vermindert sich bei sinkender Temperatur [1, 10, 15, 20].

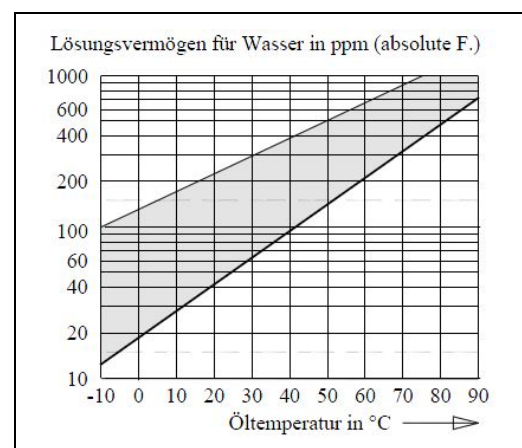


Abbildung 3-20: Lösungsvermögen für Wasser in ppm von Mineralöl, [1]

Das Bestreben nach dem Feuchtigkeitsgleichgewicht im Isolationssystem ist im realen Betrieb durch schwankende Belastungen ein kontinuierlicher Vorgang, der nicht

schlagartig vonstattengeht. Wird das Isolationssystem raschen Temperaturänderungen ausgesetzt ergibt sich ein unzulässiges Verhältnis der Feuchte in Papier und Öl [1, 10].

Das Konzentrations- und Temperaturungleichgewicht der Medien bewirkt die Feuchtediffusion im Isoliersystem. Der Diffusionsstrom, der das Feuchteungleichgewicht ausgleicht lässt sich in drei Abschnitte unterteilen in die Diffusion der Wassermoleküle im freien Öl, im Grenzschichtübergang und in der Zellulose [23].

Aus den Feuchtigkeitsgleichgewichtskurven, den Oommen-Kurven, lässt sich ableiten, dass bei Gleichgewicht im Isoliersystem die relative Feuchte stets gleich ist, unabhängig vom angrenzenden Medium Öl oder Luft [10, 23]. Die vorherrschende Temperatur hat einen starken Einfluss auf die Verteilung der Feuchte. Die dargestellten Kurven basieren jedoch nur auf Neuöl und die Ergebnisse lassen viel Spielraum für Interpretationen offen. Kuen et al [10] untersuchte hierfür die Gleichgewichtsverteilung bei gealtertem Öl mit verschiedenen Temperaturen und Feuchtegehaltswerten.

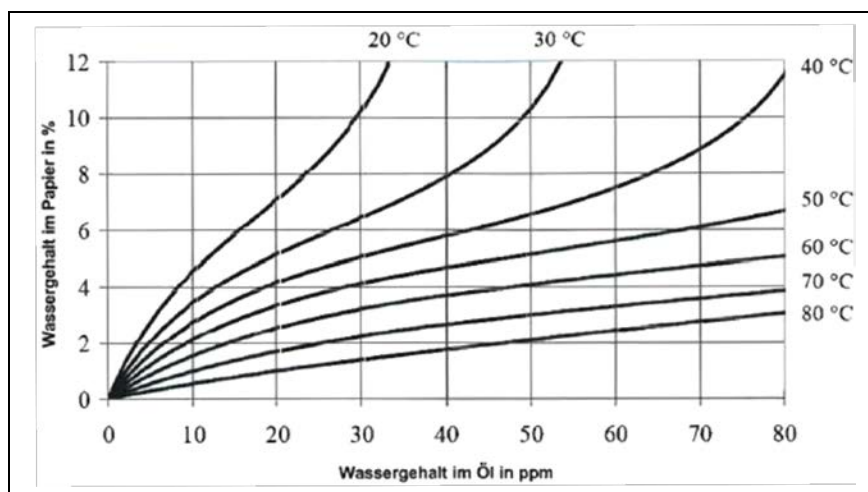


Abbildung 3-21: Feuchtebestimmungskurven zwischen Öl und Papier, [10]

Der Vorgang des Feuchtegleichgewichts bzw. die Einstellung des Gleichgewichts fordert jedoch einen über mehrere Wochen stabilen Betrieb des Betriebsmittels, da dieser Prozess sehr stark von der Temperatur, der Dicke des Papiers und des Feuchtegehaltes abhängig ist. Niedrige Temperatur, niedriger Feuchtegehalt und dicke Strukturen haben lange Diffusionszeiten zur Folge. [10]



## 4.2 Erwärmungsvorgang bei Messwandlern

Bei der Erwärmung von Messwandlern wird zwischen der Erwärmung im Nennbetrieb und der Erwärmung im Fall von transienten Vorgängen, Betriebsstörungen, unterschieden. Die Grenzerwärmung von Messwandlern mit getränktem Papier liegen bei ca. 50°C, die Grenztemperatur bei 85°C laut VDE 0170/171 [5].

### **Ungestörter Netzbetrieb**

Durch die Übertragung elektrischer Energie mit konstant hohen Spannungen und der Anforderung der Spannungsqualität im ungestörten Netzbetrieb stellt sich bei Spannungswandlern eine dauernde Übertemperatur, die nur gering von Spannungsschwankungen im Bereich von  $\pm 10\%$  beeinflusst wird, ein [5].

Stromwandler hingegen erfahren eine der übertragenen Leistung proportionalen Schwankung des Stromes. Die damit verbundenen  $I^2R$ -Verluste schwanken über den Tag verteilt und bewirken ein zeitverzögertes Folgen der Temperatur des Wandlers [5].

Die nachfolgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick über die verschiedenen Wärmequellen in Strom- und Spannungswandler [5].

Tabelle 3-4: Wärmequellen in Strom- und Spannungswandler, zusammengefasst aus [5]

Wärmequelle	Stromwandler	Spannungswandler	Abhängig von
Wicklungen	•	-	$I^2R$
Eisenkern	•	•	Wirbelstrom- und Hystereseverluste
Dielektrikum	-	•	Verlustfaktor $\tan \delta$
Streufluss	•	•	Betrieb mit höherer Frequenz

Um die beschriebenen Erwärmungsvorgänge besser verstehen zu können und zudem die Ähnlichkeit zur Elektrotechnik aufzuweisen ist es sinnvoll, die Gegenüberstellung thermischer und elektrischer Größen zu beachten.

Tabelle 3-5: Gegenüberstellung elektrotechnische vs. thermische Größen

Elektrotechnische Größen			Thermische Größen		
Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Bezeichnung	Zeichen	Einheit
Strom	$I$	$A$	Wärmestrom	$\dot{Q}$	$W$
Spannung	$U$	$V$	absolute Temperatur	$T$	$K$
elektr. Widerstand	$R$	$\Omega = \frac{V}{A}$	therm. Widerstand	$R_{\vartheta}$	$\frac{K}{W}$
elektr. Leitfähigkeit	$\sigma$	$\frac{1}{\Omega * m}$	Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	$\frac{W}{K * m}$
elektr. Kapazität	$C$	$F$	Wärmekapazität	$C_{\vartheta}$	$\frac{J}{K}$

Thermische Untersuchungen haben das Ziel, die Dynamik der Temperatur eines Körpers gewisser Wärmekapazität durch Wärmeaufnahme und -abgabe zeitlich abhängig festzustellen, siehe Formel ( 3-11 ) [5].

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{Q_e - Q_v}{C_{\vartheta}} \quad (3-11) \quad \text{mit } \vartheta \triangleq T - T_n \quad T_n = 273,15 K$$

$$Q_v = A_{\vartheta} * \vartheta_{\ddot{u}} \quad (3-12) \quad C_{\vartheta} = c_{\vartheta} * G \quad (3-13)$$

$Q_e$  stellt dabei die erzeugte und  $Q_v$  die abgegebene Wärmemenge dar. Die Kapazität  $C_v$  setzt sich hierbei aus der spezifischen Wärme,  $c_v$  in  $Ws/kg^{\circ}C$  und der Masse  $m$  in  $kg$  des Körpers zusammen,  $C_{\vartheta} = c_{\vartheta} * m$  [5].

$A_{\vartheta}$  in Formel ( 3-12 ) bezeichnet das Wärmeabgabevermögen des Körpers, welches sich aus dem Abgabevermögen der Strahlung  $A_S$  durch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz und der Konvektion  $A_K$  zusammensetzt, siehe Formel ( 3-14 ) und ( 3-15 ).

$$A_S = c_S k_A \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (3-14) \quad A_K = c_K \vartheta_{\ddot{u}} \quad (3-15)$$

mit  $c_S$  ... Strahlbeiwert in  $\frac{W}{m^2} * ^{\circ}K^4$

$k_A$  ... Absorptionszahl der Fläche

$T$  ... absolute Temperatur der abstrahlenden Fläche in  $^{\circ}K$

$c_K = 0,744 * c_L * \sqrt[4]{p^2 * \vartheta_{\ddot{u}}}$   $c_L$  ... Konvektionsbeiwert für Luft

$\vartheta_{\ddot{u}}$  ... Übertemperatur der wärmeabgebenden Fläche gegen Umgebungsluft in  $^{\circ}C$

$p$  ... Druck der Umgebungsluft in  $\frac{kg}{cm^2}$

Wird nun das Differential aus der Gleichung ( 3-11 ) gelöst ergibt sich folgender Ausdruck:

$$t - t_0 = -\frac{C_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} * \ln(Q_e - A_{\vartheta} * \vartheta_{\ddot{u}}) \quad (3-16) \quad \text{mit} \quad t_0 = \frac{C_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} * \ln(Q_e - A_{\vartheta} * \vartheta_0) \quad (3-17)$$

$$\text{zu} \quad t = \frac{C_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} * \ln\left(\frac{Q_e - A_{\vartheta} * \vartheta_0}{Q_e - A_{\vartheta} * \vartheta_{\ddot{u}}}\right) \quad (3-18) \quad \text{mit} \quad \vartheta_0 \dots \text{Temperatur zum Zeitpunkt } t_0$$

Setzt man  $\vartheta_0 = 0$  und wird die Gleichung nach  $\vartheta$  aufgelöst, erhält man den Ausdruck, aus dem die Wärmezeitkonstante  $T_{\vartheta}$  und die Erwärmungskurve entnommen werden kann, siehe ( 3-20 ) [5].

$$\vartheta = \frac{Q_e}{A_{\vartheta}} * \left(1 - e^{-\frac{A_{\vartheta} * t}{C_{\vartheta}}}\right) = \frac{Q_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} * \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\vartheta}}}\right) \quad (3-19) \quad \text{mit} \quad T_{\vartheta} = \frac{Q_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} \quad (3-20)$$

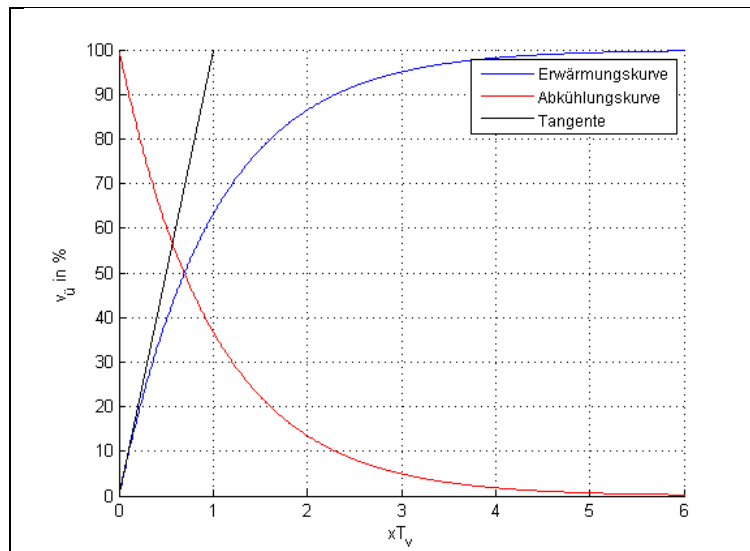


Diagramm 3-2: Erwärmungs- und Abkühlungskurve, X-Achse Anzahl der Zeitkonstanten

Die höchste mögliche Temperatur ist daher unabhängig von der Wärmekapazität  $C_k$  und nur eine Funktion aus der erzeugten Wärmemenge und dem Abgabevermögen des Körpers.

$$\vartheta_{max} = \frac{Q_{\vartheta}}{A_{\vartheta}} \quad (3-21)$$

Gleichung ( 3-19 ) vereinfacht zu

$$\vartheta = \vartheta_{max} * \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\vartheta}}}\right) \quad (3-22)$$

Als bestimmende Größe bei Erwärmungsvorgängen wirkt das Temperaturgefälle zwischen zwei Punkten. Der Temperaturunterschied bewirkt die Ausbildung eines Wärmestromes  $J_{\vartheta}$ , der durch die erzeugte Wärmemenge  $Q_{\vartheta}$  über die Zeit  $t$  ausgedrückt wird: [5]

$$J_{\vartheta} = \frac{Q_{\vartheta}}{t} \quad (3-23)$$

Ein Volumenkörper reagiert auf den Wärmestrom durch die beschränkte Wärmeleitfähigkeit mit einem Temperaturunterschied wie ein elektrischer Leiter mit dem Spannungsabfall über dem elektrischen Widerstand. Der thermische Widerstand errechnet sich aus

$$R_{\vartheta} = \frac{l}{q * \lambda_{\vartheta}} \quad \lambda_{\vartheta} \dots \text{Wärmeleitfähigkeit in } \frac{W}{cm} * ^{\circ}C \quad (3-24)$$

Durch die Berücksichtigung des thermischen Widerstandes  $R_{\vartheta}$  ergibt sich der resultierende Wärmestrom zu

$$J_{\vartheta} = \frac{Q_{\vartheta}}{t} = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}} = \frac{\Delta\vartheta * q * \lambda_{\vartheta}}{l} \quad (3-25)$$

Daraus kann die spezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\vartheta}$  in Abhängigkeit des Wärmestromes und des Temperaturunterschiedes inklusive der Körpergeometrie berechnet werden. [5]

$$\lambda_{\vartheta} = \frac{Q_{\vartheta} * l}{q * \Delta\vartheta * t} \quad (3-26)$$

Es ergibt sich das Temperaturgefälle innerhalb des Körpers zu

$$\Delta\vartheta = \frac{\frac{Q_{\vartheta}}{t} * l}{q * \lambda_{\vartheta}} = \frac{N_{\vartheta} * l}{\lambda_{\vartheta} * q} \quad N_{\vartheta} \dots \text{Durchgangsleistung in } W \quad (3-27)$$

### **Gestörter Netzbetrieb**

Im Fall eines Kurzschlusses wird die Primärwicklung des Stromwandlers kurzzeitig von den Kurzschlussströmen durchflossen. Die Dauer des erhöhten Stromes richtet sich dabei nach der Abschaltzeit der Schutzeinrichtung dieses Abschnittes [2, 5].

Während des kurzzeitigen Überstromes kann Annahmen zufolge die zusätzlich erzeugte Wärmemenge nicht abfließen. Durch die Vernachlässigung des

Wärmeabgabevermögens und bei bekannten spezifischen Verlusten und spezifischer Wärme, ergibt sich die Temperatur °C pro Sekunde, nach [5]

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{0,24 \varrho}{\gamma c_{\vartheta}} S^2 = konst. S^2 = konst. \frac{W}{G} \quad (3-28)$$

Die in Formel ( 3-28 ) vorkommende Konstante für die Kurzzeiterwärmung ist der Literatur zu entnehmen [5]. Analog erfolgt die Berechnung des Temperaturanstieges im Isolierstoff [5].

#### 4.2.1 Wärmequellen

Wie in Tabelle 3-4 dargestellt sind im Fall eines Messwandlers verschiedene Wärmequellen für die erzeugte Wärmemenge verantwortlich. Es wird allerdings auf eine Beschreibung der Verluste aus erhöhtem Streufluss beim Betrieb mit höheren Frequenzen und der Verluste im Eisenkern, aufgrund der Annahme, dass nur betriebsfrequente Vorgänge unter Nennspannung vorherrschen, verzichtet [5].

Spannungswandler erfahren hauptsächlich dielektrische Verluste, siehe Tabelle 3-4, als Wärmequelle, Stromwandler hingegen weisen zusätzlich Stromwärmeverluste des Primärleiters auf [5].

Die Verluste im Dielektrikum bzw. der Verlustfaktor  $\tan \delta$  gibt das Verhältnis der Verlustleistung und der kapazitiven Blindleistung an [1]. Durch dieses Verhältnis kann in Verbindung mit der Kapazität die Wärmemenge durch dielektrische Verluste berechnet werden [5].

$$P_d = u^2 \omega C \tan \delta \quad C \dots \text{elektrische Kapazität in F} \quad (3-29)$$

In der Gleichung zeigt sich, dass die Verluste in ihrer Höhe bei niederen Spannungen sehr gering sind. [5]

Die Stromwärmeverluste lassen sich mit dem temperaturabhängigen elektrischen Widerstand wie folgt ausdrücken

$$P_{St} = k I^2 R(\vartheta) \quad (3-30)$$

$$R(\vartheta) = \frac{\rho_{20} l}{A} [1 + \alpha_T(\vartheta) - 20^\circ C] \quad (3-31)$$

Es gilt zu beachten, dass bei Wechselstrom zusätzliche Stromverluste durch Wirbelströme oder Stromverdrängung, Faktor  $k$  in Formel ( 3-30 ), wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, auftreten können. Der resultierende wirksame Widerstand für die Erwärmung resultiert folglich aus dem Gleichstrom- und Wechselstromwiderstand [5].

#### 4.2.2 Stromverdrängung

Die Stromverdrängungsverluste werden durch den Skin- oder Hauteffekt des Einzelleiters, sowie durch die Beeinflussung benachbarte Leiter, der Nah- und Proximityeffekt, zusammengesetzt. Hervorgerufen werden diese Effekte durch das durch den fließenden Strom erzeugte Magnetfeld und deren Wechselwirkung. Hierbei sind Induktivitäten der Haupt- und Teilleiter, sowie die Gegeninduktivitäten maßgebend. Die Stromverdrängung und Induktivitäten sind gegenläufig. Es lässt sich verallgemeinernd feststellen, je größer der Stromverdrängungsfaktor  $k$  ist, desto kleiner ist die Induktivität des Leitersystems [24].

##### **Skineffekt**

Die Führung eines Gleichstromes erfolgt unter der Ausnutzung des gesamten Leiterquerschnittes.

Werden die Wechselstromleitung und die dadurch entstehenden elektrischen und magnetischen Felder im Leiter betrachtet, wird ersichtlich, dass im Inneren des Querschnittes Feldlinien aufgehoben werden und sie in äußeren Querschnittsbereichen verstärkt werden [24].

In inneren Querschnittsbereichen werden Wirbelströme entgegen der Stromrichtung hervorgerufen, was zu einer Kompensierung des Stromes in diesen Bereichen führt. Die äußeren Querschnittsbereiche erfahren eine Stromerhöhung durch hervorgerufene Wirbelströme in Richtung des zu leitenden Stromes. Durch diese Stromverdrängung innerhalb des Leiters steht dem Strom nicht mehr die gesamte Querschnittsfläche zur Verfügung. Resultierend ergibt sich ein höherer Wechselstromwiderstand im Vergleich zum Gleichstromwiderstand. [24]

Die wirksame Querschnittsfläche wird durch die Eindringtiefe beschrieben. Diese setzt sich aus der Kreisfrequenz  $\omega$ , der Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  zusammen.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (3-32)$$

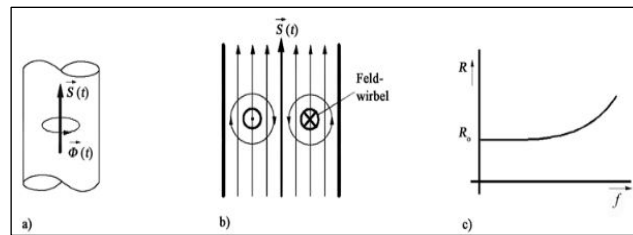


Abbildung 3-22: Entstehung und Wirkung des Skinneffektes, a) Stromdichte  $\vec{S}(t)$  und erzeugtes Magnetfeld  $\vec{\Phi}(t)$ , b) Hervorgerufene Wirbelströme, c) Frequenzabhängigkeit des Widerstandes [25]

Wie in Formel ( 3-33 ) ersichtlich sinkt die Eindringtiefe mit steigender Frequenz. Kupferrundleiter bei 50 Hz weisen eine Stromeindringtiefe von ca. 9,38 mm auf. Zur Verdeutlichung des Skinneffektes wurde mit Quickfield Professional 6.0.1.1521 ein Rundleiter von 5 cm Durchmesser mit  $1575 \text{ A} \cdot \sqrt{2}$  bei 50 Hz simuliert.

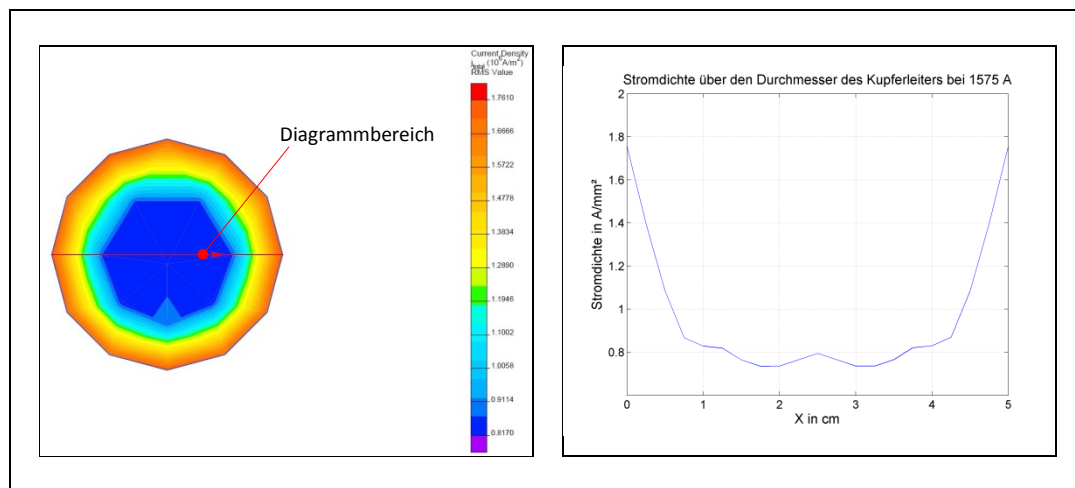


Abbildung 3-23: Simulation des Skinneffektes eines Kupferleiters

Diagramm 3-3: Stromdichteverteilung über den Durchmesser

### **Nah- oder Proximityeffekt**

Werden stromdurchflossene Leiter nebeneinander geführt ergibt sich eine Überlagerung der magnetischen Wechselfelder. Im Fall von zwei gleichsinnig durchflossenen Leitern ergibt diese Überlagerung eine teilweise Aufhebung der magnetischen Felder. Dies führt zur Verdrängung des Stromes von der Innenseite, der dem anderen Leiter zugewandten Seite, in die Außenseite des Leiters [24].

Ausschlaggebend für die Höhe der Stromverdrängung sind beim Proximityeffekt die Anordnung und die Geometrie der Leiter. Bei gleichsinnig durchflossenen Leitern kommt es zu einer Stromdichteerhöhung in den jeweils abgewandten, nach außen liegenden Flächen. Der gegensinnige Stromfluss hat eine Stromdichtekonzentration an den jeweils zugewandten Flächen des Leiters zur Folge [24].

Die nachfolgenden Simulationen wurden mit gleich- und gegensinnigem Stromfluss durchgeführt. Die Rundleiter mit einem Durchmesser von 5 cm sind im Abstand von 1 cm angeordnet. Simuliert wurde ein Wechselstrom von  $1575 \text{ A} \cdot \sqrt{2}$ , 50 Hz je Leiter.

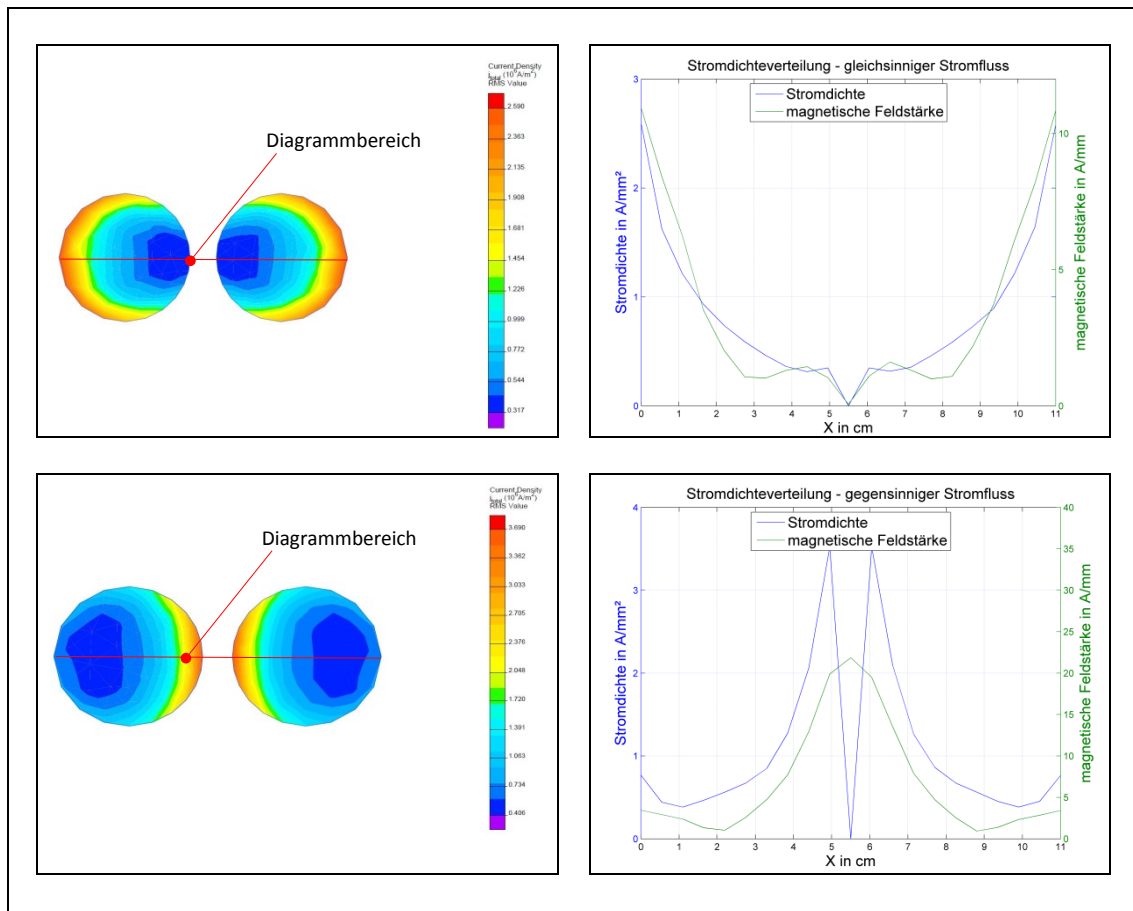


Abbildung 3-24: Simulation des Skin- und Proximityeffektes,  
**oben:** Gleichsinniger Stromfluss, **unten:** Gegensinniger Stromfluss  
**links:** Stromdichteverteilung, **rechts:** Stromdichte und magnetische Flusstärke

Die Anordnung wurde in Anlehnung an die Primärwicklung des Stromwandlers gewählt. Beim Stromwandler sind beide Rundleiter immer gleichsinnig durchflossen, da ansonsten der Durchflutungssatz Null ergibt. Die maximale Höhe des Stromflusses in jedem Leiter liegt bei  $1575 \text{ A} \cdot \sqrt{2}$ . Bei Parallelbetrieb der Primärleiter und einem zu messenden Stromes von 3150 A ergibt die Simulation eine maximale Stromdichte von ca.  $2,7 \text{ A/mm}^2$ .

Die gegensinnige Stromdurchflutung wurde für die Veranschaulichung des Proximityeffektes simuliert. Die maximale Stromdichte würde hier bei über  $3,5 \text{ A/mm}^2$  betragen. Um die Stromdichte zu verringern müssten gegensinnig durchflossene Leiter in einem größeren Abstand zueinander angeordnet werden. Zudem käme es im Fall von Kurzschlussströmen zu Stromkräften, die jeweils vom Mittelpunkt nach außen gerichtet sind.



### 4.2.3 Wärmedurchschlag

Wird die erzeugte Wärmemenge in den Betriebsmitteln nicht oder in unzureichendem Ausmaß an die Umgebung abgeführt kommt es durch das fehlende Wärmeabgabevermögen zu einem unzulässigen Anstieg der Isolierstofftemperatur. Durch einen hohen Verlustfaktor im Dielektrikum und einem positiven Temperaturkoeffizient entsteht eine derartige thermische Instabilität.

$$\frac{dP'_v}{dT} > 0 \quad (3-33)$$

Bei thermischer Instabilität steigt die Temperatur mit steigendem Verlustfaktor und umgekehrt an. Die Temperaturentwicklung mündet in eine sogenannte Burn-out-Spirale bis zum Wärmedurchschlag der Isolierung. Die Temperaturentwicklung im Dielektrikum bei der Entwicklung eines Wärmedurchschlages ist in Diagramm 3-4 dargestellt. Der Zusammenhang der verschiedenen Stufen wird durch die unterschiedlichen Feldstärken in der Isolierung ausgedrückt,  $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$  [14].

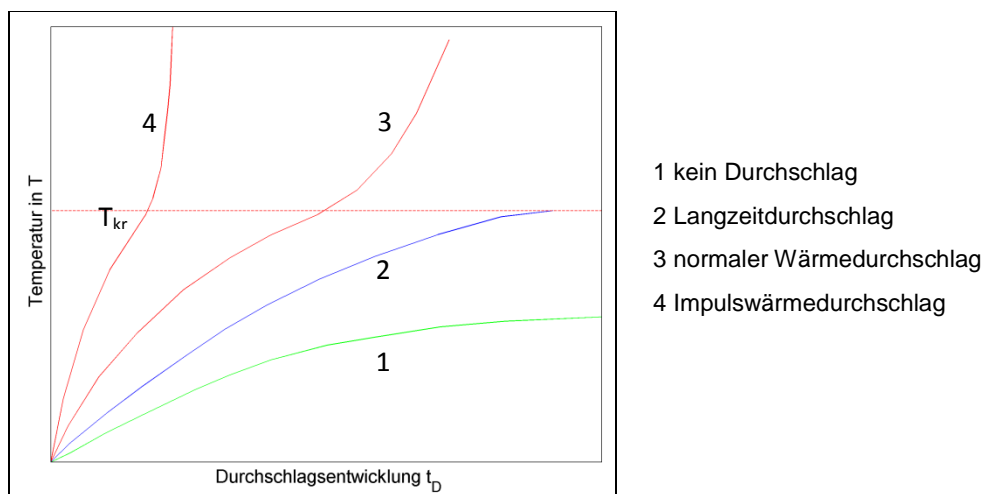


Diagramm 3-4: Temperaturentwicklung bei der Entwicklung eines Wärmedurchschlages, [26]

Für die Stabilitätsbedingung kann  $T < T_{kr}$  (kritische Temperatur) geschrieben werden.

### 4.3 Stromtragfähigkeit

Für die Bestimmung der Stromtragfähigkeit gibt es keine spezifischen physikalischen Grenzwerte für die Leiter. Vielmehr ist die Dimensionierung der Leiter vom isolierenden System und den Verbindungen der Leiteranordnung. Während der gesamten Lebensdauer muss der Stromfluss dauern aufrecht erhalten bleiben und der Leiter darf zu keinem Zeitpunkt eine wesentliche Widerstandserhöhung aufweisen. Die angrenzende Isolierung und deren Isoliervermögen dürfen während der gesamten Lebensdauer nicht unter die Grenzen abfallen. Diese Bedingungen müssen für den zuverlässigen Betrieb für Betriebs- und Kurzschlussströmen eingehalten werden und sind wesentlich durch die Temperatur charakterisiert, siehe Abbildung 3-25 thermische Strombelastung [27].

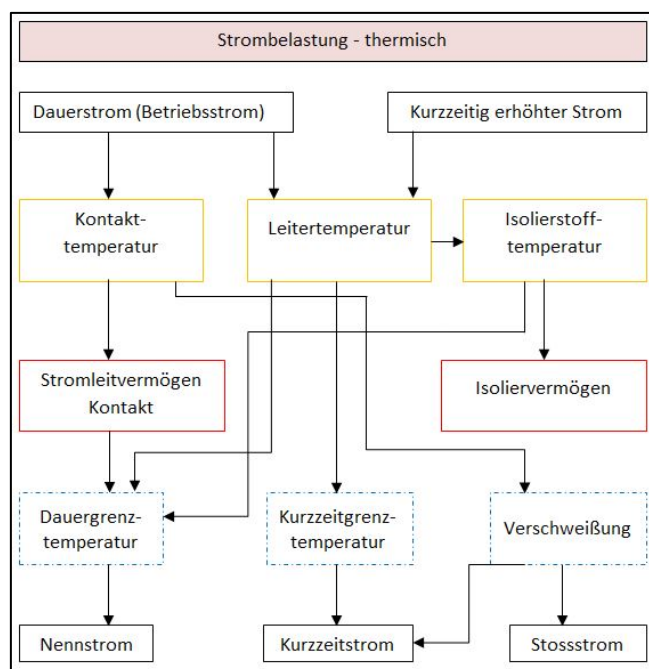


Abbildung 3-25: Ursprung und Einfluss thermischer Strombelastung, aus [27] adaptiert

#### 4.3.1 Klemmverbindungen

Klemmverbindungen stellen eine zusätzliche Wärmequelle dar. Im Vergleich zu einem homogenen Leiterstück weisen Verbindungen einen verminderten Querschnitt für die Stromleitung auf. Die elektrisch wirksame Fläche ist kleiner der Berührungsfläche, mikroskopisch gesehen. Die Oberflächenoxidation von Kontaktoberflächen beeinflussen weniger den elektrischen Widerstand als die Folge der kleiner werdenden wirksamen Fläche der Kontaktverbindung [27].

Die Widerstände von Verbindungen beschreiben nachfolgende Formeln:

$$R_b = \frac{U_{AB}}{I} \quad (3-34)$$

$$R_V = \frac{U_{K,AB}}{I} \quad (3-35)$$

$$R_e = \frac{U_{K,AB} - U_{AB}}{I} \quad (3-36)$$

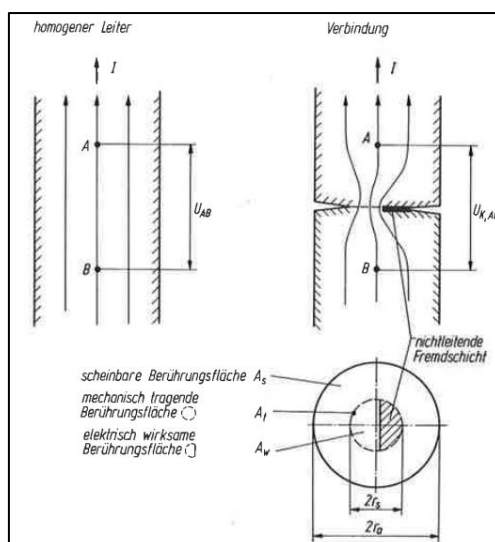


Abbildung 3-26: Darstellung Verbindungswiderstand, [27]

Die Geometrie der Klemmverbindung sowie die Art der Berührung, Einpunkt- oder Mehrpunktberührung sind maßgebend für die Höhe des Kontaktwiderstandes.  $R_e$ , der Engewiderstand ist direkt mit der Kontaktkraft verbunden.  $R_V$  stellt den Verbindungswiderstand dar, der sich aus dem Eigenwiderstand  $R_b$  und dem Engewiderstand zusammensetzt [27].

Durch die direkte Beziehung des Engewiderstandes mit dem Radius der wirksamen Kontaktfläche und somit der Kontaktkraft kann für  $R_{V/\Omega}$  nachfolgende Formel geschrieben werden

$$R_{V/\Omega} = \frac{C_e}{(0,1 \frac{F}{N})^m} \quad (3-37)$$

Bei unbekanntem Oberflächenzustand und unbekannter Kontaktkraft kann der Verbindungswiderstand nicht exakt berechnet werden. Die Bestimmung erfolgt mit der Messung des Verbindungswiderstandes über die Fläche der Klemmverbindung. Die Qualität des Kontaktwiderstandes wird über den Gütefaktor  $k_u$  ausgedrückt. Dieser stellt

den Verbindungswiderstand mit dem Schienenwiderstand gleicher Länge ins Verhältnis [27].

$$k_u = \frac{R_V}{R_{Sch}} \quad (3-38)$$

Eine Verbindung mit Gütefaktor gleich 1 würde keine zusätzliche Verlustleistung erzeugen und ist als sehr gute Verbindung einzuordnen [27].

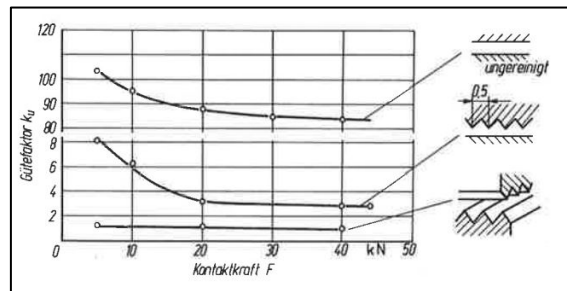


Abbildung 3-27: Gütefaktor in Abhängigkeit der Kontaktkraft, [27]

Abbildung 3-27 wird der Gütefaktor über die Kontaktkraft F verschiedenster Oberflächen dargestellt.

## 5 Untersuchungsobjekt Kombiwandler 220-kV

Bei dem zu untersuchenden Prüfobjekt handelt es sich um einen Kombi-Messwandler der Firma Ritz der Baureihe KOTEF 220-kV, Baujahr 2006. Dieses Modell wird in der 220-kV-Spannungsebene und durch Umschaltung der Sekundärklemmen auch in der 110-kV-Ebene eingesetzt.

Durch die Verschaltung der Stromwandlerprimärspule liegt der Nennstrom bei 600 A, Verschaltung in Serie, bzw. bei 1200 A, parallel.

### 5.1 Wandleraufbau

Es handelt sich hierbei um einen mit Faltenbalg abgeschlossenen, induktiven Öl-Papier-Spannungs- und Stromwandler.

Der Stromwandler ist als Kopfbauweise mit primärer Durchsteckwicklung ausgeführt. Die Sekundärwicklung wird durch die Öl-Papierisolierung zur Hochspannung isoliert. Im Kopfbereich verfügt die Feststoffisolierung über die gesamte Oberfläche über ein leitfähiges Lametterband, das durch eine verlötete Verbindung Hochspannungspotential annimmt. Seitlich der Sekundärspule zwischen Kopfwand und Isolierung befinden sich, über die gesamte Spule verteilt, Papierpads zur Positionierung der Spule. In Grafik Abbildung 5-2 sind zwei der Papierpads eingezeichnet. Die Primärleiter führen durch Dichtung hindurch. In der Grafik sind zudem die Verschaltungsglaschen zur primärseitigen Umschaltung am erstellten CAD-Modell dargestellt.

Oberhalb der Berstscheibe des Stromwandlers sind drei Dehdosen für die temperaturbedingte Ölausdehnung angebracht. Über die Dehdosen wird der Ölstand an der Füllstandsanzeige angezeigt. Der gesamte Wandler stellt ein hermetisch abgeriegeltes System dar und wird im Normalfall ohne Ölwartung betrieben. Am Sockel des Spannungswandlers zur Diagnose des Isolationssystems ist eine Ölabnahmemöglichkeit mit Septum installiert.

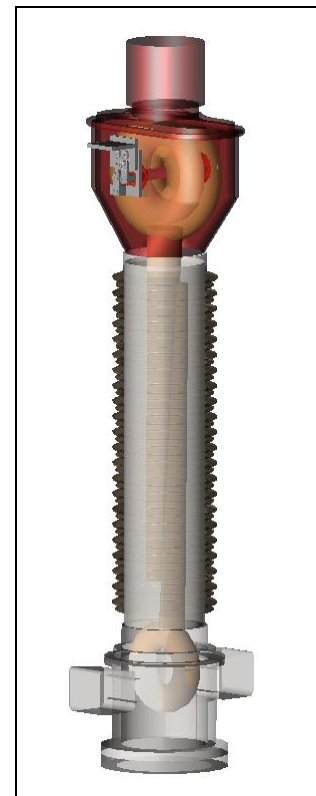


Abbildung 5-1: Modell des Prüfobjekts - Kombiwandler KOTEF 220-kV

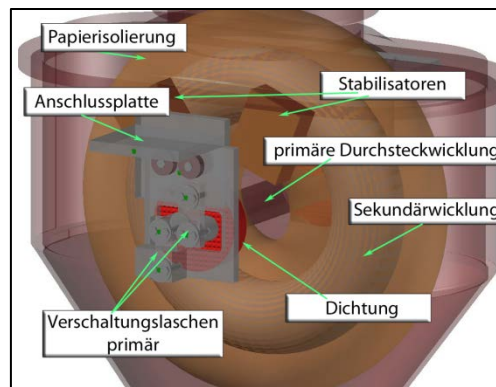


Abbildung 5-2: Modell des Stromwandlerkopfes mit Primärleitersystem KOTEF 220-kV

Die Ausleitung der Sekundärspannung erfolgt über eine kapazitiv abgesteuerte Durchführung Richtung Sockel, wie bereits im Kapitel Öl-Papier-Isolierung beschrieben.

Der Primärleiter ist mit zwei Rundleitern mit je 5 cm ausgeführt, das Material ist nicht bekannt, siehe Abbildung 5-3.

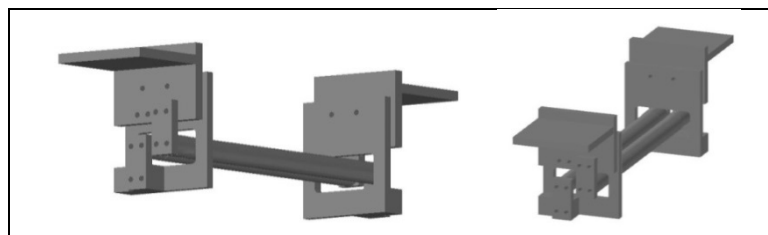


Abbildung 5-3: Primärleitersystem mit Verbindungsblechen

Der Spannungswandler ist als Topfbauweise ausgeführt. Die Hochspannung wird durch den Keramikmantel mittels einer Durchführung zur Primärwicklung geleitet. Die Primärwicklung ist wiederum zum geerdeten Kern durch eine Öl-Papier-Isolierung isoliert.

Die Ölfüllung erfolgte mit NYNAS 4000X und beträgt 480 kg vom Gesamtgewicht von 1535 kg. Daten über das verwendete Papier liegen nicht vor. Die Dichtungsringe (O-Ringe) weisen ein Thermal Rating von 95°C, zuvor 115°C. Das Material der zur Positionierung des Primärleiters verwendeten Dichtungen ist nicht bekannt, es wird aufgrund der Härte und Optik auf Duroplast geschlossen.

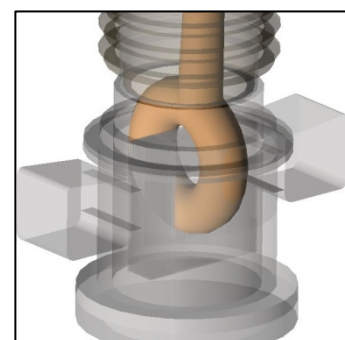


Abbildung 5-4: Spannungswandler im Sockel

In den folgenden Schaltbildern werden die primären und sekundären Verschaltungsmöglichkeiten des Strom- und Spannungswandlers dargestellt.

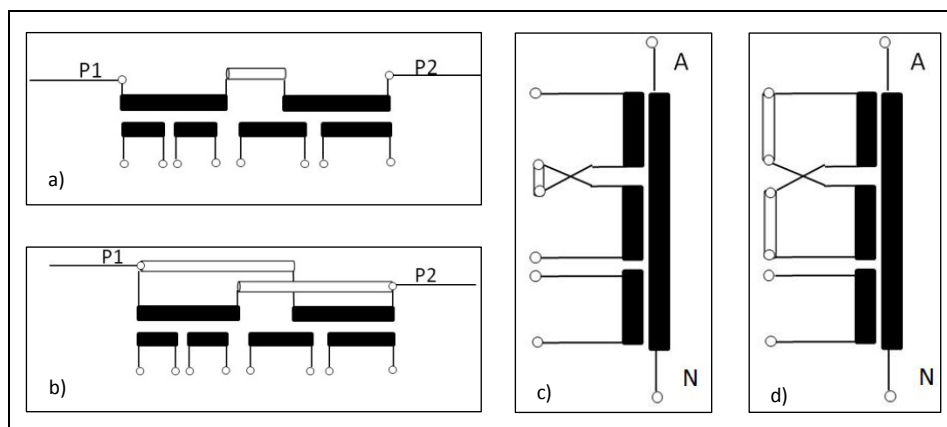


Abbildung 5-5: a) Primärverschaltung in Serie  $I_1=600$  A, b) Primärverschaltung Parallel  $I_1 = 1200$ , c) Spannungswandler sekundär  $220 \sqrt{3}$ , d) Spannungswandler sekundär  $110 \sqrt{3}$

## 5.2 Fehlerbild KOTEF 220-kV, Baujahr 2006

Im Jahr 2013 sind zwei Kombiwandler geborsten. Ein weiterer wurde aufgrund von Zischgeräuschen und Rauchentwicklung, eventueller Ölsprühnebel, außer Betrieb genommen. Diese drei Zwischenfälle ereigneten sich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne, direkt nach einer längeren Hitzeperiode im Sommer 2013. Ergänzend ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass 2013 einer der wärmsten und sonnigsten Sommer der Messgeschichte war und während der über dreiwöchiger Hitzewelle von bis zu  $40,5^\circ\text{C}$  in allen Bundesländern, außer in Vorarlberg, Temperaturrekorde gemessen wurden [28].

Hinsichtlich der frühen Ausfälle in Bezug auf die Lebensdauer wurde beschlossen, einen geborstenen und den außer Betrieb gesetzten Wandler näher zu untersuchen. Die Dehdosen am Kopf des Betriebsmittels waren allesamt aufgebläht. Die Berstscheibe war außerdem verformt. Es ist jedoch nicht bekannt bei welchem Druck die Dehdosen platzen bzw. die Berstscheibe sich verformt. Die zur Positionierungen der Spule verwendeten Papierpads unterschieden sich stark zu anderen Baureihen und es kamen verschiedenste nicht näher bekannte Papiersorten zum Einsatz. Alle Verbindungen, die Potentialausgleichsverbinding und die Hochspannungsverbinding zum Spannungswandler, wiesen keine Auffälligkeiten auf.

Im Zuge der Zerschneidung der Papierisolierung konnten leichte, dunkle Verfärbungen innerhalb der Schichten festgestellt werden. Über die gesamte Isolierung verteilt wurde auffällig viel Leim verwendet.

Bei der Zerlegung des Spannungswandlers wurde eine außergewöhnlich starke Blasenbildung nach dem Ablösen der Lagen festgestellt. Der geborstene Wandler wies

eine Durchschlagsstrecke von der Stromwandlerkernschale zum Deckel des Wandlerkopfes im Winkel von  $45^\circ$ , ausgehend von Kernschalenmittelpunkt, auf.

Bei der Zerschneidung konnten blaue Spuren, mögliches X-Wachs, Beschreibung siehe Tabelle 3-2: Oxidationsmechanismen im Öl, [1], festgestellt werden.

Aufgrund dieser Ausfälle wurde nach ähnlichen Zwischenfällen in der Literatur gesucht. Dokumentierte Fehlerfälle von Kombimeswandlern wurden jedoch nicht gefunden. Im Großen und Ganzen behandelten die gefundenen Veröffentlichungen Ausfälle von Stromwandlern.

Ältere Publikationen speziell Duval M. et al in [29] beschrieb mehrere Ausfälle von 765-kV-Stromwandlern. Durch die Zerschneidung der Stromwandler konnten Fehlerstellen im Papier, nahe der Primärleiter festgestellt werden. Im Bereich dieser Fehlerstelle konnte ein erhöhter Wassergehalt festgestellt werden. Der thermische runaway der Stromwandler ließ sich in diesen Fällen auf erhöhte dielektrische Verluste, aufgrund von instabilem Öl zurückschließen.

In einer weiteren Publikation wurden vermehrte Ausfälle von 230-kV-Stromwandlern in Mexiko dokumentiert [8]. Wie im Fall dieses Projektes vermehrten sich die Ausfälle nach längeren Hitzeperioden. Ergänzend ist zu bemerken, dass die Schäden meist nach einer geraumen Zeit der Höchstlast und der maximalen Umgebungstemperatur in der Nacht, nach der Abkühlung des Wandlers, auftraten und die Wandler in maritimen Regionen installiert waren. Die Messwandler wiesen zudem einen erhöhten Wassergehalt im Bereich des Sättigungslevels auf. Bei der Sichtung der Materialkomponenten des Wandlers, wurden brüchige und gerissene Membranen bzw. Dichtungen festgestellt. Die Messwandler waren somit nichtmehr hermetisch abgeschlossen. Die Verfeuchtung des Öls lässt sich in diesem Fall durch den Kontakt mit der Luft erklären [8].

Dadurch könnte der Schluss gezogen werden, dass die Rückdiffundierung des Wassers in das Papier Schwachstellen durch Wasseransammlung erzeugten. Die Ursache lag bei diesen Ausfällen zwar in der Degeneration der Dichtungen und der damit verbundenen Verfeuchtung des Wassers, dennoch ähnelt die Art des Ausfalles, der der Kombimeswandlern in diesem Projekt.

Dies wird zum Anlass genommen, die Feuchteentwicklung während der Dauerversuche mit zu untersuchen.



### 5.3 Berechnungen

Um einen Vergleich für die Messwerte der Versuche im Prüffeld zu bekommen wurden Berechnung bezüglich des Widerstandes, der Stromwärmeverluste und der einstellenden Temperatur unternommen.

Zu der Ermittlung der  $I^2R$ -Verluste wurde der Widerstand des Primärleitersystems berechnet. Betrachtet wurden hierfür die einzelnen Abschnitte, wie in Abbildung 5-6 am Beispiel der Verschaltung in Serie dargestellt.

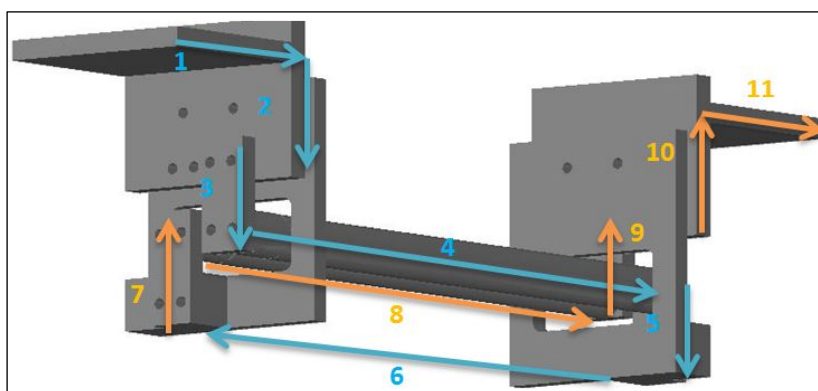


Abbildung 5-6: Einteilung des Primärleiters in Abschnitte

Für die Berechnungen sind nachfolgende Werte herangezogen worden. Aufgrund des unbekanntes Materials wurden die Werte für Kupfer und Aluminium berechnet.

Tabelle 5-1: spezifisches Werte von Kupfer, Aluminium und Eisen, [5]

Material	elektrischer Widerstand		spez. thermische Leitfähigkeit	Wärmekapazität	Dichte
	spez. Widerstand	Temp.-Koeffizient			
	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\frac{1}{\text{K}}$	$\frac{\text{Ws}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Kupfer	0,01721	0,0039	401	382	8,92
Aluminium	0,0265	0,0039	236	896	2,7
Eisen	0,1 – 0,15	0,0056	80,2	452	7,874

Im Anhang, unter A Untersuchungsobjekt, sind die gemessenen Maße und berechneten Querschnitte der Abschnitte zu entnehmen. Die Widerstandswerte wurde mit der Formel ( 3-31 ) berechnet.

Tabelle 5-2: Berechnete Widerstandswerte vom Primärleitersystem bei 20°C

Abschnitt	Kupfer	Aluminium
#	$\mu\Omega$	$\mu\Omega$
1	0,7529	1,1594
2	0,7529	1,1594
3	2,1513	3,3125
4	5,6096	8,6377
5	2,1513	3,3125
6	wurde nicht berechnet	
7	2,1513	3,3125
8	5,6096	8,6377
9	2,1513	3,3125
10	0,75294	1,1594
11	0,75294	1,1594

Beim Primärleitersystem bzw. den 11 Abschnitten ist es sinnvoll, die erzeugte Wärmemenge über den Strom bei verschiedenen Temperaturen zu betrachten. Die Kurven in Rot stellen die Verluste bei 100°C, in Blau bei 60°C und in Grün bei 20°C dar. Die Verluste sind je Abschnitt abgebildet und mit Formel ( 3-30 ) ohne Stromverdrängung berechnet.

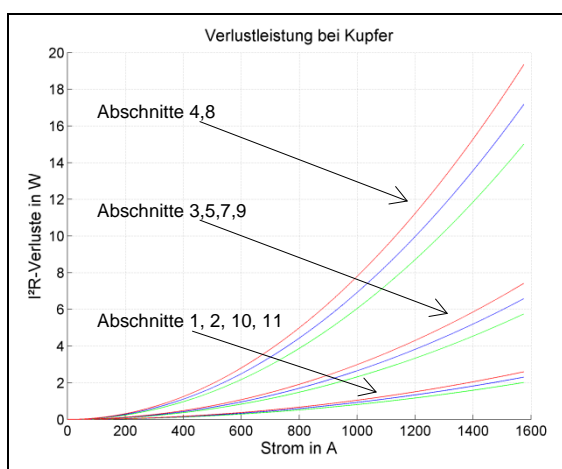


Diagramm 5-1: Berechnete Verlustleistung bei Kupfer

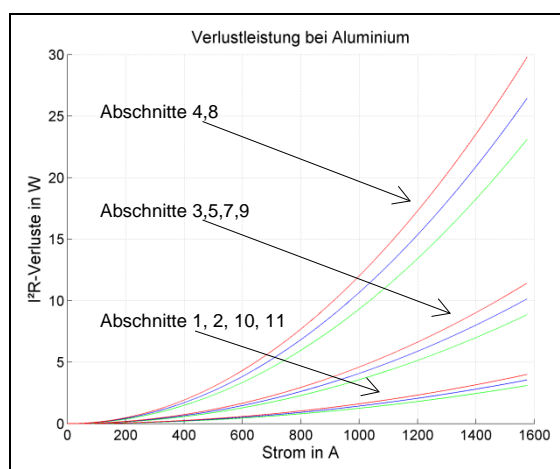


Diagramm 5-2: Berechnete Verlustleistung bei Aluminium

Die im Wandler erzeugte Wärmemenge durch die Primärleiter wird durch die Abschnitte 4 und 8 dargestellt. Im Gesamten betragen diese bei 60°C und 1575 A in etwa 34 W.

Durch die Beziehung der Formel ( 3-21 ) und unter zu Hilfenahme von Vereinfachungen bezüglich des gesamten Systems des Stromwandlerkopfes und der Verwendung von integralen Werten bei Strahlung und Konvektion kann die maximale Übertemperatur ermittelt werden.

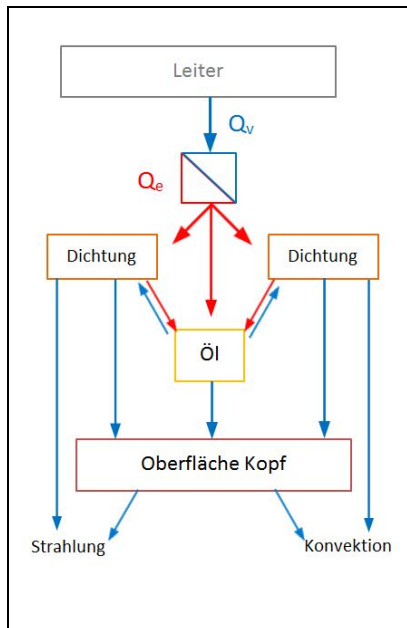


Abbildung 5-7: Modell des Wärmeflusses

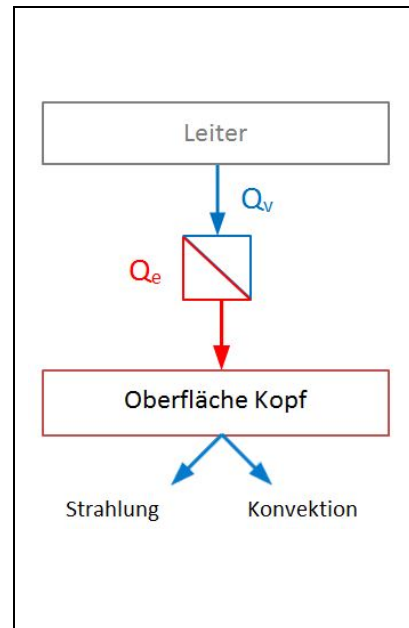


Abbildung 5-8: Modell zur Ermittlung der maximalen Temperatur

Abbildung 5-7 zeigt ein vereinfachtes Modell des Wärmeflusses im Stromwandlerkopf. Die zugeführte Energie wird durch die Primärleiter zur Verfügung gestellt. Über die Dichtungen, das Öl und die Oberfläche des Gehäuses wird die Wärme an die Umgebung abgegeben. Abbildung 5-8 stellt eine weitere Vereinfachung dar. Diese wurde für die Berechnung der maximalen Temperatur herangezogen.

Die Oberfläche des Gehäuses wurde aus dem angenäherten CAD-Modell entnommen und liegt bei  $0,9759 \text{ m}^2$ . Strahlung und Konvektion wurde zusammengefasst und von  $0,5 - 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  Wärmeabgabevermögen in  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  Schritten variiert. Die untersuchten Leitertemperaturen beliefen sich hierbei auf  $60^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$ .

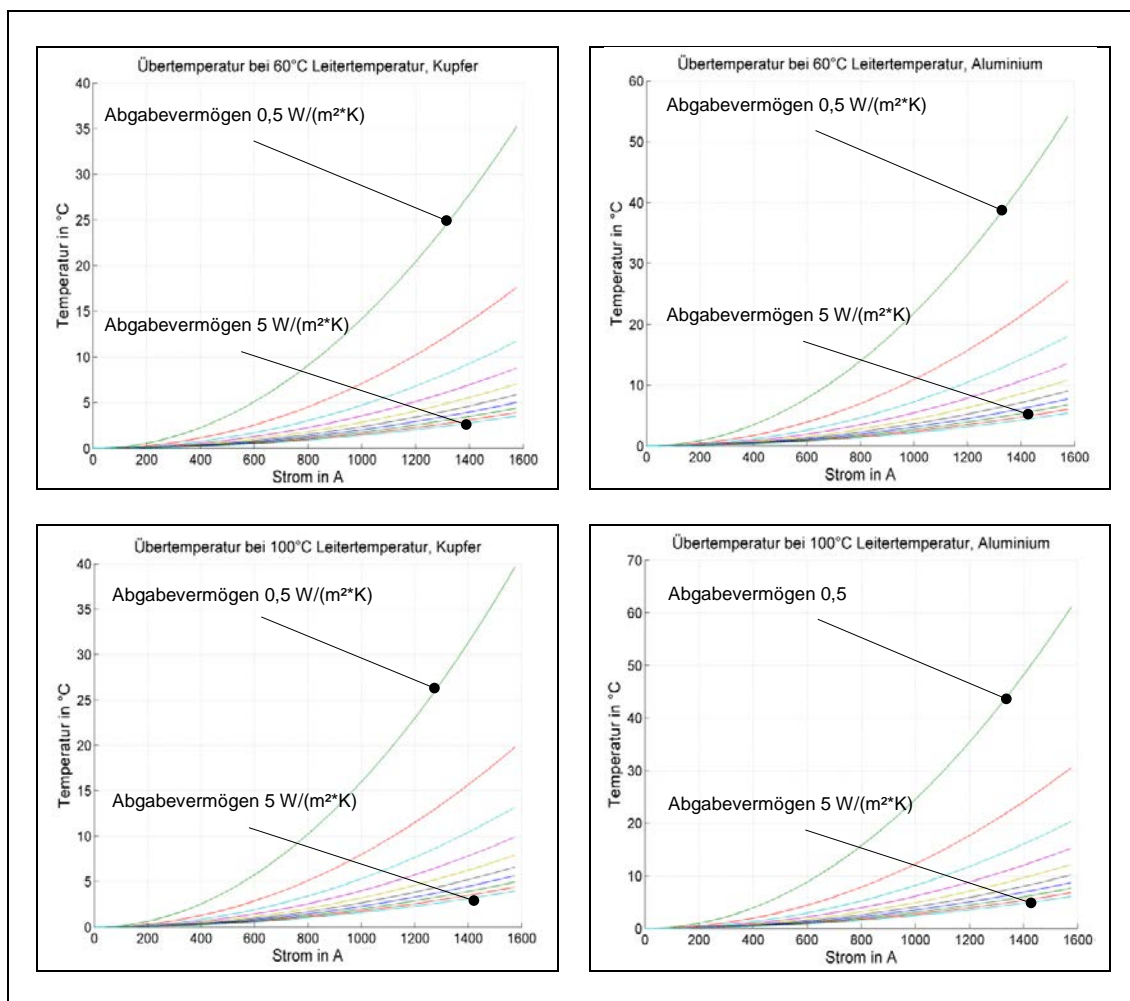


Diagramm 5-3: Übertemperatur variiert nach dem Abgabevermögen,  
oben: 60°C, unten: 100°C, links: Kupfer, rechts: Aluminium

Die Übertemperatur stellt jene Temperatur dar, die durch diese Menge an zugeführter Energie und diesem Wärmeabgabevermögen, unabhängig von der Ausgangstemperatur, um die sich das System erwärmt.

Diagramm 5-3 beinhaltet die durchgeführten Berechnungen der Übertemperatur bei der Variation des Wärmeabgabevermögens. Der Vergleich von Kupfer und Aluminium verdeutlicht den Einfluss des Widerstandes in Bezug auf die Übertemperatur. Wie ersichtlich ist trägt die Leitertemperatur, bei höherer Temperatur gleich höherer Widerstand, maßgeblich zur Erwärmung bei.

Ohne genau Kenntnis des tatsächlichen Abgabevermögens durch Konvektion und Strahlung lässt sich rechnerisch auf diese Art und Weise nur eine Variation der Parameter durchführen. In Kombination mit den Prüfergebnissen und deren Abgleich kann das Modell bzw. die Berechnung verfeinert werden.

Ein detailgetreues Wärmeleitnetzwerk des Gesamtsystems wird für weiterführende Arbeiten angedacht, siehe Kapitel 8.

## 6 Untersuchungsanordnung

### 6.1 Untersuchungsablauf

Wie im Kapitel 5.2 „Fehlerbild KOTEF 220kV“ ausführlich beschrieben werden isolationstechnische Probleme in Verbindung mit Wasser vermutet. Im Extremfall kann dies an der Stromwandlerspule bis zum Durchschlag der Isolation führen. Zudem wird eine Korrelation von Ausfällen in Verbindung mit der Umgebungstemperatur vermutet.

Die Ziele der zu durchführenden Prüfungen lagen in der Feststellung des Leiter-/Übergangswiderstandes des Primärleitersystems, in der Bestimmung des Einflusses verschiedener Anzugsmomente der Klemmverbindungen und der Sicherstellung der Betriebsmittelgrenze bzw. der Feststellung der Extremwerte. Untersucht wurden des Weiteren ein möglichen Wärmeeintrag, die Dichtheit des Messwandlers und das Verhalten des Feuchtegehaltes bzw. des Gleichgewichtszustandes.

Der Prüfling wurde mit dem thermischen Dauerstrom geprüft. Je nach Verschaltung des Messwandlers kam der einfache bzw. der doppelte thermische Dauerstrom zum Einsatz.

Die Bestimmung der Leiter- und der Übertragungswiderstände erfolgte mit dem Gleichstrom in der Höhe von 100 und 150 A.

Freiluft-Messwandler sind direkt den wetterbedingten Einflüssen ausgesetzt. In Zeiten einer Hitzeperiode werden sie bis an die obere Grenze von 40°C Umgebungstemperatur und darüber hinaus beansprucht. Angesichts dieser Tatsache erfordert die Prüfung im Labor eine Umgebungstemperatur von 40°C. Die Temperaturverteilung am, und die Feuchteentwicklung im Betriebsmittel wurden unter erhöhter Umgebungstemperatur untersucht.

Tabelle 6-1: Dauerprüfstrom bei  $T_{Amb} = 40^{\circ}\text{C}$

Prüfstrom in Abhängigkeit der Verschaltung		Umgebungstemperatur
In Serie	Parallel	
$I_{th}$	$I_{th}$	$T_{Ambient}$
A	A	°C
1575	3150	$40 \pm 4$

Ein Wärmeeintrag in das Primärleitersystem kann durch zu hohe Temperaturen an der Zuleitung, wie zum Beispiel durch den Anschluss von Hochtemperaturseilen, oder auch

durch schlechte Klemmverbindungen, was in einem hohen Übergangswiderstand resultiert, zustande kommen.

Im Mittelpunkt der Untersuchung stand der Vergleich einer ideal gekühlten, keine Wärmeeintrag und der realen Zuleitung. Die ideale Zuleitung wurde als Stromschiene ausgeführt. Durch die vergrößerte Oberfläche und die vergrößerten Anzahl an Schraubverbindungen wird ein bestmöglicher Kontakt zu den Klemmlaschen gewährleistet. Real sind die Zuleitungen durch Seilklemmen mit Federscheiben und dem Hochspannungsseil arrangiert. Dieser Vergleich wird in den ersten zwei Dauerversuchen untersucht. Zudem wurde der Einfluss des Anzugsmomentes an der Verbindung der Stromschiene mit den primären Anschlussklemmen genauer beobachtet.

Die Klemmverbindung bzw. deren Wärmeverzug wurde nach folgender Prüfkongfiguration getestet:

Tabelle 6-2: Prüfkongfiguration zur Untersuchung des Wärmeverzugs durch verschiedene Anzugsmomente

Prüfbezeichnung	Zuleitung	Anzugsmoment
-	-	Nm
AM_AS_1	Stromschiene (Alu)	46
AM_AS_2	Stromschiene (Alu)	51
AM_AS_3	Stromschiene (Alu)	30
AM_SK_1	Seilklemme & Leiterseil	46
AM_SK_2 und folgende	aufgrund der Federscheibe nicht möglich	

Der Vergleich der Stromschiene mit der Seilklemme und dem Leiterseil wird, wie nachfolgend dargestellt, untersucht.

Tabelle 6-3: Dauerversuch 1 DA\_VG\_AS, Dauerversuch 2 DA\_VG\_SK

Prüfbezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Stromhöhe	Anzugsmoment
			A	Nm
DA_VG_AS	In Serie	Stromschiene (Alu)	1575	46
DA_VG_SK	In Serie	Seilklemme & Leiterseil	1575	46

Wird der Messwandler bei einer Umgebungstemperatur von 40°C und einer parallelen Verschaltung mit dem thermischen Dauerstrom betrieben, stellen sich elektrotechnische und thermische Extremwerte bezüglich der Belastung ein. Im Netzbetrieb erfahren die Komponenten der Energieversorgung üblicherweise eine zyklische Beanspruchung bis an die Betriebsgrenzen, in Ausnahmefällen erfahren sie jedoch eine permanente Grenzbeanspruchung.

Das Verhalten unter Maximalbelastung und im zyklischen Betrieb wurde ebenfalls untersucht. Für den zyklischen Betrieb wurde die Zeitkonstante des Messwandlers ermittelt und anschließend durch periodische Strombeaufschlagung im Dauerversuch getestet.

Tabelle 6-4: Dauerversuch 3 DA\_EW\_SK, Dauerversuch 4 DA\_ZY\_SK

Prüfbezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Prüfstrom
			A
DA_EW_SK	Parallel	Seilklemme & Leiterseil	3150
DA_ZY_SK	Parallel	Seilklemme & Leiterseil	3150 (zyklisch)

Bei Öl-Papier isolierten Messwandlern ist ein niedriger Feuchtegehalt für einen im Rahmen der Lebensdauer unproblematischen Betrieb essentiell. Demzufolge ist die Wassergehaltsentwicklung während der Dauerversuche von großem Interesse. Wie in Kapitel 5.2 erwähnt, wird vermutet, dass sich das eventuell im Papier vorhandene Wasser nach einer nicht definierten, längeren Belastung ins Öl diffundiert. Vor, während und am Ende des Dauerversuchs wurden Ölproben für Feuchte- und DGA-Messungen entnommen. Bei veranschlagten Prüfzeiten von ca. 1000 Stunden je Langzeittest erfolgten die Ölprobenentnahme im Bereich von 250 - 350 Stunden.

Nach Abschluss der Stromdauerversuche beginnen die Untersuchungen unter Spannung. Beginnend mit einer Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung wird der dielektrische Zustand des Messwandlers eruiert.

Aufgrund der Sättigung des Eisenkernes bei höheren Spannungen, wird die Teilentladungsmessung mit höherer Frequenz erfolgen. Durch die zur Verfügung stehenden Prüfgeneratoren kann allerdings keine Hochspannung variabler Frequenz erzeugt werden. Im Falle der Teilentladungsmessung wird sekundärseitig die Prüfspannung variabler Frequenz eingespeist. Für einen Teilentladungsfreien Messkreis muss womöglich ein TE-Filter konstruiert und zwischen Prüfling und Spannungsquelle dazwischen geschaltet werden.

Während der Dauerspannungsversuche wird dann in regelmäßigen Abständen der Zustand des Isolationssystems durch die TE- und Verlustfaktormessung diagnostiziert.

Der gesamte Ablauf der Untersuchung ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 6-5: Gesamter Untersuchungsablauf im Labor

Voruntersuchungen					
		Bezeichnung	Prüfstrom	AC/DC	Bemerkung
		-	A	-	-
Widerstandsbestimmung		WI_DC	100 - 150	DC	kurze Messzeit
Anzugsmoment		AM_AS_1	bis 1575 A	AC	≥ 72 h
		AM_AS_2	bis 1575 A	AC	≥ 72 h
		AM_AS_3	bis 1575 A	AC	≥ 72 h
Strom - Dauerversuche					
Bezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Prüfstrom	Dauer	Bemerkung
-	-	-	A	h	-
EW_ZK_AS	In Serie	Stromschiene (Alu)	1575	150	Zeitkonstanten
DA_VG_AS	In Serie	Stromschiene (Alu)	1575	1000	Temperaturverhalten, Nr. 1 Vergleichsmessung
Begleitende Öluntersuchung					
-	-	h	Diagnose		Bemerkung
ÖM_DGA_# ÖM_KF_#	Ölentnahme	150 – 200	Karl-Fischer-Titration DGA		Gas-in-Öl-Analyse, Feuchtegehalt
Weiterführende Strom - Dauerversuche – siehe Kapitel 8					
Bezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Prüfstrom	Dauer	Bemerkung
-	-	-	A	h	-
DA_VG_SK	In Serie	Leiterseil & Seilklemme	1575	1000	Temperaturverhalten, Nr. 2 Vergleichsmessung
DA_EW_SK	Parallel	Leiterseil & Seilklemme	3150	1000	Extremwerte
DA_ZY_SK	Parallel	Leiterseil & Seilklemme	3150 (zyklisch)	1000	Zyklische Belastung, Atmung des Wandlers
Weiterführende Spannungs – Dauerversuche – siehe Kapitel 8					
Bezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Prüfsg.	Bemerkung	
-	-	-	kV	-	
DA_SPG_#	Parallel	Hochspannungs- verbindung	$245/\sqrt{3}$		
Weiterführende begleitende Untersuchungen – siehe Kapitel 8					
Bezeichnung	Verschaltung	Messanschluss	Prüfsg.	Frequenz	Bemerkung
-	-	-	kV	f	-
DA_VF_#	Parallel	Hochspannung - Erde	bis 30 kV	0,1 – 50 Hz	
TE_SPG_#	Parallel	Speisung sekundärseitig	bis 1,2 U <sub>N</sub>	Spannung höherer Frequenz	
Bezeichnung		Prüfstrom	AC/DC	Bemerkung	
		A	-	-	
Anzugsmoment Variation der Verbindungsflasche	AM_VL_#	bis 1575 A	AC	≥ 72 h	
Widerstandsbestimmung	WI_DC_#	100 – 150	DC	kurze Messzeit, Variation von 50 – 75 Nm	



## 6.2 Prüffeld

Das Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement verfügt über diverse Labore, wie die Dissertantenlabore, das 220-kV Labor, einen Dauerversuchsraum, die kleine und die große Halle. Dennoch ist die Dauerprüfung eines Kombiwandlers eine besondere Herausforderung.

Aufgrund der Abmessungen des Wandlers von 4,19 m Höhe, der Art der Prüfung und der notwendigen Umgebungstemperatur, konnte der Prüfaufbau in keinem der oben genannten Labore aufgebaut werden. Daher wurde im Verkehrsraum, der für die An- und Ablieferung des Wandlers optimalen Zugang erlaubt, ein Prüffeld installiert.

In diesem Kapitel werden der Aufbau der Prüfkabine, die Strombeaufschlagung, die elektromagnetischen Felder im Nah-/Verkehrsbereich, sowie die Mess- und Sicherheitstechnik und abschließend der Regel- und Messkries behandelt.

### 6.2.1 Aufbau der Prüfkabine

Im Zuge dieses Projektes wurde eine Einhausung für den Prüfling aufgebaut. Diese diente zur Konstant-Haltung der geforderten Umgebungstemperatur.

Für einen problemlosen Betrieb der Dauerversuche muss die Prüfkabine verschiedene Anforderungen erfüllen. Besonders wichtig sind der Erhalt der Temperatur, die Vermeidung induzierter Spannungen und deren Verschleppung, sowie eine geringe Brandlast bzw. die Verwendung von schwerentflammaren Materialien.

Ströme bis 3 kA erzeugen ein dementsprechendes Magnetfeld im Nahbereich. Deswegen wurde auf ein metallisches Gerüst verzichtet und die Anordnung schwebend aufgebaut. Die örtliche Gegebenheiten und die Steuerung der Umgebungstemperatur verlangten eine eng bemessene Dimensionierung der Einhausung.

Als Aufhängvorrichtung kam ein Holzgerüst zum Einsatz, das über ein statisches Seil mittels Umlenkrolle an der Decke des Gebäudes montiert wurde. Die Polyplan-Flachplane, das Material der Einhausung, wurde durch ein Hakenband am Holzgerüst angebracht.

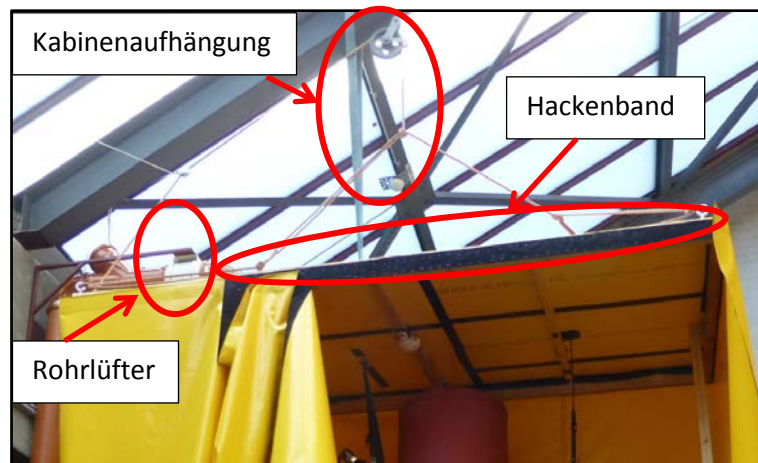
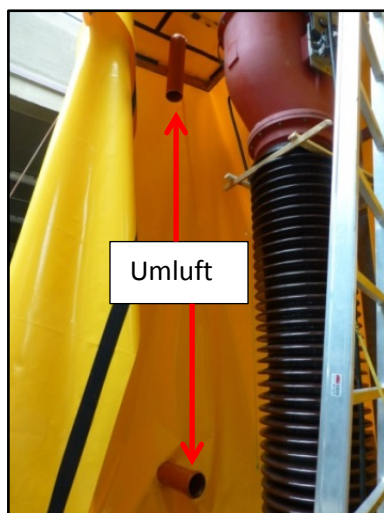


Abbildung 6-1: Aufhängung und Rohrlüfter der Prüfkabine

Beheizt wird die Einhausung mittels eines Heizlüfters, der außerhalb positioniert ist. Über einen Thermoschlauch gelangt die Heißluft in die Prüfkabine. Angesichts des Temperaturabfalls am Thermoschlauch wurde dieser zusätzlich mit Schaumstoff isoliert.

Reale Gegebenheiten sind im Laborversuch nachzubilden. Eine Konvektion bzw. ein Luftzug am Prüfling wurde durch ein Umluftsystem umgesetzt. Hierfür wird an der Decke der Prüfkabine über KG-Rohre die erwärmte Luft abgesaugt und bodennah zugeführt, siehe Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3.

Abbildung 6-2: Umluftsystem  
Einsaugung und Rückführung  
der WarmluftAbbildung 6-3: Umluftsystem  
Ansicht von außen

Der eingesetzte Rohrlüfter verfügt über zwei Drehzahlstellungen. Die niedere Drehzahl, erzeugt die Umluft und die höhere Drehzahl kommt für die Kühlung zum Einsatz. Steigt die Temperatur über 40°C wird auf die zweite Drehzahlstellung umgeschaltet, die Kühlungsklappe wird geöffnet und Heißluft an die Umgebung abgegeben.

Abbildung 6-4 zeigt den Aufbau der Versorgung der Komponenten im Prüffeld. Über den Schaltschrank werden alle am Prüffeld installierten Geräte versorgt.

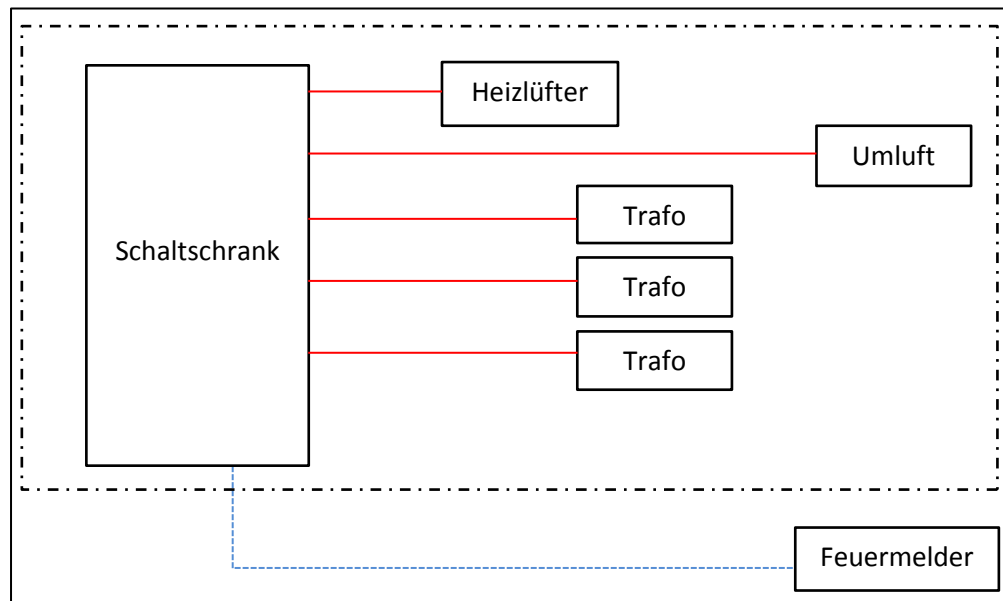


Abbildung 6-4: Versorgung der Komponenten im Prüffeld

### 6.2.2 Strombeaufschlagung

Die Speisung des Prüflings erfolgt bei den Versuchen bis 1575 A über eine Stromschiene aus Aluminium und im Falle der Prüfung mit dem doppelten thermischen Strom (3150 A) über ein Hochspannungsseil. Beide Aufbauten stellen einen Kurzschlusskreis dar. Über Stromtransformatoren, die durch Stelltransformatoren gespeist werden, wurde im Kurzschlusskreis der Prüfstrom eingepreßt.

Die Prüfkfigurationen für 1575 A und 3150 A sind in den folgenden Grafiken dargestellt.

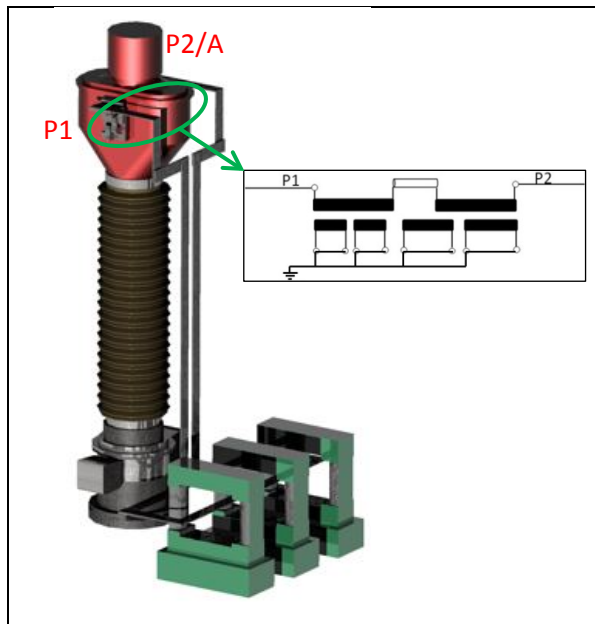


Abbildung 6-5: Modell des Prüfaufbaus,  
Konfiguration I = 1575 A - Aluminiumschiene

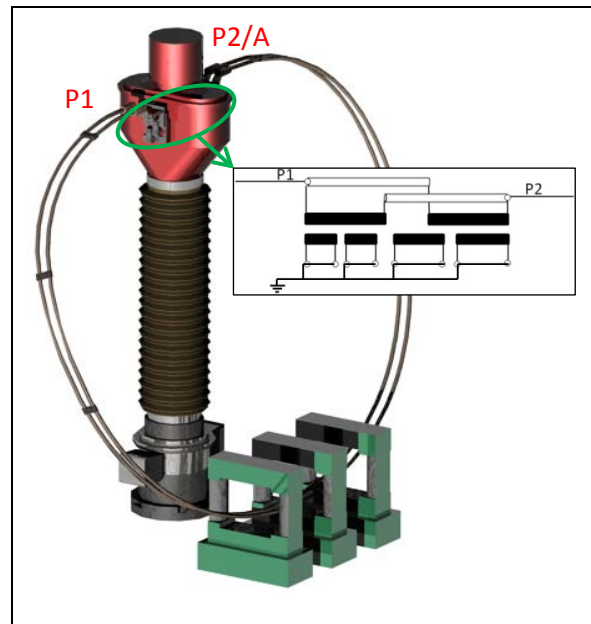


Abbildung 6-6: Modell des Prüfaufbaus,  
Konfiguration I = 3150 A - Seilklemme und  
Hochspannungsseil

Durch die Verwendung von Schienen kann der Skin-Effekt, siehe Punkt 4.2.2 Stromverdrängung, nahezu vermieden werden. Die vergrößerte Oberfläche hilft die Leitertemperatur der Aluminiumschienen so gering wie möglich zu halten, um einen Wärmeeintrag über die Schienen zu vermeiden. Es wurde die gesamte zur Verfügung stehende Kontaktfläche der Anschlussplatte zur Montage der Schiene verwendet. Dadurch entstand ein großflächiger Kontakt, bei dem über acht Schrauben der Anpressdruck ausgeübt wird.



Abbildung 6-7: Aluminiumschiene und Wandlerkontaktfläche

Während des Dauerversuches DA\_VG\_AS kamen Stromschienen im Ausmaß von 100 mm x 10 mm zum Einsatz. Die Speisung während der Dauerversuche mit 3150 A erfolgt über eine Doppelseilklemme und zwei Hochspannungsseilen.

Aufgrund der Induktivität des Kurzschlusskreises, der örtlichen Einschränkungen durch eine Kranschiene und der Reduktion des Magnetfeldes im Nahbereich musste der Aufbau des Kurzschlusskreises so eng wie möglich erfolgen.



Abbildung 6-8: Aufbau der Stromzufuhr für 1575 A

### 6.2.3 Magnetische-Felder im Nah-/Verkehrsbereich

Aufgrund des Durchganges längs neben dem Prüffeld musste gewährleistet werden, dass der geltende Grenzwert von  $200 \mu\text{T}$  [30] im frei zugänglichen Bereich eingehalten wird.

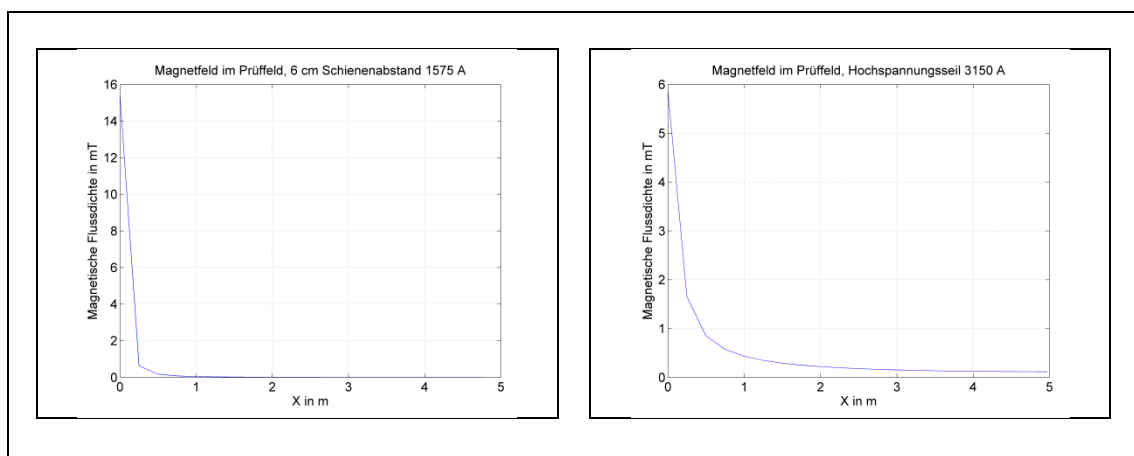


Diagramm 6-1: Magnetische Flussdichte im Prüffeld  
**links:** 1575 A, 6 cm Schienenabstand, **rechts:** 3150 A, Hochspannungsseil

Die Höchstwerte der Simulation der magnetischen Flussdichten nahmen bis 0,5 m sehr stark ab. Im Prüffeld wurden die Leiter für die Untersuchungen mit 1575 A mit 6 cm Abstand aufgebaut. Die Simulation der Flussdichte zeigt zwar Anfangswerte über dem Grenzwert, jedoch nimmt die Flussdichte bis 0,5 m stark ab. Wie im Diagramm 6-1 ersichtlich, wird der Grenzwert für Betriebspersonal von 1 mT bei unter 0,5 m überschritten. Folglich dürfen bei diesen Untersuchungen mit 3150 A keine Manipulationen ohne Stromabschaltung erfolgen.

In Tabelle 6-6 sind die Simulationswerte mit 3150 A von 0,5 – 3 m enthalten. Der Durchgang des Verkehrsraumes befindet sich 2 – 3 m entfernt von den Stromschienen des Prüfaufbaus, in der Spalte „Abstand“ Grau hinterlegt. Grün hinterlegte Werte liegen unter und Rot hinterlegte Werte über dem Grenzwert der Allgemeinbevölkerung.

Tabelle 6-6: magnetische Flussdichte im Nahbereich des Prüffeldes

Abstand	magnetische Flussdichte	
	Stromschiene	Hochspannungsseil
m	$\mu\text{T}$	$\mu\text{T}$
0,5	175,20	852,90
1	44,12	436,10
1,5	18,90	293,50
2	9,95	222,30
2,23	5,89	199,00
2,5	4,62	180,40
3	3,63	154,00

Für Betriebspersonal liegt der Grenzwert laut ICNIRP 2010 bei 1 mT [30]. Dieser Grenzwert wird im Umkreis von 0,5 m und mehr eingehalten. Die Versuche mit 1575 A können ohne besondere Vorkehrungen durchgeführt werden. Bei den Untersuchungen mit 3150 A muss ca. 30 cm des Verkehrsraumes abgesperrt werden, da in diesem Bereich der Grenzwert von 200  $\mu\text{T}$  für die Allgemeinbevölkerung überschritten wird und erst ab 2,23 m Entfernung eingehalten werden kann.

## 6.2.4 Messtechnik

### Thermoelemente

Das Kernstück der Messung lag in der Ermittlung der Temperaturverteilung an den Klemmverbindungen der Verschaltungselemente. Von weiterem Interesse ist die Temperatur des Öls, die allerdings nicht direkt gemessen werden konnte. Hierfür wurde ein Temperatursensor (TE05) an der Berstscheibe unter den Ausdehnungsgefäßen angebracht, siehe Abbildung 6-10.

Das Temperaturprofil der verschiedenen Prüfanordnungen wurde über 13 Temperatursensoren aufgenommen. Die Sensoren wurden am Primärleitersystem bzw. an den Klemmverbindungen platziert. In Abbildung 6-10 ist die Positionierung der Thermoelemente ersichtlich. Es wurden



Abbildung 6-9: TMG - Temperaturmessgerät, 16-Kanal

Thermoelemente des Typ „T“ verwendet. Über die Lötstelle wurde zum Schutz ein Schrumpfschlauch angebracht. Für die Haftung der Sensoren an der Messstelle wurde ein Epoxydharzkleber mit Härter verwendet. Die Thermoelemente T01 und T02 dienen zur Messung der Kabinentemperatur in ca. 3 m Höhe. Im Schnitt wiesen die Verbindungen zu den Thermoelementen eine Länge von ca. 15 m auf, da der Messplatz im benachbarten Labor untergebracht war. Über das Temperaturmessgerät, in der Abbildung 6-9, wurden die Messdaten am Mess-PC aufgenommen.

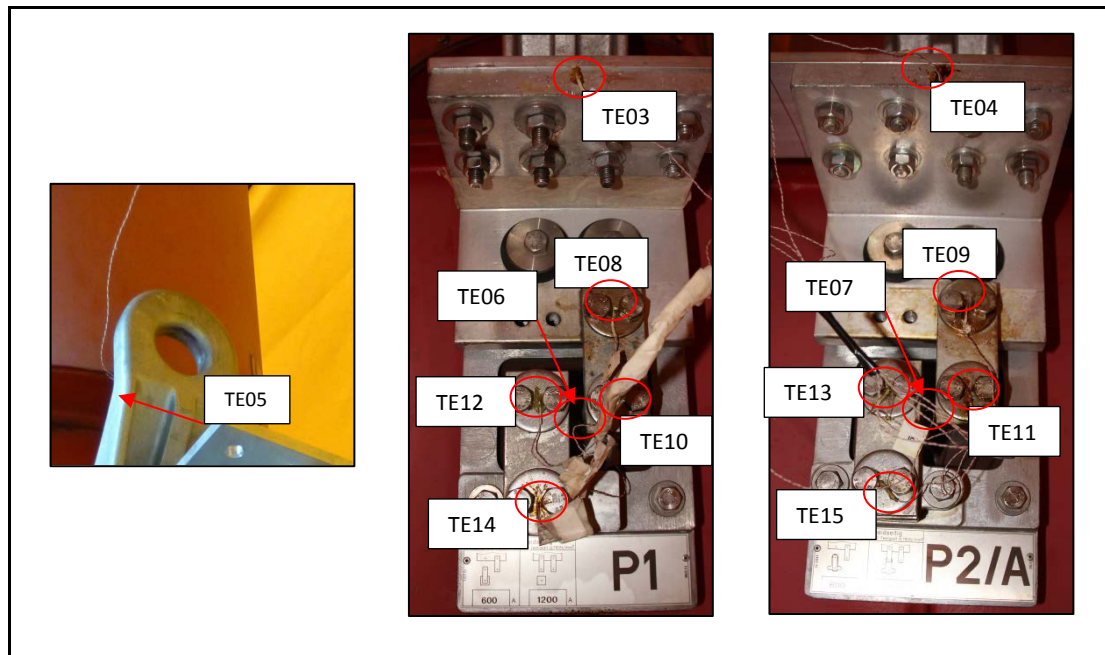


Abbildung 6-10: Thermoelemente am Prüfobjekt

### **IR-Kamera**

Begleitend zur Sensormessung wurde mittels Infrarotkamera qualitativ die Messung begleitet. Die Abbildung 6-11 zeigt die Aufhängung der Wärmebildkamera. In der Mitte ist zudem das Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und Windgeschwindigkeitsmessgerät Testo 400 ersichtlich.

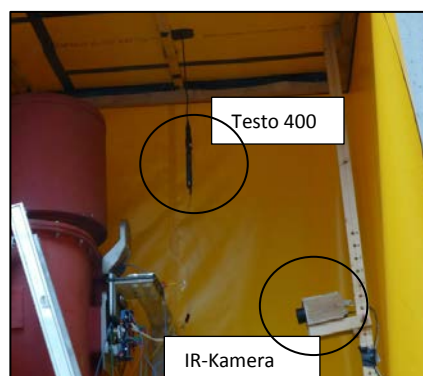


Abbildung 6-11: Positionierung der Infrarotkamera und des Testo 400 Messgerätes

Über die Thermographie wurde die Wärmestrahlung bildlich dargestellt. Für die quantitativ richtige Beurteilung bzw. Messung der Oberflächentemperatur muss der Emissionsgrad berücksichtigt werden. Im Labor wurde mit Hilfe eines Maler-Krepp-Klebandes eine definierte Oberfläche über den Messbereich erreicht. Dieses Klebeband verfügt über einen Emissionsgrad von ca.  $\varepsilon = 0,92$ .



Abbildung 6-12: Vorbereitungen zur Messung mittels Maler-Krepp-Klebeband

### **Strommessung**

Die Kontrolle des Prüfstromes erfolgte über eine Rogowskispule. Das Übersetzungsverhältnis der Spule beträgt 1 A/1 mV im Messbereich von 3000A und wurde über ein Koaxialkabel und einem Multimeter, Keithley 2000, mit dem Mess-PC verbunden. Die Spannungsversorgung des Messverstärkers wurde im Prüffeldkreis implementiert.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Mess-PC mit den Messgeräten im benachbarten Labor.



Abbildung 6-13: Messplatz



Abbildung 6-14: Strommessung mittels Rogowskispule



### 6.2.5 Sicherheitstechnik

Das Prüffeld wurde im Verkehrsraum eingerichtet, der über ein Gebäudebrandmeldesystem verfügt. In Bezug auf den Anlagenschutz musste jedoch nachgerüstet werden. Speziell soll an dieser Stelle auf den Prüfkreis im Brandfall eingegangen werden.

Der Schaltschrank verfügt über einen Sicherheitskreis, an dem Öffner zur Unterbrechung des Not-Aus-Kreises angebracht werden können. Durch das im nächsten Punkt, „Regel- und Messkreisautomatisierung“ beschriebene Programm wird im Fall einer Übertemperatur der gesamte Schaltschrank abgeschaltet.

Direkt am Prüffeld wurde zur manuellen Unterbrechung ein Not-Aus-Schalter angebracht und gekennzeichnet. Besteht Gefahr in Verzug kann im Notfall sogar außerhalb des Prüffeldes abgeschaltet werden.

Des Weiteren wurde ein Brandmelder in der Prüfkabine installiert. Bei Rauchentwicklung sollte dieser über ein Relais den Sicherheitskreis trennen und den Prüfstand stromfrei schalten.



Abbildung 6-15: Feuermelder über dem Prüfobjekt

### 6.2.6 Regel- und Messkreisautomatisierung

Durch die Ankoppelung der Messgeräte über diverse Schnittstellen wurde die zentrale Speicherung der Messdaten am Computer ermöglicht. Mittels eines Regelprogramms wird die Relaiskarte über den Computer gesteuert. Die Regelung gewährleistet in erster Linie die Umgebungstemperatur von 40 °C. Im Fehlerfall, bei übermäßiger Wärmeentwicklung, wird der Not-Aus-Kreis geschaltet. Das Regelprogramm ermöglicht erst einen 24/7-Dauerbetrieb.

Nachfolgend ist der Aufbau aller für den Mess- und Regelkreis wichtiger Komponenten schemenhaft dargestellt.

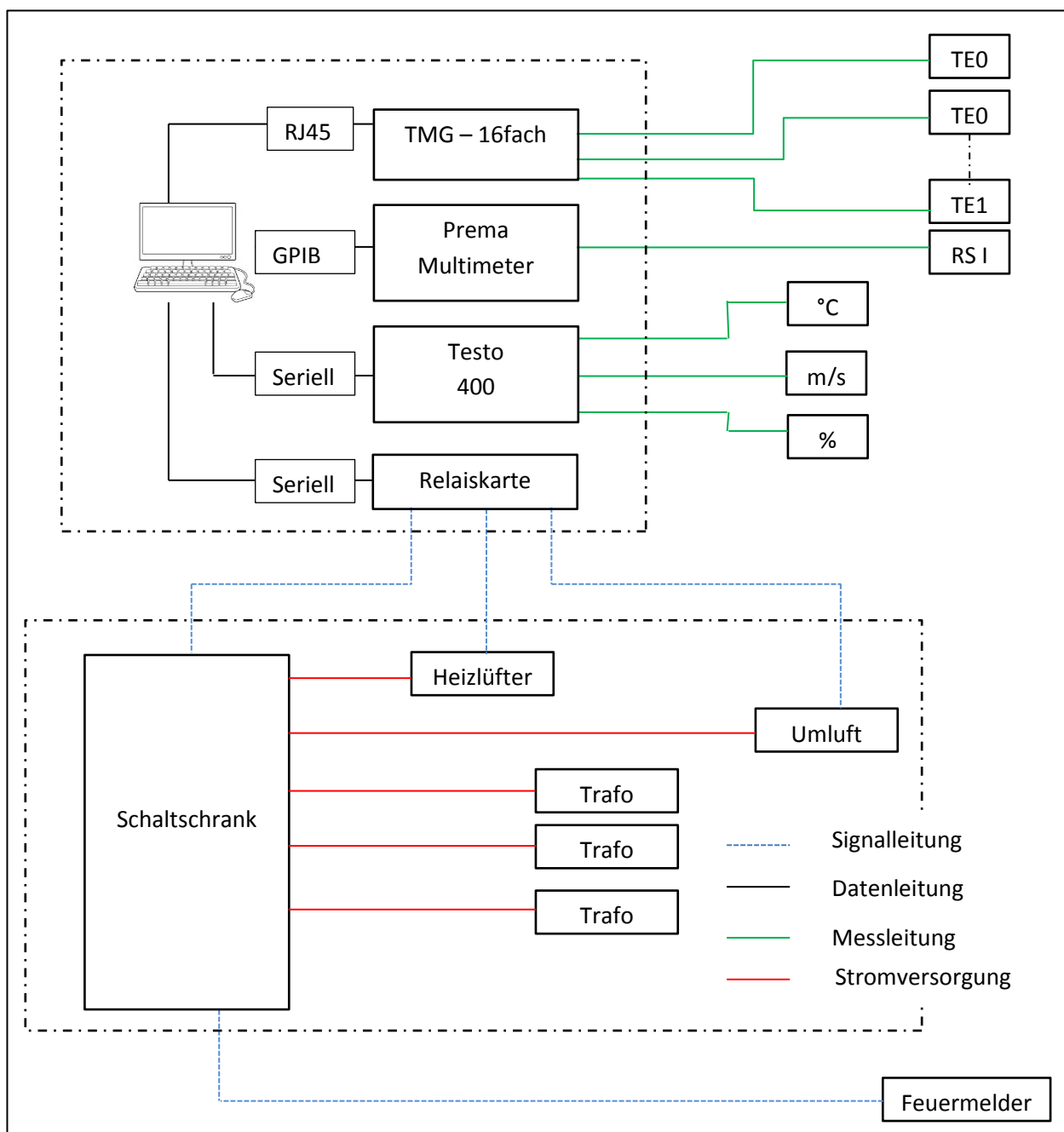


Abbildung 6-16: Prüfaufbau aus Sicht des Regel- und Messkreises

Die Abkürzung TE steht für die verwendeten Thermoelemente und die Abkürzung TMG für das Temperaturmessgerät. In erster Linie dient das Programm zur Erfassung der Messwerte. Nach der Aufnahme und Speicherung der Messdaten und Schalterstellung durch die Speichervariable werden im nachgelagerten Regelkreis Soll- und Ist-Werte miteinander verglichen. Die Sollwerte lassen sich aus der Umgebungstemperatur ableiten. Abbildung 6-17 veranschaulicht den Signalfussgraphen des Programms.

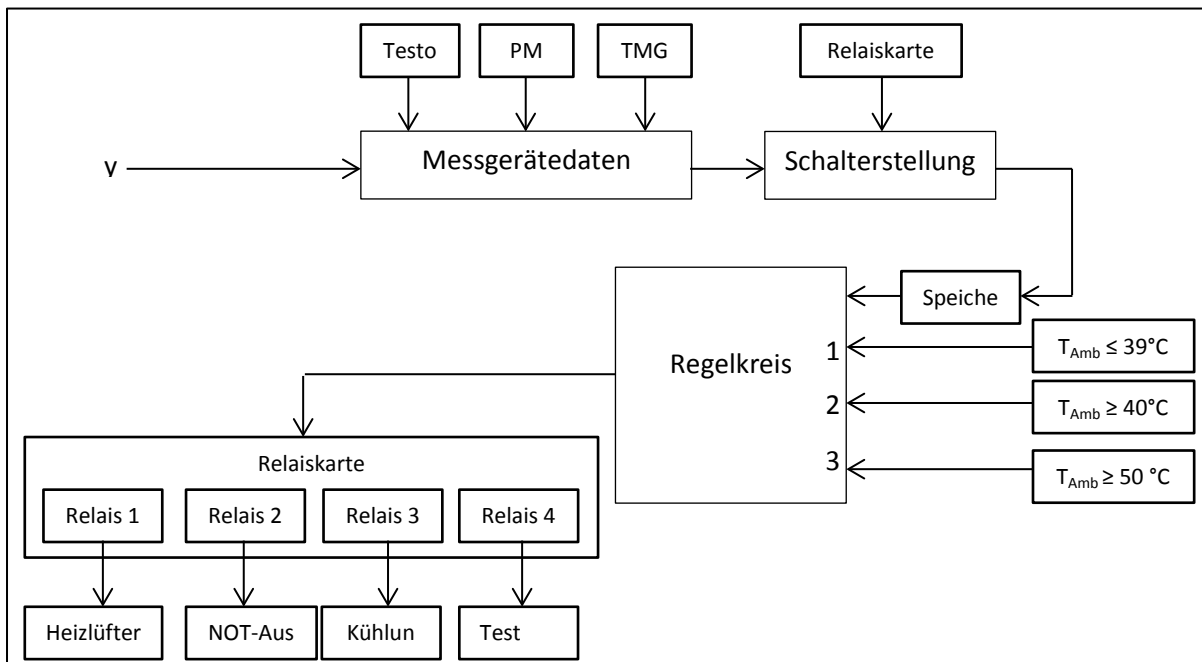


Abbildung 6-17: Signalfussgraph der Speichervariable, Messdaten sowie dem Regelkreis

Nachfolgende Grafik bildet die Messdatei des Programms ab, in dem die Systemzeit blau, das Messgerät Testo 400 Orange, der Prüfstrom Grün, die Thermoelemente Rot und am Ende die Schaltzustände der Relaiskarte Hellblau umrahmt sind.

08/17/14	15:12:55	1195131.0	17.8	39.9	0.22	1.58746	41.298	42.511	64.168	115.16	60.369	61.971	67.903	62.047	61.851	73.662	60.012	74.871	111.643	70.777	111.608	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:01	1200671.0	17.8	39.9	0.23	1.58787	41.271	42.555	64.23	115.053	60.365	61.629	66.572	62.077	61.741	73.624	59.933	74.848	111.289	70.709	111.518	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:06	1206181.0	17.7	39.9	0.22	1.58662	41.427	42.64	64.308	115.787	60.479	61.539	67.258	61.897	61.687	73.572	59.933	74.819	111.006	70.552	111.407	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:12	1211701.0	17.7	39.9	0.28	1.58726	41.49	42.576	64.407	117.01	60.47	61.583	67.902	61.948	61.703	73.545	59.939	74.849	111.124	70.455	111.448	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:17	1217201.0	17.7	39.9	0.19	1.58703	41.505	42.625	64.668	117.502	60.48	61.443	68.214	62.287	61.764	73.583	59.97	74.969	111.506	70.366	111.498	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:23	1222701.0	17.7	39.9	0.39	1.58697	41.617	42.69	64.833	117.867	60.522	61.399	68.453	62.376	61.82	73.658	60.002	75.135	111.713	70.574	111.975	400.0	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:28	1227891.0	17.6	40.0	0.5	1.58702	41.876	42.653	64.696	118.315	60.441	61.5	68.593	62.401	61.908	73.713	60.091	75.113	111.979	70.704	111.652	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:33	1233091.0				1.58735	41.673	42.664	64.667	119.045	60.44	61.416	68.25	62.513	61.858	73.658	60.169	75.065	112.002	70.727	111.685	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:38	1238281.0				1.5868	41.735	42.773	64.63	119.697	60.44	61.399	68.453	62.376	61.82	73.658	60.002	75.135	111.713	70.574	111.975	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:44	1243481.0				1.58718	41.739	42.786	64.652	118.849	60.44	61.399	68.453	62.376	61.82	73.658	60.002	75.135	111.713	70.574	111.975	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:49	1248681.0	17.6	40.1	0.46	1.58744	41.889	42.824	64.872	117.616	60.302	61.399	68.733	62.45	61.93	73.774	60.181	75.084	112.113	70.581	111.725	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:13:55	1254811.0	17.6	40.1	0.41	1.59075	42.044	43.009	65.006	116.946	60.399	61.362	67.692	62.387	61.847	73.628	60.069	75.042	112.0	70.598	111.747	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
			31.0	17.6	40.2				64	65.069	116.472	60.361	61.453	68.021	62.324	61.809	73.555	60.039	74.953	111.951	70.343	111.706	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			11.0	17.6	40.2				82	64.928	117.629	60.313	61.786	68.3	61.839	61.88	73.518	60.099	74.801	111.917	70.407	111.561	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			21.0	17.6	40.1				52	64.606	118.35	60.474	62.374	68.447	61.763	61.956	73.558	60.163	74.849	112.061	70.701	111.447	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
08/17/14	15:14:17	1276521.0	17.6	40.1	0.27	1.59036	41.857	42.816	64.501	119.392	60.465	62.996	68.947	61.976	62.002	73.699	60.222	74.867	112.134	70.894	111.596	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:22	1282021.0	17.6	40.1	0.21	1.59082	41.815	42.796	64.402	119.408	60.511	63.458	68.675	61.752	61.969	73.606	60.211	74.698	112.158	71.137	111.583	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:28	1287521.0	17.6	40.1	0.26	1.59146	41.82	42.854	64.354	119.026	60.591	63.458	68.785	61.872	61.939	73.547	60.142	74.706	112.168	71.286	111.71	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:33	1293021.0	17.6	40.1	0.34	1.59069	41.83	42.827	64.352	119.742	60.535	63.608	68.778	61.93	61.934	73.567	60.151	74.708	112.174	71.555	111.756	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:39	1298521.0	17.6	40.1	0.16	1.59089	41.798	42.743	64.322	120.041	60.462	64.068	68.313	61.919	61.955	73.591	60.166	74.71	112.335	71.796	111.714	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:44	1304021.0	17.6	40.1	0.12	1.59113	41.759	42.699	64.258	118.487	60.501	64.033	67.648	61.894	61.957	73.605	60.132	74.77	112.254	71.496	111.699	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:49	1309221.0	17.6	40.0	0.07	1.58938	41.679	42.601	64.188	117.449	60.384	64.036	67.699	61.787	61.942	73.654	60.095	74.688	112.232	71.56	111.741	400.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
08/17/14	15:14:55	1314411.0	17.6	40.0	0.25	1.59069	41.564	42.552	64.058	118.308	60.31	64.088	68.029	61.661	61.938	73.598	60.073	74.619	112.233	71.506	111.66	400.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Tabelle 6-7: Auszug der Messdaten

$T_{Amb}$  ist die mittels Testo 400 gemessene Umgebungstemperatur. Liegt die Temperatur unter  $40^{\circ}\text{C}$  wird über den Vergleich der Bedingung 1 der Heizlüfter anhand Relais 1 zugeschaltet. Bei Überschreitung der Bedingung 2 erfolgt die Trennung des Heizlüfters und die Kühlung wird mit Hilfe von Relais 3 zugeschaltet. Wie vorhin kurz erwähnt, wird bei übermäßiger Wärmeentwicklung über Relais 2 der Not-Aus-Kreis getrennt. Die Schnittstelle vom Messcomputer zum Prüffeld stellt die Relaiskarte dar, siehe Abbildung 6-18.

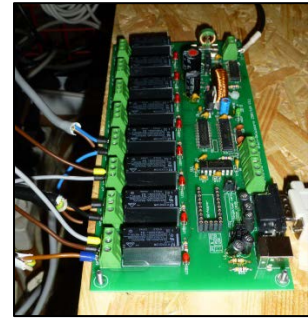


Abbildung 6-18: Relaiskarte

Um einen Verlust von Messdaten zu vermeiden, wurden nach jedem Durchlauf der Speichervariable und der Regelsequenz die Daten gespeichert und die Messdatei abgeschlossen.

## 7 Untersuchungen

Die vorgenommenen Messungen umfassen die Kalibrierung der Thermoelemente, die Widerstandsmessung, die Bestimmung des Einflusses der Anzugsmomente, die Bestimmung der Zeitkonstante, die Ölanalyse und den Dauerversuch.

Bei jedem Punkt wird kurz die Motivation der Messung und die Herangehensweise erläutert. Bereits genannte Referenz- bzw. Sollwerte werden in Bezug auf die Messergebnisse diskutiert. Abbildung 7-1 dient zur Zuordnung der Messdaten.

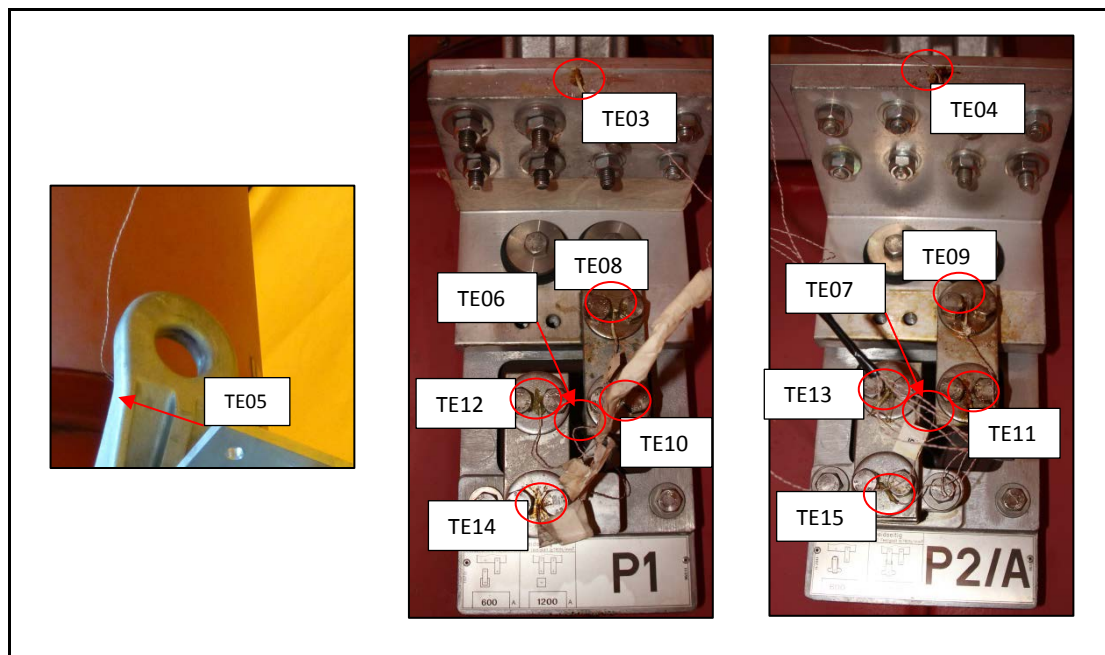


Abbildung 7-1: Thermoelemente am Prüfobjekt

### 7.1 Kalibrierung der Thermoelemente

Da die verwendeten Thermoelemente des Typ T aus Thermokabelspulen aufgebaut wurden war es unerlässlich diese zu kalibrieren.

IEC 60584-2 erlaubt eine Messbereichsabweichung von  $\pm 2,5$  K bzw. 0,75 % der Messstellentemperatur. Die Abweichungsgrenzen lassen sich bestimmten Messbereichen zuordnen.  $\pm 2,5$  K ist für den Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $333,3^{\circ}\text{C}$  gültig und 0,75% ab  $333,3^{\circ}\text{C}$  bis  $1200^{\circ}\text{C}$ . Der während der Messung tatsächlich auftretende Fehler war hier zu ermitteln. Zudem wurde untersucht, ob der Prüfstrom über das Magnetfeld Einfluss auf die Temperaturmessung nimmt. Die Kalibrierung der Thermoelemente erfolgte in einem Mineralölbad.

Nach erfolgter Verlötung und Verlegung der Thermoelemente wurden sie, klemmenweise, Klemme P1 bzw. P2/A, kalibriert. Das Ölbad wurde vorzeitig in die Messumgebung gebracht, damit die Öl- und Umgebungstemperatur nahezu keinen Temperaturunterschied aufweisen. Zusätzlich wurde separat die Öltemperatur über ein IR- und Flüssigkeitsthermometer gemessen.



Abbildung 7-2:  
Thermoelemente im  
Ölbad zur Kalibrierung

Während der Messung wurde der Prüfstrom zugeschaltet. Es wurde festgestellt, dass kein Einfluss auf die gemessene Temperatur durch das Magnetfeld vorhanden ist. Die Verdrillung und die Führung der Thermoelemente, entfernt der Stromschiene, waren ausreichend für die elektromagnetische Verträglichkeit.

Nachfolgend sind die Abweichungen absolut und in Prozent zum gemessenen Wert dargestellt.

**Klemme P1:**

Tabelle 7-1: Aufnahme der Messabweichung der Klemme P1

Thermoelement	Min	Max	± Mittel	Spanne Min-Max	Mittel gemessen	Abweichung
-	K	K	K	K	°C	%
T01	1,7510	2,13	1,8883	0,3790	30,8883	6,11
T03	3,4030	3,7260	3,5441	0,3230	32,5441	10,89
T06	3,7100	4,1350	3,8899	0,4250	32,8899	11,83
T08	0,7400	1,0060	0,8521	0,2660	29,8521	0,0285
T10	0,8510	1,1190	0,9506	0,2680	29,9506	3,17
T12	1,0120	1,3240	1,1345	0,3120	30,1345	3,76
T14	1,0630	1,2840	1,1559	0,2210	30,1559	3,83

**Klemme P2/A:**

Tabelle 7-2: Aufnahme Messabweichung Klemme P2/A

Thermoelement	Min	Max	± Mittel	Spanne Min-Max	Mittel gemessen	Abweichung
-	K	K	K	K	°C	%
T02	1,47	1,6690	1,576	0,1990	30,5756	5,15
T04	0,7460	0,9510	0,8496	0,2050	29,8496	2,85
T07	2,3550	2,5870	2,4626	0,2320	31,4626	7,83
T09	1,7310	1,9560	1,8367	0,225	30,8367	5,96
T11	1,5920	1,8480	1,7134	0,2560	30,7134	5,58
T13	1,9650	2,2690	2,1087	0,3040	31,1087	6,78

Die Thermoelemente T03 und T06 überschreiten in dieser Messung die maximal erlaubte Messabweichung von  $\pm 2,5$  K nach IEC 60584-2. Durch erneute Verarbeitung der Lötstellen konnte die maximale Abweichung verringert werden.

Tabelle 7-3: Messabweichung nach erneuter Verlötung von T03 und T06

Thermoelement	Min	Max	$\pm$ Mittel	Spanne Min-Max	Mittel gemessen	Abweichung
-	K	K	K	K	°C	%
T03	1,3590	2,1360	1,5840	0,777	30,5840	5,17
T06	0,9716	1,4870	1,2870	0,5154	30,287	4,24

## 7.2 Widerstandsmessung – WI\_DC

Da das Primärleitersystem aus mehreren Komponenten (über Klemmverbindungen verbunden) besteht, ergab sich die Frage, inwiefern die Übergangswiderstände die Temperatur des Primärleiters beeinflussen.

Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, stellt sich bei Übergängen zweier Körper ein zusätzlicher, verlustbehafteter Widerstand ein. Folgende Überlegung dient der Ermittlung der Übergangswiderstände.

Wird ein Leiter von einem konstanten Gleichstrom durchflossen, stellt sich bei Temperaturunabhängigkeit bzw. vernachlässigbar kleiner Temperaturänderung, eine konstante Spannung, proportional des Widerstandes, ein. Werden die gemessene Spannung und der eingestellte Strom im Diagramm aufgetragen und bis zum Koordinatenursprung extrapoliert, kann aus der Steigung der Widerstand bestimmt werden. Durch den Abgriff mehrerer örtlich verteilter, auf das Primärleitersystem bezogenen, Spannungen, erhält man spezifische Widerstandswerte, die die Übergangswiderstände beinhalten. Durch den Abzug des tatsächlich vorhandenen Leiters sollte auf die Höhe des Übergangswiderstandes rückgeschlossen werden. Abbildung 7-3 zeigt den Abgriff geometrisch verteilter Spannungen am Beispiel der Klemme bzw. des CAD-Modells und den Spannungen  $U_1$  bis  $U_5$ .

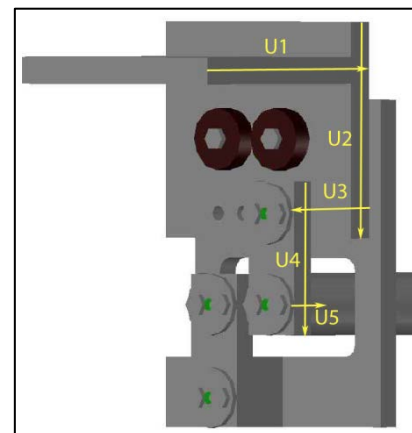


Abbildung 7-3:  
Anschlussklemmenmodell mit  
eingezeichneten, zu messenden  
Spannungen

Die Messung der Widerstandswerte erfolgte nach dem Prinzip der Vier-Leiter-Widerstandsmessung, auch 4-Draht-Widerstandsmessung genannt. [31]

Durch die Vier-Leiter-Methode wird der nicht vermeidbare Spannungsabfall an der Speiseleitung nicht gemessen, da die Spannungsscheiden zum Abgriff der Spannung, direkt am Widerstand angebracht werden. Zudem sind die Spannungsmessleitungen durch den hohen Innenwiderstand des Messgerätes nahezu stromlos. Der gemessene Spannungsabfall stimmt demnach sehr genau mit dem tatsächlichen Spannungsabfall des Widerstandes überein. Nachfolgendes Ersatzschaltbild stellt die Vier-Leiter-Methode dar. [31]

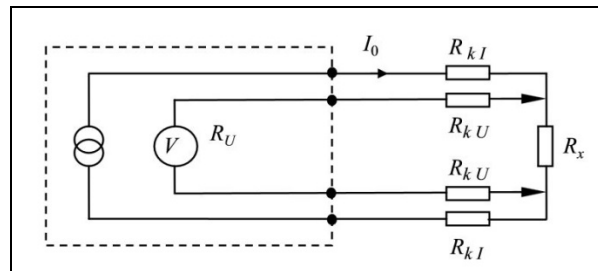


Abbildung 7-4: Vier-Leiter-Widerstandsmessung, [31]

### 7.2.1 Aufbau der Messung

Da der Wandler in dem Zustand in dem er geliefert wurde getestet werden sollte, wurde beschlossen, die Klemmverbindungen nicht zu öffnen und eine Messvorrichtung für die Messung zu konstruieren.

Die Vorrichtung wurde rein über die Kraftübertragung auf den Klemmen angebracht. Durch die eingearbeiteten Elektroden konnte das Spannungspotential des Kontaktpunktes aufgenommen werden.

Nachfolgende Grafik zeigt die Messvorrichtung als CAD-Modell, sowie die Spannungsscheide zum Abgriff.

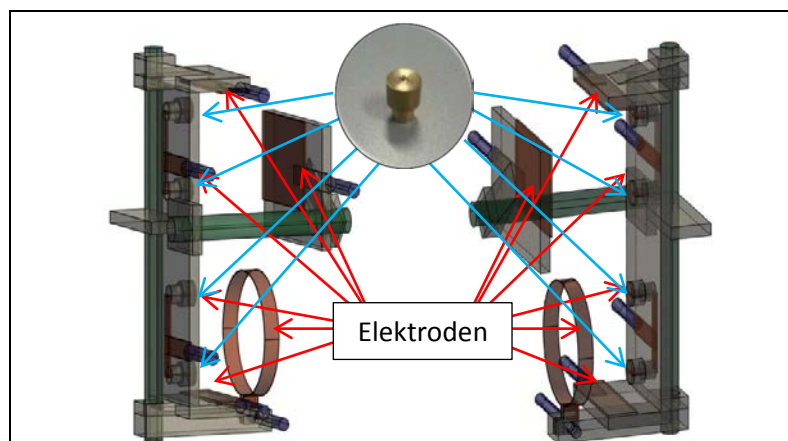


Abbildung 7-5: CAD-Modell der Messvorrichtung zur Widerstandsmessung an den Wandlerklemmen, sowie Darstellung der Spannungsscheide



Es wurden insgesamt vier Messvorrichtungen gefertigt von denen jede sechs Elektroden aufweist. Die Montage erfolgte mittels Kabelbinder, siehe Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7.

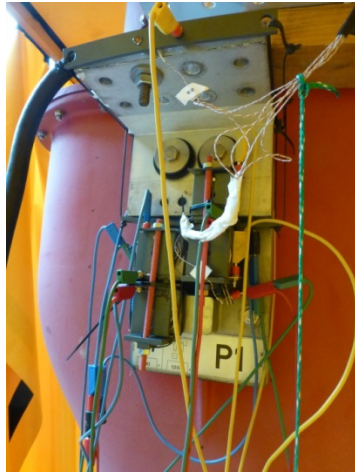


Abbildung 7-6: Klemme P1 inkl. Messvorrichtung



Abbildung 7-7: Klemme P2/A beim Aufbau.

Da das Leitersystem große Querschnitte aufwies und die Messungen nur bei Strömen von 100 bis 150 A erfolgten, konnte keine merkliche Temperaturerhöhung gemessen werden.

Im nachfolgenden Ersatzschaltbild ist der Aufbau der Messung zu erkennen. Als Stromquelle wurde eine Gleichstromquelle von 100 A – 150 A verwendet. Der eingespeiste Strom wurde über Kupferkabel von 120 mm<sup>2</sup> zugeführt und zusätzlich über einen Shunt-Widerstand gemessen. Der Widerstand  $R_{\text{Prüfling}}$  stellt hierbei das gesamte Primärleitersystem dar.

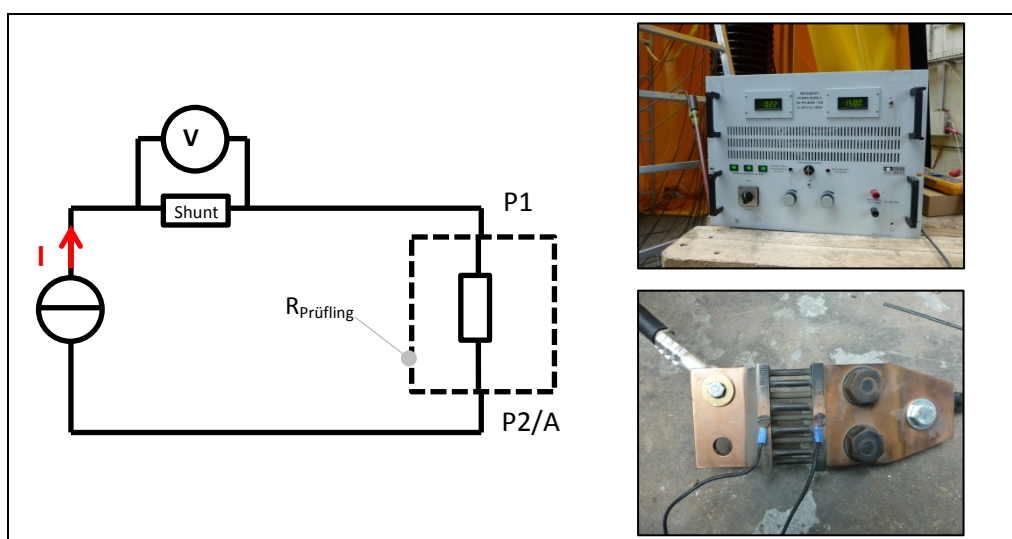


Abbildung 7-8: links: Ersatzschaltbild zur Widerstandsmessung  $W_{I\_DC}$ , rechts oben: Gleichspannungsquelle; rechts unten: Shunt, 1000 A/59,3 mV

Die Spannungsabgriffe durch die Messvorrichtung sind in nachfolgender Abbildung ersichtlich.

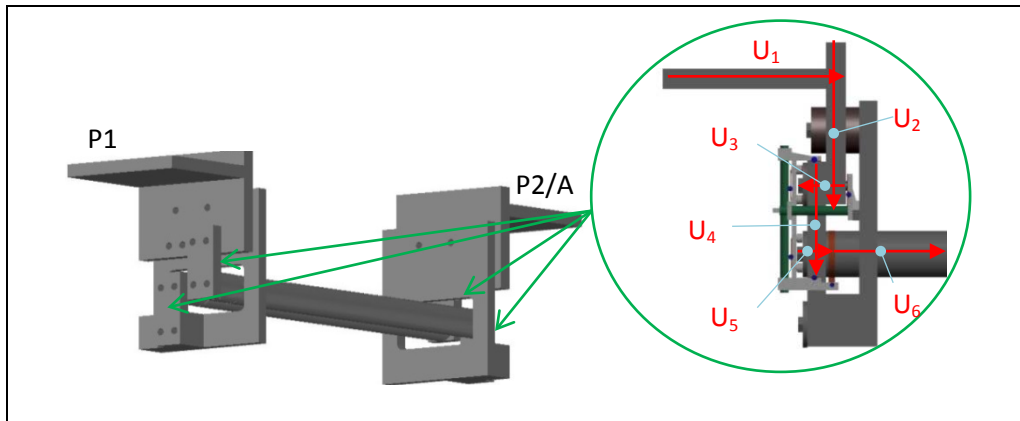


Abbildung 7-9: Spannungsabgriff am Primärleitersystem dargestellt im CAD-Modell

Der symmetrische Aufbau des Leitersystems erlaubt eine Zusammenfassung der Komponenten in Gruppen. Die unterteilten Gruppen und die dazugehörigen Spannungen sind in Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4: Zuordnung der abgegriffenen Spannungen, WI\_DC

Gruppe	Abgriff/Klemme	P1		P2/A	
1	Winkel – Klemmfläche	U <sub>1</sub>		U <sub>17</sub>	
2	Winkel – vertikal	U <sub>2</sub>		U <sub>16</sub>	
3	Übergang Winkel – Verbindungslasche	U <sub>3</sub>		U <sub>15</sub>	
4	Verbindungslasche	U <sub>4</sub>	U <sub>10</sub>	U <sub>8</sub>	U <sub>14</sub>
5	Verbindungslasche-Primärleiter	U <sub>5</sub>	U <sub>11</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>13</sub>
6	Primärleiter	U <sub>6</sub>		U <sub>12</sub>	
7	Wandlerkopf	U <sub>9</sub>			

## 7.2.2 Messergebnisse

Nachfolgende Diagramme zeigen die gemessenen Spannungen in Gruppen unterteilt. Die Extrapolation der Messpunkte stellt die Linie in Rot dar. Über die Steigung der Gerade wird der Widerstand ermittelt.

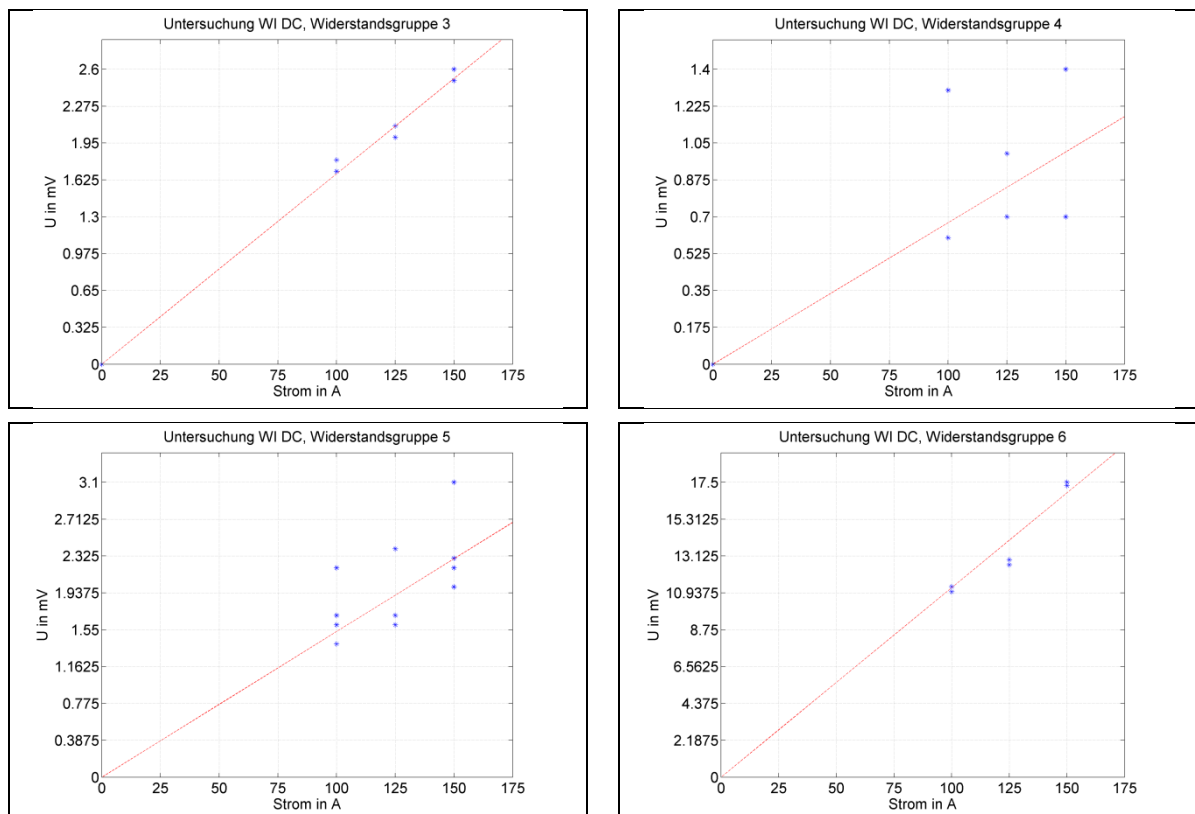


Diagramm 7-1: Gemessene Spannung an den Abgriffen

Die Messungen der Widerstandsgruppe 4 in Diagramm 7-1 wiesen eine stärkere Streuung auf. Die Messung stellt eine Vorbereitungsmessung für die in den weiterführenden Arbeiten stattfindende Variation des Anzugsmomentes der Verbindungslaschen dar. Zudem sollte diese eine Abschätzung über die wirksamen Widerstände ergeben. Die Messung wird somit wiederholt und überprüft.

## 7.2.3 Berechnungen

In den nachfolgender Tabelle sind alle Werte des spezifischen Gesamtwiderstandes und der Abmessungen der Komponenten zusammengefasst. Die Abschnitte mit Übergangswiderständen sind orange hinterlegt.

Tabelle 7-5: Abmessungen und berechneter Widerstand aus den gemessenen Spannungen

Abschnitt	Breite	Dicke	Länge	Querschnittsfläche	Widerstand R	spez. R
#	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	μΩ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
1	200	20	175	4000	14,697	0,33592
2	200	20	175	4000	10,360	0,23679
3	50	50	40	2500	16,787	1
4	50	20	125	1000	6,7191	0,53753
5	Radius	25	25	1963,5	15,307	1,2
6	Radius	25	640	1963,5	112,47	0,34506
7	Wandlerkopf				1100	

Für die Berechnung des Gütefaktors wurde der äquivalente, homogene Widerstand des Primärleiters in gleicher Länge als  $R_{\text{Sch}}$ , siehe Kapitel 4.3.1, aus den Messdaten berechnet. Die Tabelle 7-6 enthält den Leiterwiderstand bei Ersetzung der Klemmverbindung durch einen homogenen Leiter. Die berechneten Gütefaktoren der Klemmverbindungen in den Abschnitten 3 und 5 ersichtlich.

Tabelle 7-6:  $R_{\text{Sch}}$  zur Berechnung des Gütefaktors der Klemmverbindungen

Bezeichnung	Querschnitt	Länge	Widerstand $R_{\text{Sch}}$
	mm <sup>2</sup>	mm	μΩ
Primärleiter $R_{\text{Sch}}$	1963,5	40	7,29
Gütefaktor			
Abschnitt	errechneter R	Gütefaktor	
#	μΩ	$K_u$	
3	16,787	2,39	
5	15,307	2,18	

Die Klemmverbindungen zu den Primärleitern weisen einen Gütefaktor von 2,39 bzw. 2,18 auf. Folglich kann die Klemmverbindung als in Ordnung angesehen werden.

Der Bezug zu den spezifischen Werten von Kupfer und Aluminium ergab jedoch einen höheren Gütefaktor, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 7-7: Gütefaktor bei Verwendung von spezifischen Widerstandswerten

Bezeichnung	Querschnitt	Länge	Widerstand $R_{Sch}$	
			Kupfer	Aluminium
	$mm^2$	mm	$\mu\Omega$	$\mu\Omega$
Primärleiter $R_{Sch}$ – spezifischer Widerstand aus der Literatur	1963,5	40	0,35	0,54
Gütefaktor				
Abschnitt	errechneter R	Gütefaktor		
#	$\mu\Omega$	$K_u$ – Kupfer	$K_u$ - Aluminium	
3	16,787	47,96	31,09	
5	15,307	43,73	28,36	

Gütefaktoren in der Höhe wie sie in Tabelle 7-7 errechnet worden sind, würden sehr schlechte Klemmverbindungen darstellen. Wird jedoch Abbildung 3-27 „Gütefaktor in Abhängigkeit der Kontaktkraft, [27]“ herangezogen, könnte die Qualität der Verbindung auf Klemmverbindungen mit verschmutzter Oberfläche zurückgeschlossen werden.

Diese Diskrepanz der Gütefaktoren, durch die gemessenen Widerstände und der berechneten Widerstände, wird zum Anlass genommen die Klemmverbindungen näher zu untersuchen. Dies erfolgt wiederum beim nächsten Umbau der Prüfanordnung.

### 7.3 Einfluss des Anzugsmomentes – AM\_AS\_#

Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erklärt, sind Klemmverbindungen und deren Widerstand stark vom Anpressdruck abhängig. Üblicherweise werden Anzugsmomente vom Hersteller angegeben. Tabelle 7-8 zeigt die Herstellerangaben der Klemmverbindungen des Wandlers.

Tabelle 7-8: Anzugsmoment Herstellerangaben

Hersteller	Komponente	Anzugsmoment
		Nm
Wandlerhersteller	Verbindungsflaschen	75
Armaturenhersteller	Seilklemme/Anschlussarmatur	46

Die Verbindungsflaschen wiesen das Anzugsmoment von 75 Nm auf. Die Klemmverbindung der Stromschiene mit dem Wandler wurde in diesem Versuch variiert. Die Angabe des Armaturenherstellers bezieht sich in diesem Fall auf eine Seilklemme. Im Verlauf der Untersuchungen konnte die Variation nur an der Stromschiene untersucht

werden. Als Referenz werden hier dennoch die 46 Nm herangezogen. Der Vergleich zur später durchzuführenden Untersuchung an der Seilklemme mit geringerer Kontaktfläche sollte dann schlussendlich die maximal zu erwartende Temperatur und die daraus resultierende Empfehlung ergeben.

Um das Verhalten des Anzugsmomentes über einen größeren Bereich zu untersuchen wurde ausgehend vom maximalen Strom in Serie, siehe Kapitel 0, in Stufen von 100 A bis auf 600 A gesenkt, siehe Tabelle 7-9. Dieser Messbereich erlaubte auch eine Untersuchung des Temperaturverhaltens des Gesamtsystems.

Tabelle 7-9: Prüfstrom zur Untersuchung des Wärmeverzugs aufgrund des Anzugsmomentes

Stufen Nr.	Prüfstrom	Dauer
#	A	h
1	1575	6-12
2	1500	6-12
3	1400	6-12
4	1300	6-12
5	1200	6-12
6	1100	6-12
7	1000	6-12
8	900	6-12
9	800	6-12
10	700	6-12
11	600	6-12

Der Ausgang der Untersuchung war der thermisch eingeschwungene Zustand des Kombiwandlers bei 1575 A.

Für den Einfluss des Anzugsmomentes auf die Temperatur der Klemmverbindungen würde eine Messzeit von ca. 4 Stunden je Stufe genügen. Tatsächlich wurde jedoch im Rhythmus von 6 bis 8 Stunden während des Tages und für 7 bis 12 Stunden nachtsüber umgeschaltet.

Betrachtet wurde die Variation von folgenden Anzugsmomenten:

Tabelle 7-10: Prüfbezeichnung Anzugsmoment

Bezeichnung.	Anzugsmoment
-	Nm
AM_AS_1	46
AM_AS_2	51
AM_AS_3	30

Die nachfolgenden Diagramme bilden die Messergebnisse der Thermoelemente T03 und T04 der Untersuchung ab.

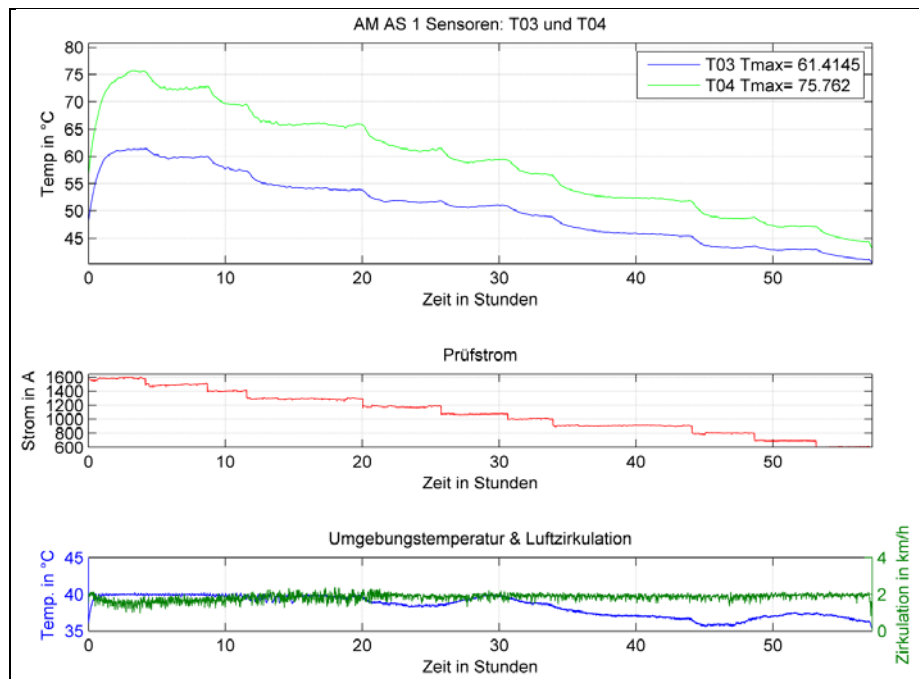


Diagramm 7-2: Prüfung AM AS 1, 46 Nm Sensoren T03 und T04 an den Klemmverbindungen Stromschiene-Wandler

Die Prüfung AM AS 1 stellte den ersten Versuch dar. Um das Einschwingen der Temperatur sicher zu erreichen, wurde für die nachfolgenden Versuche die Dauer für eine Stufe um bis zu 6 Stunden erhöht.

Bei AM AS 2 mit 51 Nm kam es zu einem kleinen Störfall während der Messung. Das Mess- und Regelprogramm zeichnete zwar die Messwerte auf, der Prüfkreis wurde jedoch nicht mehr geregelt und es kam zu einer erhöhten Erwärmung im Prüffeld. Der Ausfall des Regelprogrammes ist auch an der Luftzirkulation im Diagramm zu erkennen, siehe Diagramm 7-4.

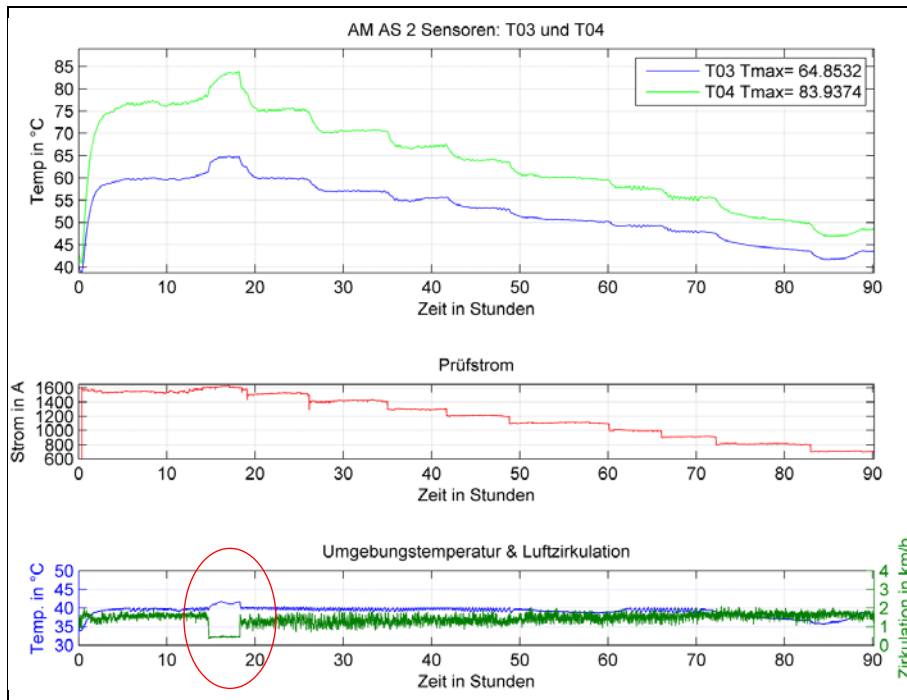


Diagramm 7-3: AM AS 2, 51 Nm, Thermoelemente T03 und T04

Ergänzend ist zu bemerken, dass bei niederen Strömen eine geringere Verlustwärme an den Stromschienen vorhanden ist. Dies führte zur Absenkung der Temperatur im Prüffeld auf ca. 36°C. Durch die Eliminierung der Umgebungstemperatur wurde dieser Einfluss kompensiert. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Momente erfolgt nach dem Diagramm von AM AS 3.

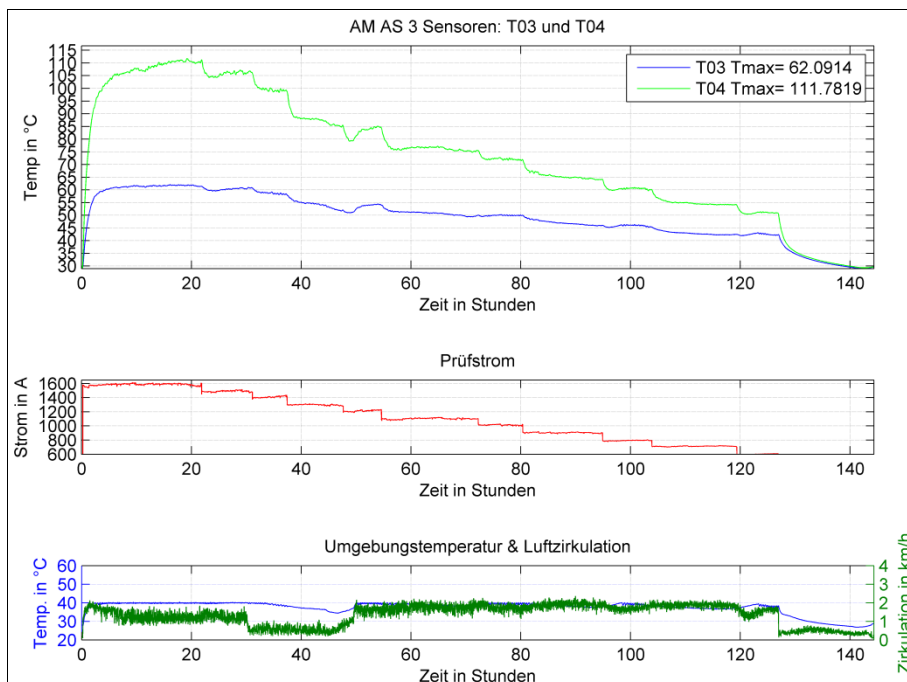


Diagramm 7-4: AM AS 3, 30 Nm, Thermoelemente an der Klemmverbindungen Stromschiene-Wandler



Werden die Temperaturmaxima der Thermoelemente T03 und T04 jedes Versuchs gegenübergestellt, ist zu erkennen, dass die Änderung des Anzugsmomentes nur Einfluss auf die Klemmverbindung an P2/A (T04) hat. Die Klemme P1 zeigt keine Reaktion auf das eingestellte Anzugsmoment.

Tabelle 7-11: Temperaturmaxima T03 und T04 der Versuche AM AS 1 - 3

Versuch	Moment	T03	T04
-	Nm	°C	°C
AM AS 1	46	61,41	75,76
AM AS 2	51	64,85	83,93
AM AS 3	30	62,09	111,78

Die nachfolgenden Diagramme stellen die gemittelte Temperatur je Stromstufe der Thermoelemente T03, T04, T07, T13, T14 und T15 inklusive Umgebungstemperatur dar. Die übrigen Messergebnisse sind im Anhang.

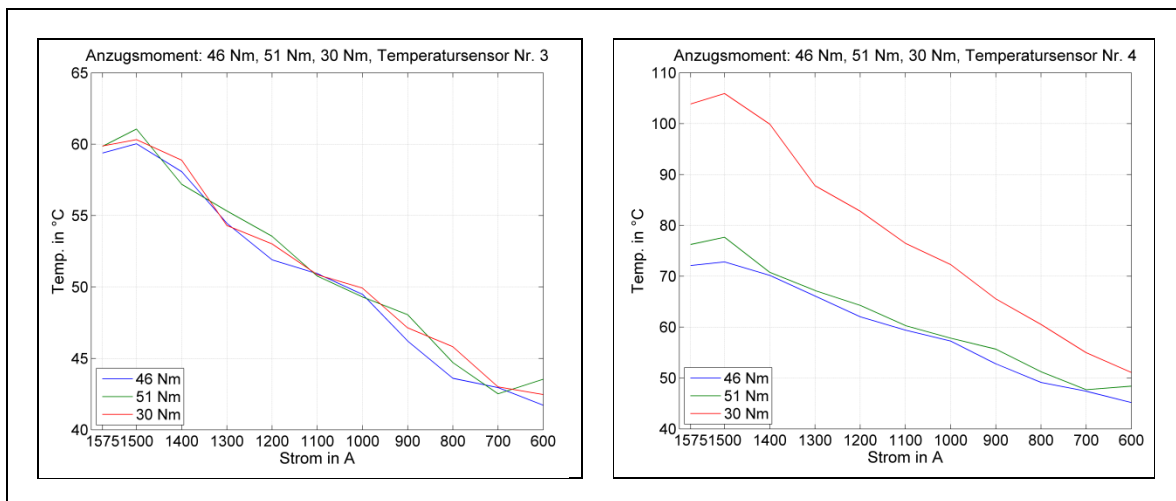


Diagramm 7-5: Temperatursensor T03 der Versuche AM AS 1 - 3 über den Strom

Diagramm 7-6: Temperatursensor T04 der Versuche AM AS 1 - 3 über den Strom

Diagramm 7-6 verdeutlicht die Temperaturerhöhung an Thermoelement T04. Im Rahmen dieser Versuche wurde ein Einfluss der Klemmverbindung an T04 nachgewiesen. Warum T03 keinen Einfluss zeigte muss durch weitere Untersuchungen eruiert werden. Vermutungen liegen im Unterschiede des Oberflächenzustandes der Klemmverbindung und werden beim nächsten Umbau der Prüfanordnung untersucht.

Unerwarteterweise zeigten die Thermoelemente T07, T13, T14 und T15 eine Abhängigkeit auf das oben angelegte Moment, wie in den nachfolgenden Diagrammen ersichtlich ist.

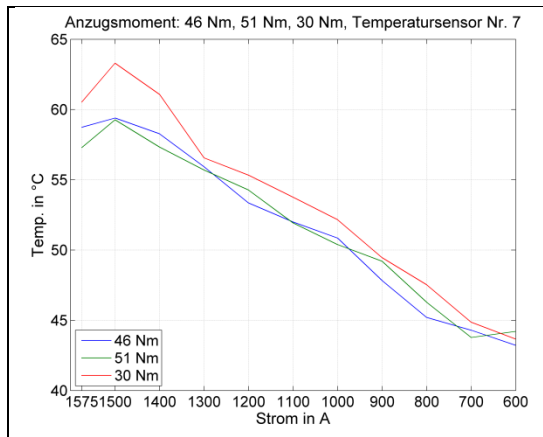


Diagramm 7-7: Temperatursensor T07 der Versuche AM AS 1 -3 über den Strom

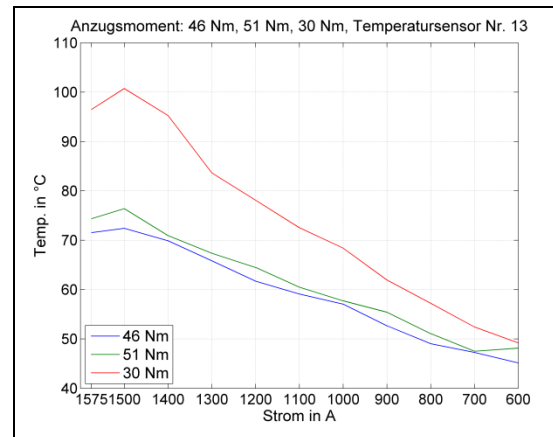


Diagramm 7-8: Temperatursensor T13 der Versuche AM AS 1 -3 über den Strom

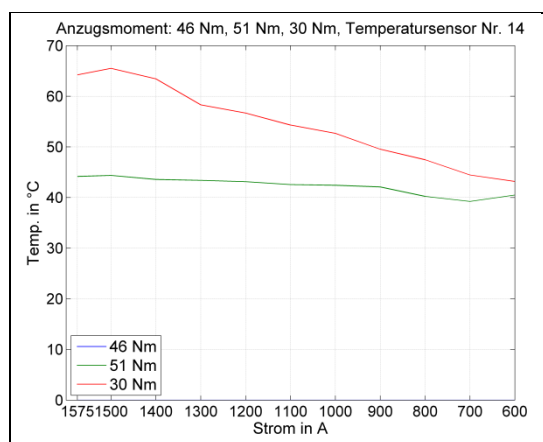


Diagramm 7-9: Temperatursensor T14 der Versuche AM AS 1 -3 über den Strom

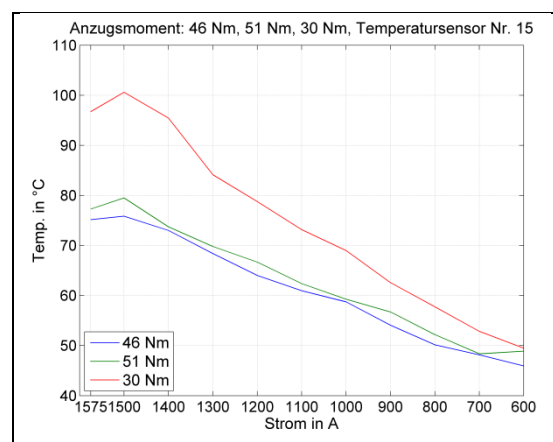


Diagramm 7-10: Temperatursensor T15 der Versuche AM AS 1 -3 über den Strom

T13 und T15 wiesen einen nahezu identischen Temperaturverlauf auf. Beide Thermoelemente befinden sich auf der Verbindungslasche zwischen Wandlerkopf und Primärleiter an der Klemme P2/A. Das Thermoelement T07 auf der Dichtung der Klemme P2/A wies im Versuch AM AS 3 ebenfalls eine leicht erhöhte Temperatur auf.

Während der Messung AM AS 1 wies T14 ein Kabelbruch auf und konnte deshalb die Temperatur nicht aufzeichnen. Bei der Messung AM AS 2 wurde die Temperatur zwar aufgezeichnet, allerdings nur in der Höhe der Umgebungstemperatur wegen des Verlustes der Haftung des Epoxydharzklebers an der Messstelle.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass T04 einen Einfluss auf ein geringeres Anzugsmoment zeigt. An der Verbindungsklemme von P1, der Messstelle von T03, wurde keinen Einfluss festgestellt und erfordert weitere Untersuchungen. Die Ursache für die Temperaturerhöhung an den Thermoelementen T07, T13, T14 und T15 muss zusätzlich in weiteren Versuchen analysiert werden.

## 7.4 Bestimmung der Zeitkonstante – EW\_ZK\_AS

Der zyklische Dauerversuch, Versuch Nr. 4, setzt die Kenntnis der thermischen Zeitkonstante des Gesamtsystems voraus. Da in diesem die sogenannte „Atmung des Wandlers“ untersucht werden sollte, musste eine markante Erwärmung und Abkühlung erfolgen, die bei über zwei Zeitkonstanten liegt. Dadurch wird eine Mindestenergieerzeugung von 86,5% erreicht. Die Obergrenze der Erwärmung wird durch den thermischen Strom begrenzt.

Das Kapitel 4.2 „Erwärmungsvorgang bei Messwandlern“ beschreibt die mathematische Ermittlung der Zeitkonstante. In Diagramm 3-2 ist ersichtlich, nach wie vielen Zeitkonstanten nahezu die Endtemperatur erreicht wird. Bei dieser Untersuchung wurde über die Temperatur des Thermoelements Nr. 5 die maximale Temperatur des Wandlers mit den folgenden Prüfparametern gemessen.

Tabelle 7-12: Bestimmung der Zeitkonstante - Prüfparameter

Bezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Prüfstrom	Dauer	T <sub>Amb</sub>
-	-	-	A	h	°C
EW_ZK_AS	In Serie	Stromschiene (Alu)	1575	ca. 150	40

Der gemessene Temperaturverlauf des Thermoelements Nr. 5 auf der Berstscheibe des Kombiwandlers ist im folgenden Diagramm abgebildet.

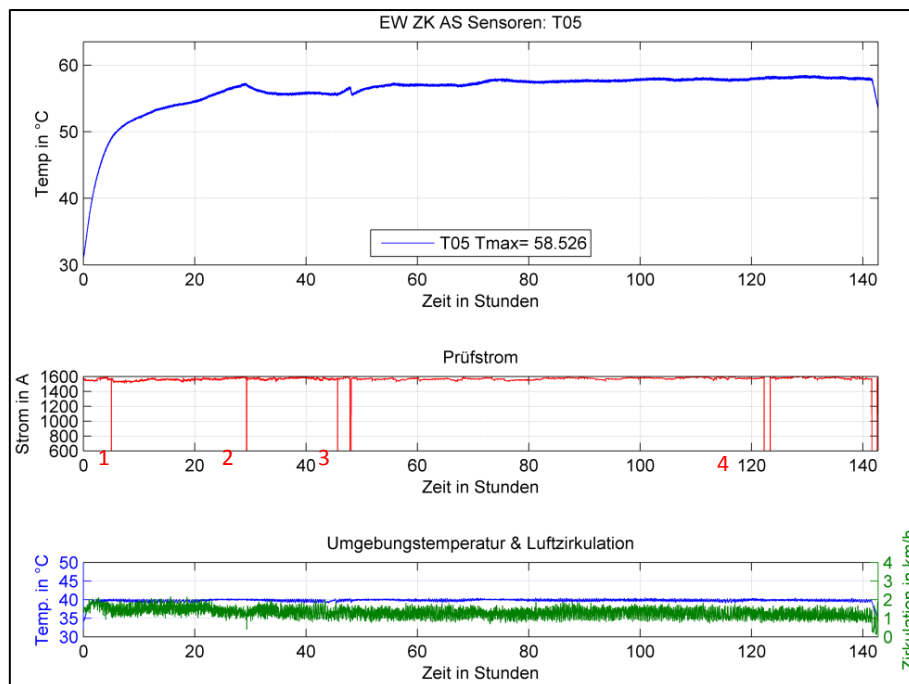


Diagramm 7-11: Messung zur Ermittlung der Zeitkonstante

Der exponentielle Verlauf der Erwärmung ist deutlich zu erkennen. Die Einbrüche des Prüfstromes sind auf Kontrollen bzw. Manipulationen am Prüffeld zurückzuführen, auf die an späterer Stelle noch eingegangen wird. Die Umgebungstemperatur während der Messung belief sich auf  $40^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ . Das Umluftsystem des Prüfaufbaus erzeugte eine Zirkulation der Luft im Bereich von 0,8 bis 2 km/h.

Das Diagramm 7-12 zeigt die Annäherung des Temperaturverlaufs durch die Formel des charakteristischen Erwärmungsverlauf der Form

$$y(t) = y_{max} * (1 - e^{-\frac{t}{T_y}}) \quad (7-1)$$

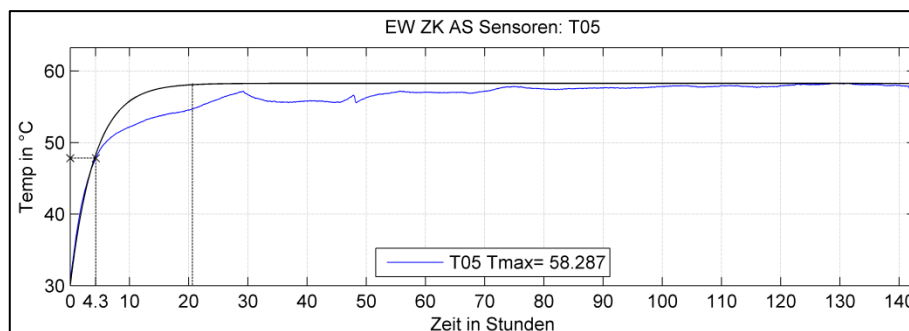


Diagramm 7-12: Annäherung durch Exponentialfunktion zur Ermittlung der Zeitkonstante

Bei 4,3 Stunden ist ein  $\tau$  und bei 21,5 Stunden, fünf  $\tau$  eingezeichnet. Es ist auch zu erkennen, dass die Endtemperatur, die die Basis für die Annäherung darstellt, nach erst über 100 Stunden erreicht wird.

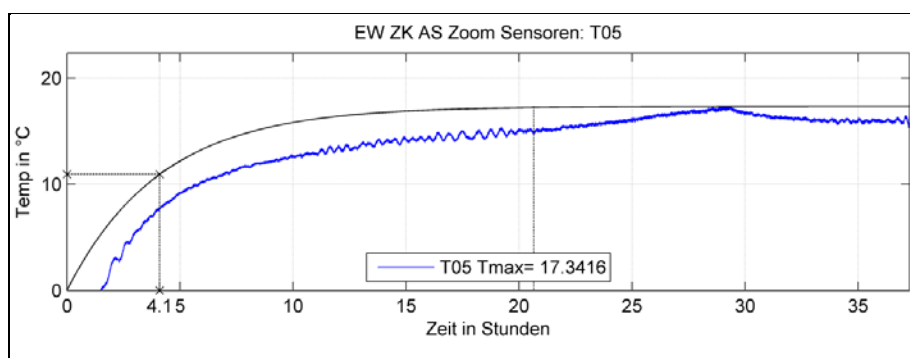


Diagramm 7-13: Vergrößerung des Temperatursteigerung am T05 - Berstscheibe des Wandlers, Annäherung und inkl. Zeitkonstante

Nach Diagramm 7-12 liegt eine Zeitkonstante bei 4,3 Stunden. Im Diagramm 7-13 ist eine Zeitkonstante von 4,1 Stunden eingezeichnet. Dieser Unterschied liegt in der unterschiedlichen Betrachtung und unterschiedlichen Zeitbereichen begründet. In Diagramm 7-12 wurde die Exponentialkurve den Rohdaten angenähert. Diagramm 7-13 zeigt die Annäherung nach Subtraktion der Umgebungstemperatur der Messdaten bis ca. 37 Stunden. Durch den langsameren Temperaturanstieg an der Berstscheibe bewirkt

die Subtraktion von  $T_{\text{Amb}}$  eine negative Temperaturdifferenz, die sich durch Offset auf der Zeitachse auswirkt.

Für den späteren zyklischen Dauerversuch wurde ein  $\tau = 4,3 \text{ h}$  gewählt. Nachfolgende Tabelle zeigt die prozentuell erreichte Erwärmung nach einer bis fünf Zeitkonstanten und die Auswahl der Länge der Erwärmungs- bzw. Abkühlungsphase, blau hinterlegt.

Tabelle 7-13: Dauer der Erwärmung nach einer bis fünf Zeitkonstanten

Zeitkonstante	Dauer	Erwärmung
#	h	%
1	4,3	63,2
2	8,6	86,5
<b>3</b>	<b>12,9</b>	<b>95</b>
4	17,2	98,2
5	21,5	99,3

Die erste Unterbrechung war eine reine Kontrolle der Messung. Bei der zweiten Kontrolle der Messung wurde eine hohe Temperatur am Thermoelement T04, an der Zuleitung durch die Aluminiumschiene zur Klemme P2/A bemerkt. Eine Sichtung des Prüfaufbaus gab Aufschluss über die Ursache. Bei vorhergehenden Manipulationen wurde zur Abstützung der Stromschiene ein Holzpaket aus zwei Kanthölzern verwendet. Dieses wurde nach Abschluss der Arbeiten nicht entfernt und führte durch die Ausdehnung der Aluminiumschienen zur Temperaturerhöhung.

Nach erneuter Inbetriebnahme der Messung stellte sich anschließend eine merklich kleinere Maximaltemperatur an der Stromschiene ein, wie die Messdaten der Thermoelemente an der Klemmstelle Aluminiumschiene-Wandler, T03 und T04 verdeutlichen, im Diagramm 7-14 rot umrahmt.

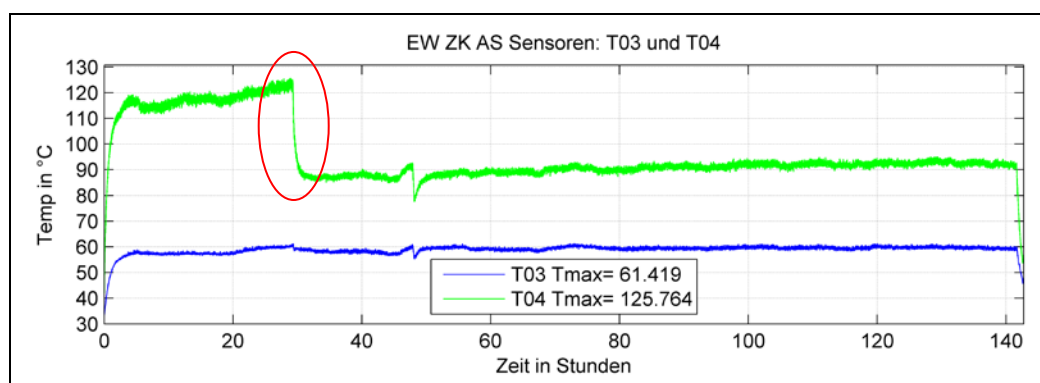


Diagramm 7-14: T03 und T04, Einfluss der Ausdehnungskraft durch die Stromschiene auf die Klemmverbindung

Dieser Vorfall hatte den Nebeneffekt den Einfluss einer schlechten Klemmverbindung zu messen. Warum Klemme P1 keine Auswirkung zeigte ist nicht geklärt. Vermutungen

liegen in der unterschiedlichen Kraftausübung der Aluminiumschiene auf die Klemmverbindungen der Anschlüsse.

Das gleiche Phänomen konnte bei den Messstellen T13 und T15 beobachtet werden, die ebenfalls wie Thermoelement T04 auf der Klemme P2/A lokalisiert sind. Durch T13 und T15 wird die Temperatur der Verbindungslasche von Primärleiter zum Wandlerkopf repräsentiert, siehe nachfolgende Diagramme.

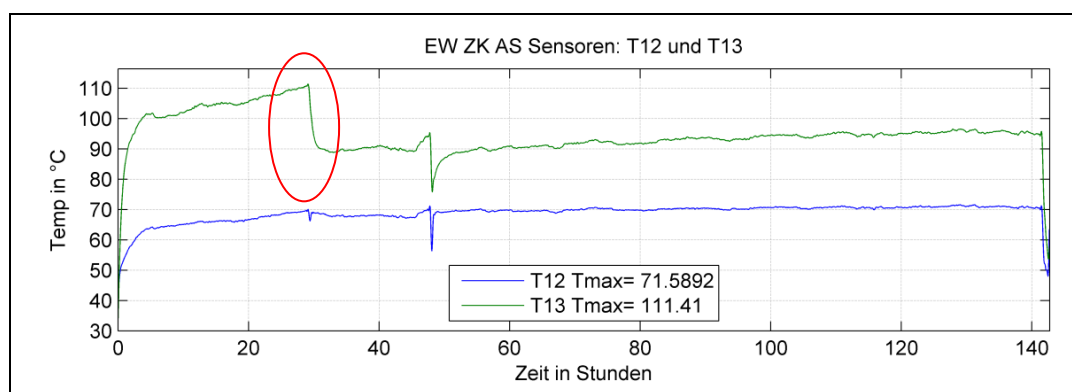


Diagramm 7-15: T13 - selbiges Verhalten wie bei T04

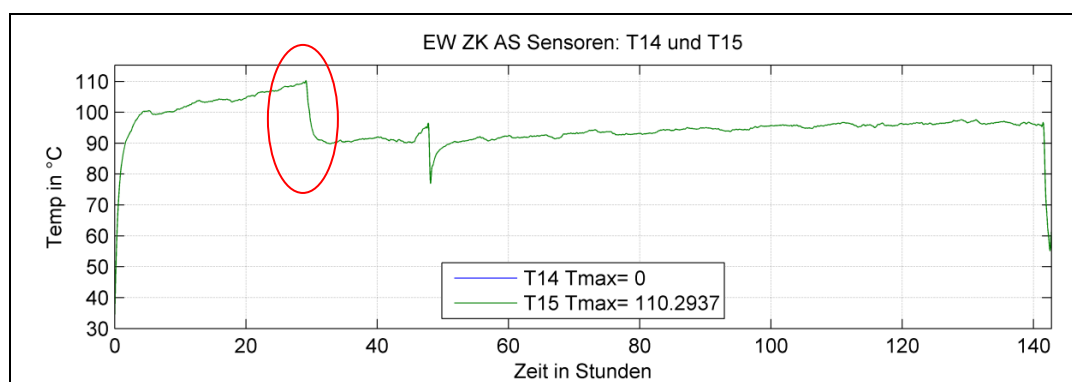


Diagramm 7-16: T15, Temperaturcharakteristik wie von T04

Im Anhang können die Diagramme der restlichen Thermoelemente entnommen werden.

Bei Unterbrechung Nr. 3 wurden die Anzugsmomente von 46 Nm nochmals kontrollierte und nachgezogen. Unterbrechung Nr. 4 war wiederum eine reine Kontrolle der Messung.

## 7.5 Dauerversuch – DA\_VG\_AS

Der Dauerversuch DA\_VG\_AS stellt die erste Messung der Vergleichsuntersuchung dar. Begleitend dazu wurden Ölproben zur Untersuchung der Feuchteentwicklung vom Messwandler gezogen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7.6 beschrieben.

Wie in Punkt 6.2.2 erläutert wurde das Prüfobjekt durch Aluminiumschienen angeschlossen. Die Dauer der Prüfung mit 1575 A betrug über 1200 Stunden und erfolgte bei einer Umgebungstemperatur von 40°C. Laut Untersuchungsplan war die

Prüfzeit mit ca. 1000 Stunden veranschlagt. Die Ergebnisse der Feuchtemessung wurden zum Anlass genommen, die Prüfung zu verlängern. Nachfolgend ist die Prüfkongfiguration in Tabelle 7-14 dargestellt.

Tabelle 7-14: Prüfkongfiguration DA\_VG\_AS

Prüfbezeichnung	Verschaltung	Zuleitung	Stromhöhe	Anzugsmoment
			A	Nm
DA_VG_AS	In Serie	Stromschiene (Alu)	1575	46

Das Diagramm 7-17 zeigt die Wandlertemperatur (T05) über die gesamte Prüfung. Bei über 700 Stunden kam es zu einem Ausfall des Prüfstandes aufgrund eines Gewitters.

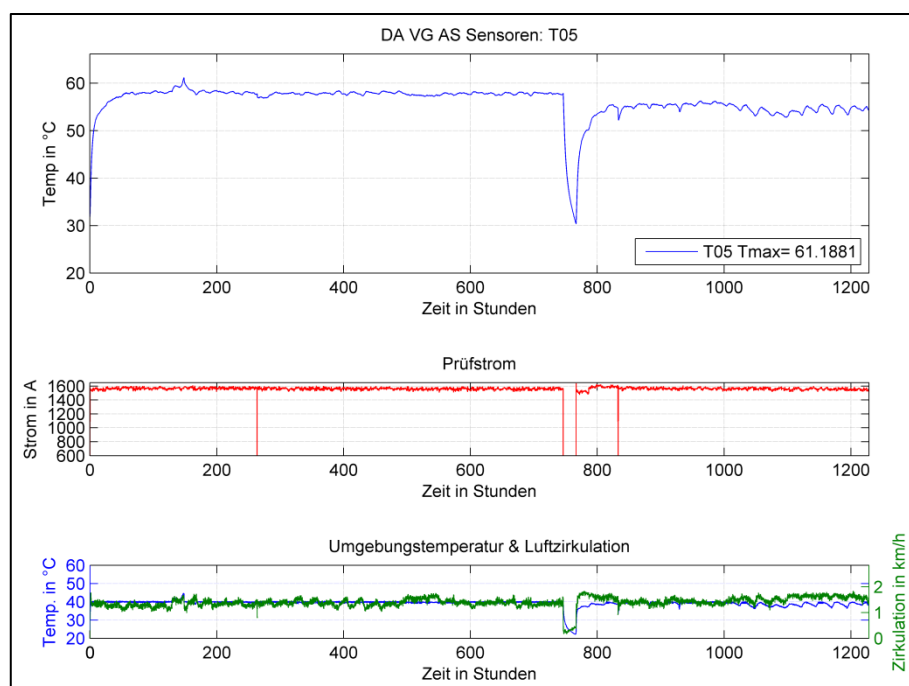


Diagramm 7-17: Dauerversuch DA\_VG\_AL

Wie in Diagramm 7-17 dargestellt, beläuft sich die Maximaltemperatur auf 61,19°C. Dieses Maximum liegt bei knapp 148 Stunden und ist durch eine leicht erhöhte Umgebungstemperatur von 44°C bedingt.

Während des Versuchs konnte an Klemme P2/A eine Maximaltemperatur von über 119°C gemessen werden. Im Vergleich zu den Versuchen der Anzugsmomente AM\_AS\_1-3 würde dies ein Anzugsmoment von ca. 30 Nm bedeuten, eingestellt wurden allerdings 46 Nm.

Die Ursache für ein solches Temperaturverhalten an dieser Klemme wird beim nächsten Umbau des Prüfstandes untersucht. Die Oberflächenbeschaffenheit der Klemmverbindung und die Verklemmung durch die Ausdehnung der Aluminiumschienen sind in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen.

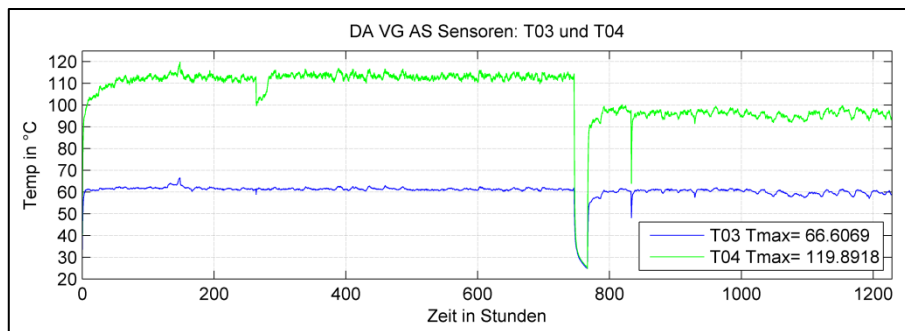


Diagramm 7-18: T03 und T04 während des Dauerversuchs DA VG AS

Nach Ausfall des Prüfstandes schwang sich die Temperatur bei 90 – 100°C ein. Wie vorangegangene Untersuchungen zeigten, konnten erhöhte Temperaturen an den Messstellen T13 und T15 gemessen werden. Im Zuge des Dauerversuches wurde ein ähnliches Verhalten festgestellt.

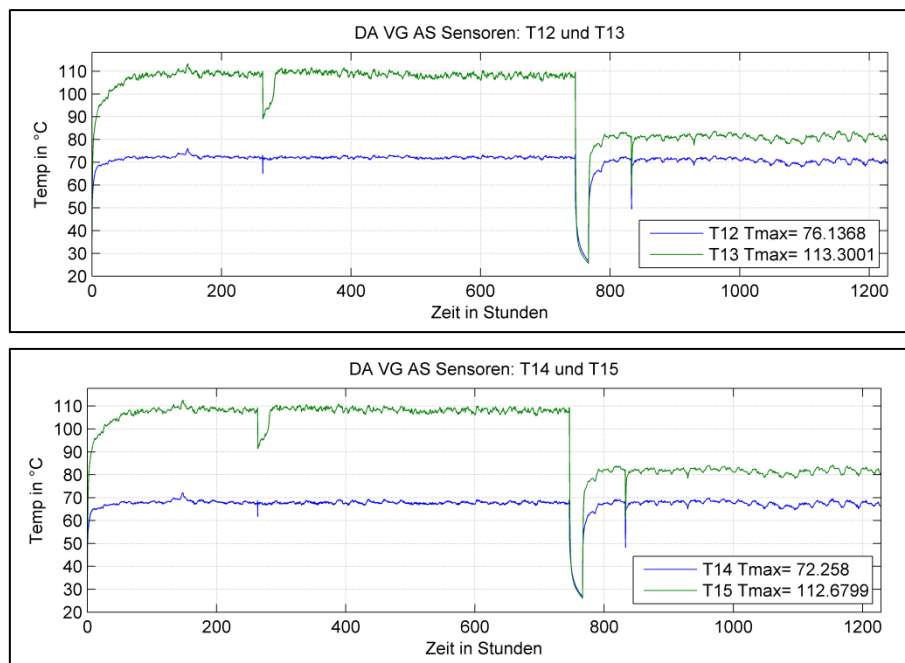


Diagramm 7-19: Temperaturverhalten der Sensoren T12, T13, T14 und T15

Die begleitende IR-Thermographie zeigte ebenfalls die Übertemperatur der Thermoelemente T12 und T14 an der Klemme P1. Die Klemme P2/A konnte aufgrund der Gegebenheiten im Prüffeld nicht mit der Wärmebildkamera beobachtet werden.



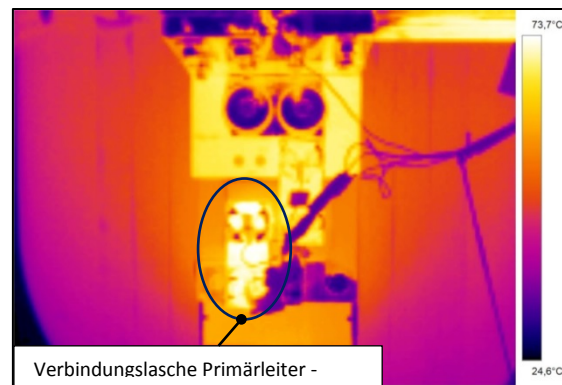


Abbildung 7-10: IR-Aufnahme und Positionierung der Thermoelemente der Klemme P1

Durch die IR-Aufnahme konnte die Temperaturerhöhung des Verschaltungselementes von Primärleiter zum Wandlerkopf optisch belegt werden. Die Ursache hierfür kann vermutlich auf einen hohen Gütefaktor des Verbindungswiderstandes zurückgeführt werden. Ein weiterer möglicher Grund für die Temperaturerhöhung könnte in den verwendeten Materialien liegen. Welche Materialien genau verwendet wurden ist nicht näher bekannt, ein Einfluss kann allerdings ohne weitere Untersuchungen nicht ausgeschlossen werden.

Im Diagramm 7-20 wurde die Übertemperatur des Gesamtsystems bei gemessener Leitertertemperatur von 75°C berechnet. Bei der Annahme eines Kupferleiters würde der Messwandler im Prüffeld ein Wärmeabgabevermögen von ca. 1 W/(m<sup>2</sup>\*K) aufweisen. Die Verwendung von Aluminiumleiter bei gleichen Wärmeabgabevermögen würde eine Übertemperatur von über 30°C ergeben. Für spätere detailgetreue Berechnungen ist die Ermittlung des Wärmeabgabevermögens notwendig.

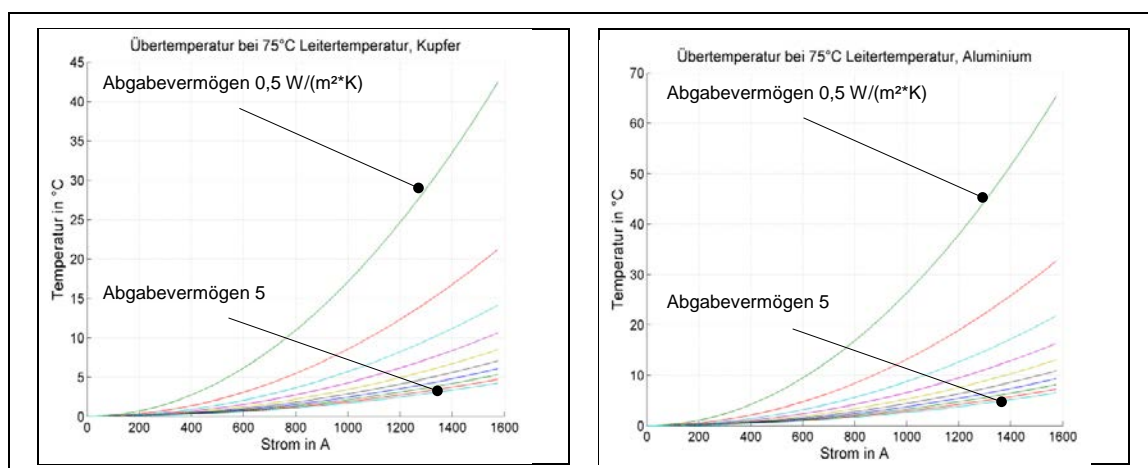


Diagramm 7-20: Übertemperatur bei 75°C Leitertertemperatur

Die Ergebnisse der begleitenden Ölmessungen sind in Kapitel 7.6 ersichtlich. Die Temperaturentwicklung während des Dauerversuchs zeigt, dass sich die Temperatur des Gesamtsystems bei 40°C Umgebungstemperatur bei ca. 59°C einschwingt.

## 7.6 Ölmessungen – ÖM\_KF\_/ÖM\_DGA\_#

Während der Dauerversuche wurden regelmäßig Wasser- und Gasgehaltsmessungen durchgeführt. Durch die Messungen sollte das „Herauskochen“ des Wassers aus der Papierisolierung überprüft werden.

Am Sockel des Wandlers ist eine Öffnung mit Septum für die Ölentnahme vorhanden. Durch diese Öffnung wird unter Zuhilfenahme einer Spritze die Ölprobe entnommen.

### 7.6.1 Ölentnahme

Bei der Entnahme der Ölprobe für die Gaschromatographie ist zu beachten, dass es zu keiner vorzeitigen Entgasung des Öls kommt. Vor der Füllung der Probefläschchen wird die Spritze mindestens zwei Mal mit dem Isolieröl gespült (je 10 ml). Dies hat den Sinn eventuelle Kondensfeuchte oder Verschmutzungen in der Spritze herauszuspülen. Durch den statischen Öldruck des Mineralöls im Wandler füllt sich die Spritze von selbst. Bei der dritten Entnahme von 10 ml werden 5 ml entfernt und die letzten 5 ml für die Gaschromatographie verwendet. Bei der Füllung der Headspace-Fläschchen, der Probefläschchen, wird mit einer konischen Nadel horizontal eingestochen werden. Die Füllung des Probenfläschchens erfolgt vertikal, damit der entstehende Überdruck bei vollständiger Füllung durch die Entnahme der Nadel nicht entweicht. Das Septum wird durch das Öl zusätzlich abgedichtet. Für die Gasanalyse wurde nur die Glasspritze verwendet.

Im Falle der Ölentnahme für die Feuchtemessung mittels Karl-Fischer-Titration muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass sich die Ölprobe während der Abkühlungsphase auf Raumtemperatur nicht weiterführend verfeuchtet. Dieses Prozedere erwies sich anfänglich als kompliziert in der Handhabung. Ein Wechsel der verwendeten Spritze und ein zusätzliches Ventil konnte den Vorgang der Ölentnahme erleichtern und die Verfeuchtung während der Abkühlung vorbeugen. Da die Messung des Wassergehalts direkt am Institut durchgeführt werden konnte, wurden die Feuchtemessungen in kürzeren Intervallen vorgenommen.



Abbildung 7-11: Spritze aus Plastik vom Institut für Hochspannungstechnik



Abbildung 7-12: Spritze zur Ölentnahme aus Glas von Verbund Umwelttechnik GmbH



Abbildung 7-13: Nadel und Ventilaufsatz zur Entnahme des Mineralöls

Vor dem Dauerversuch wurden je Öluntersuchung zwei Eingangsmessungen vorgenommen, siehe Tabelle 7-15.

Tabelle 7-15: Prüfbezeichnung der Öluntersuchungen

Bezeichnung	Untersuchungsparameter	Zustand des Prüfobjektes
ÖM_DGA_AL	Gasanalyse	Anlieferung
ÖM_KF_AL	Wassergehaltsmessung	Anlieferung
ÖM_DGA_EW	Gasanalyse	erwärmt, I = 1575 A
ÖM_KF_EW	Wassergehaltsmessung	erwärmt, I = 1575 A
ÖM_DGA_#	Gasanalyse	Dauerversuch
ÖM_KF_#	Wassergehaltsmessung	

### 7.6.2 Messergebnisse – Karl-Fischer-Titration

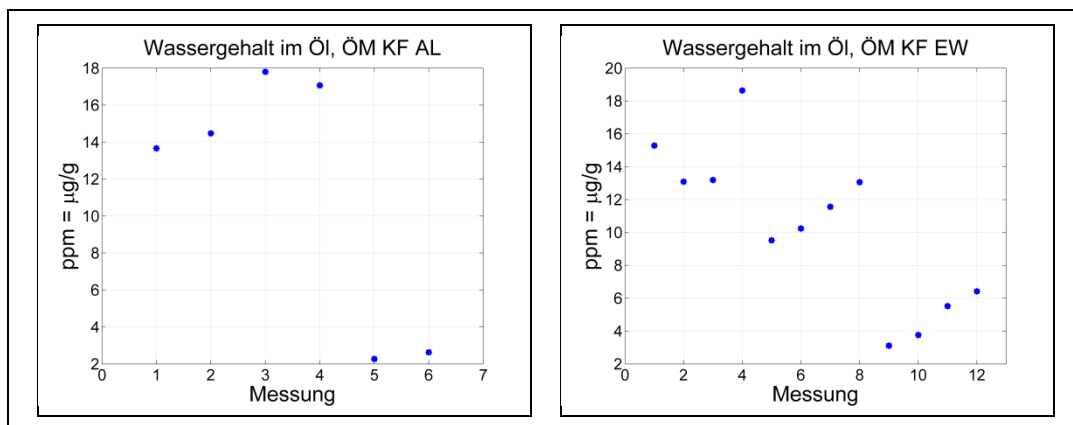


Diagramm 7-21: Wassergehalt im Öl, ÖM KF AL, ÖM KF EW inkl. Fehlmessungen

Bei den Messungen ÖM\_KF\_AL und ÖM\_KF\_EW war die anfängliche Verfeuchtung des Öls während der Abkühlungsphase vor der Messung ersichtlich. Diese Fehlmessungen (links: Messung 1-4, rechts: Messung 1-8) wurden für die Auswertung vernachlässigt. Nach erneuter Probenentnahme konnten geringere Werte gemessen werden.

Die Eingangsmessungen zeigten die Einhaltung der maximalen Wasserkonzentration von 10 ppm nach IEC 61181:2007. Es musste jedoch beachtet werden, dass der

Messwert kleiner der Toleranz der quantitativen Wasserbestimmung durch Titration, war. Dennoch kann dieser Kombiwandler als trocken angesehen werden.

Die Ölproben für die Wasserentnahme wurden ca. alle 250 Stunden entnommen. Nachfolgende Tabelle beinhaltet die Abnahmezyklen bei der Entnahme.

Tabelle 7-16: Abstände der Ölentnahmen

Ölentnahme	Abnahmezyklus
#	h
ÖM_KF_1	250
ÖM_KF_2	260
ÖM_KF_3	265
ÖM_KF_4	246
ÖM_KF_5	248

Der Wassergehalt während des Dauerversuches ist den nachfolgenden Diagrammen zu entnehmen.

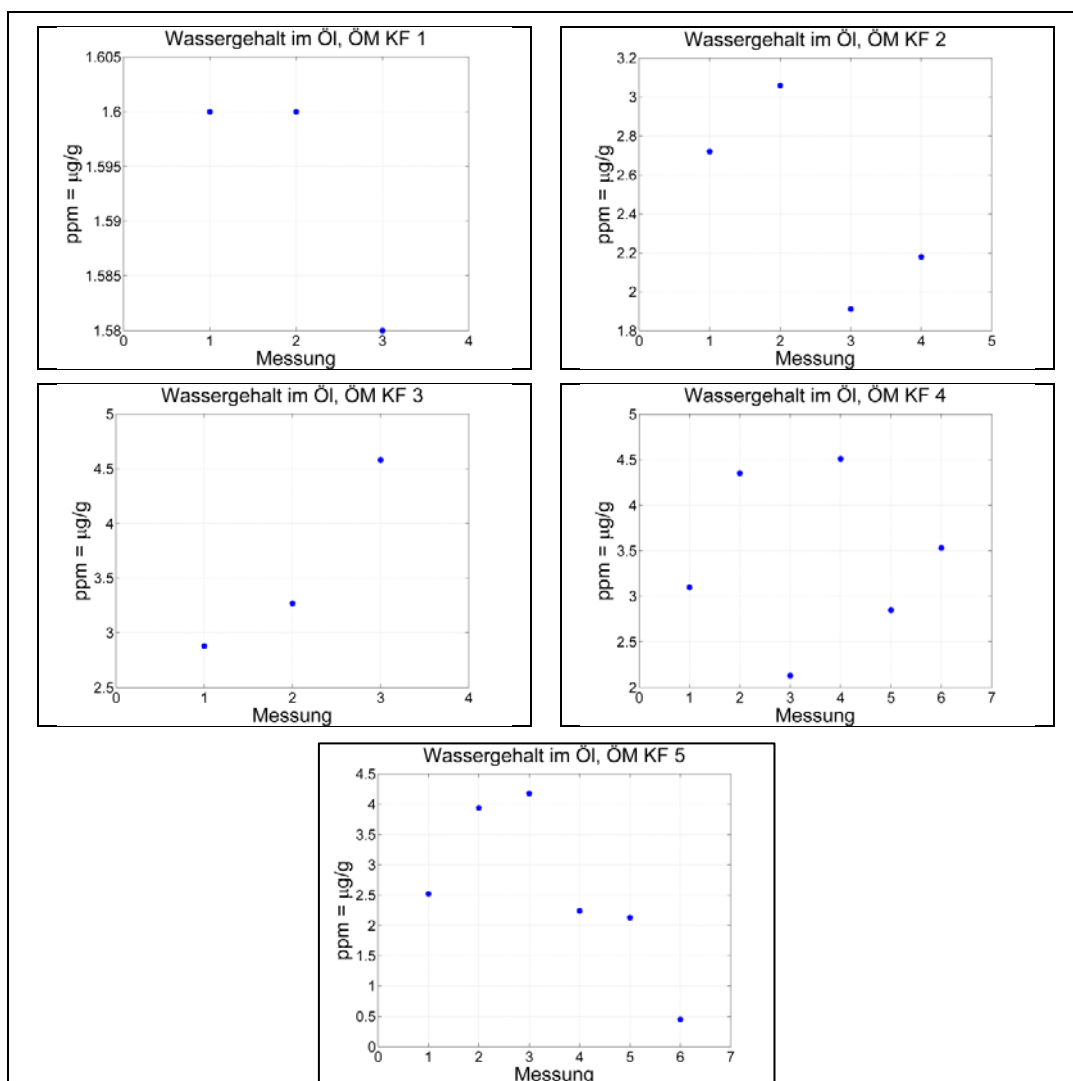


Diagramm 7-22: Wassergehaltsmessungen während des Dauerversuches

Im Zuge des ersten Dauerversuchs konnte kein merklicher Anstieg der Feuchte im Untersuchungsobjekt festgestellt werden. Diagramm 7-23 stellt alle Wassergehaltsmessungen von der Anlieferung des Wandlers bis zum aktuellen Stand ohne Fehlmessungen dar.

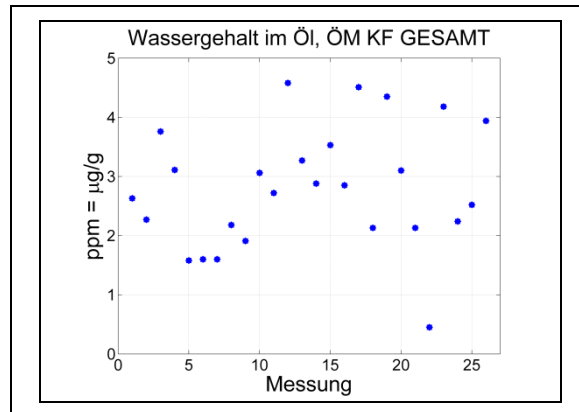


Diagramm 7-23: Gesamte Wassergehaltsentwicklung

Die Entnahme aller Proben während des Dauerversuchs erfolgte bei ca.  $40\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  Öltemperatur. Die Messung der Temperatur war insofern schwierig, da während der Entnahme die Temperatur nicht direkt und nur über ein Infrarotthermometer gemessen werden konnte. Aufgrund des Ortes der Entnahme am Sockel des Spannungswandlers, wurde das Öl in diesem Bereich vermutlich nicht höher erwärmt. Dies lässt darauf schließen, dass das Wärmeabgabevermögen am Kopf des Kombiwandlers groß genug ist um die erzeugte Wärmemenge abzuführen und nicht den gesamten Ölinhalt bzw. den gesamten Wandler zu erwärmen.

Die Bestimmung der Papierfeuchte wurde für den maximal und minimal gemessenen Wert, sowie für das Mittel aller Werte durchgeführt. Anhand folgender Formel wird die Papierfeuchte berechnet.

$$T = 31,52 - 26,605 \ln(\% \text{ Papier}) + 17,524 \ln(\text{ppm } \ddot{O}l) \quad (7-2)$$

Tabelle 7-17: Papierfeuchte während des Dauerversuches

	<b>Wassergehalt – Messung</b>	<b>Entnahmetemperatur</b>	<b>Papierfeuchte</b>
	<b>ppm</b>	<b>°C</b>	<b>%</b>
Minimum	0,45	39	0,31
		40	0,28
		41	0,26
Durchschnitt	2,8108	39	1,03
		40	0,94
		41	0,87
Maximum	4,58	39	1,43
		40	1,31
		41	1,19

Über den gesamten Dauerversuch DA\_VG\_AS ließ sich keine merkliche Veränderung des Wassergehaltes beobachten. Die Schwankungen der Messwerte, sowie die Messwerte an sich sind im Bereich der Messabweichung der Karl-Fischer-Methode. Folglich kann zum aktuellen Zeitpunkt der Kombiwandler als trocken angesehen werden.

### 7.6.3 Messergebnisse – DGA, Verbund Umwelttechnik

Die Analyse des Gasgehaltes im Öl wurde von der Verbund Umwelttechnik GmbH durchgeführt. Die Messergebnisse sind deren Bericht entnommen. Zudem sind zwei Werte der Gasgehaltsanalyse des Wandlers aus den Jahren 2007 und 2009 bekannt.

Die Grenzwerte werden in ppm angegeben und sind laut OVE-Empfehlung in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 7-18: Grenzwerte von Gasen im Öl laut OVE-Empfehlung

<b>Gas</b>	<b>Grenzwert</b>
-	<b>Ppm</b>
H <sub>2</sub> – Wasserstoff	100
CH <sub>4</sub> – Methan	200
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> – Ethen	300
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – Ethan	200
CO <sub>2</sub> und CO	Unberücksichtigt in OVE-Empfehlung

Die Ergebnisse aller durchgeführten DGA-Messungen sind in Tabelle 7-19 dargestellt.

Tabelle 7-19: Ergebnisse der Gas-in-Öl Analyse

Entnahme	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
-	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
APG_2007	28	100	247	1	0	0	0
APG_2009	51	134	388	5	0	2	2
Durchgeführte Ölentnahmen am Institut							
ÖM_DGA_AL_1	34	107	468	5	0	1	0
ÖM_DGA_AL_2	40	147	526	6	0	0	0
ÖM_DGA_EW	48	162	581	6	0	1	0
ÖM_DGA_DA_1	45	129	678	5	0	1	0

Die Betrachtung des Verhältnisses von Kohlendioxid zu Kohlenmonoxid ergibt einen langsam steigenden Quotienten.

$$K_4 = \frac{\text{Kohlendioxid (CO}_2\text{)}}{\text{Kohlenmonoxid (CO)}} \quad (7-3)$$

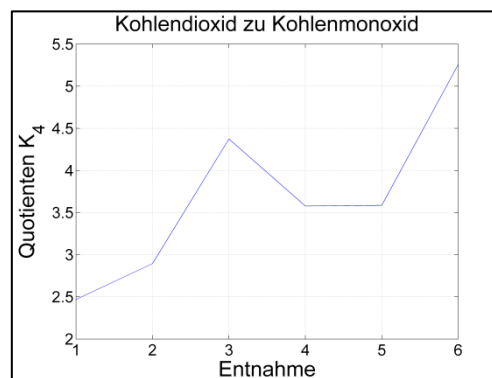


Diagramm 7-24: Quotient K<sub>4</sub> - Kohlendioxid CO<sub>2</sub>/Kohlenmonoxid CO

In Diagramm 7-23 und in Verbindung mit dem Gasgehalt aller anderen gemessenen Gase, ist allerdings kein Fehler im Prüfobjekt ersichtlich. Auf weitere Auswertungen nach Dornenburg, Rogers oder Duval wurde verzichtet.

Im aktuellen Stand der Untersuchung, Beginn DA\_VG\_SK – Dauerversuch Seilklemme, wies der Kombiwandler keine Auffälligkeiten in Bezug auf die Wasser- und Gasgehaltsentwicklung auf.

## 8 Weiterführende Untersuchungen

Nach Abschluss des Dauerversuches DA\_VG\_AS wird der zweite Teil der Vergleichsmessung des Wandleranschlusses gemäß dem Untersuchungsplan, siehe Tabelle 6-5 erfolgen. Im Prüffeld wird auf einen Doppelseilklemmenanschluss mit Hochspannungsseilen umgebaut und ein erneuter Dauerversuch mit den Prüfparametern gleichen Prüfparametern durchgeführt. Begleitend werden wiederum Ölproben vom Prüfobjekt gezogen und auf Wasser- und Gasgehalt untersucht.

Vor Beginn des Dauerversuchs mit 3150 A wird die Primärverschaltung des Stromwandlers auf Parallelbetrieb umgebaut. Im Zuge dieses Umbaus wird die Untersuchung des Anzugsmomentes, von 50 Nm – 75 Nm, an den Verschaltungslaschen mit 1200 A – 3150 A untersucht. Hierbei wird ein möglicher Wärmeverzug, sowie eventuelle zusätzliche Temperaturentwicklung durch Übergangswiderstände über die Thermoelemente untersucht. Abschließend wird die Messvorrichtung montiert und die Widerstandsmessung mit Gleichstrom durchgeführt. Durch die Messung der Widerstände bei verschiedenen Anzugsmomenten der Verbindungsflasche sollte einen Trend des Übergangswiderstandes in Abhängigkeit des Drehmomentes aufgenommen werden können.

Parallel zu den Dauerversuchen mit 3150 A, konstant und zyklisch, werden ebenfalls Ölproben entnommen. Während des zyklischen Dauerversuches werden die Ausdehnung und Entspannung bei Erwärmung und Abkühlung über die Dehndosen beobachtet. Die optische Begutachtung des Versuches ist hierbei von besonderer Bedeutung, denn im Bereich der Dichtungen und der Klemmverbindung des hermetisch abgeschlossenen Wandlers sollten eventuelle Ölaustritte oder atypische Veränderungen während der Zyklen dokumentiert werden können.

Im Anschluss daran erfolgen eine Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung. Diese sollten den Ausgangszustand vor den Dauerspannungsversuch aufnehmen. Die Teilentladungsprüfung erfolgt mit  $1,2 U_N$  bei 50 Hz. Im Falle der Notwendigkeit einer höheren Spannung zur TE-Prüfung, muss die Prüfspannung, um den Kern nicht in Sättigung zu treiben, höherer Frequenz sein. Die Speisung wird hierfür sekundärseitig erfolgen, da im Labor keine Hochspannung mit variabler Frequenz zur Verfügung steht. Die Teilentladungsmessung erfordert zudem eine teilentladungsfreie, frequenzvariable Spannungsquelle. Im Fall einer nicht teilentladungsfreien Quelle muss zudem ein TE-Filter für die sekundärseitige Speisung entwickelt werden.



Anknüpfend an die Ausgangsmessungen werden die Spannungsdauerversuche bei  $245/\sqrt{3}$  kV und in regelmäßigen Abständen weitere Verlustfaktor- und Teilentladungsmessungen zur Zustandsbeurteilung durchgeführt werden.

Nach Abschluss aller Untersuchungen sollen die Vorgänge und Auswirkungen im Messwandler und der allgemeine Zustand des Prüfobjektes beschrieben werden können. Die Betrachtung der Temperaturverteilung und die Entwicklung der Feuchte des ersten Prüfobjektes lassen momentan darauf schließen, dass dieser Kombiwandler keine gravierenden Auffälligkeiten in Bezug auf Wasser- und Temperaturentwicklung aufweist. Dennoch ist die Ursache des Temperaturverhaltens der Verbindungsflasche von Primärleiter zum Wandlerkopf zu eruieren.

Zudem wird im Rahmen dieses Projektes ein zweites Prüfobjekt zur Verfügung gestellt, welches laut Angaben der APG ein Isoliersystem mit höherer Feuchte aufweisen soll. Dadurch könnte auch der wichtige Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt der Isolierung und dem Teilentladungsverhalten untersucht werden. Darüber hinaus wird angedacht, begleitend zur Laborprüfung im Feld ein elektro-thermisches Modell über das Gesamtsystem zu erstellen. Durch die Vielzahl von Prüfung würde damit eine relativ genaue Parameterbestimmung möglich sein.

Die Prüfung des zweiten Kombimeschwandlers wird nach dem gleichen Untersuchungsplan erfolgen.

## 9 Zusammenfassung

Die durchgeführte Masterarbeit beschäftigte sich mit der Konzeptionierung und Durchführung von thermischen Untersuchungen an einem Messwandler der 220-kV-Spannungsebene. Initiiert wurde dieses Projekt aufgrund von atypischen, frühen Ausfällen von Kombimesswandlern.

Eingangs wurden der Aufbau, die Funktionsweise und der Einsatz der Messwandler im Hochspannungsnetz beschrieben. Nachfolgend wurden aufgrund des weiten Feldes der Untersuchungen die Grundlagen der Öl-Papier-Isolierung, der Erwärmung und deren Ursache sowie die Beschreibung von Klemmverbindungen behandelt.

Im Kapitel 5 „Untersuchungsobjekt Kombiwandler 220kV“ wurde das Prüfobjekt mithilfe eines erstellten CAD-Modelles beschrieben. Die Darstellung des Aufbaus vom Messwandler diente als Grundlage für Berechnungen und spätere elektro-thermische Modelle in digitaler Form. In diesem Kapitel wurde zudem auf die Wandlerproblematik und deren Folgen eingegangen.

In Kapitel 6 wurde der Untersuchungsplan und die Prüfanordnung erklärt. Die umfangreichen Untersuchungen des gesamten Projekts gliederten sich in die Widerstandsmessung des Primärleiters, die Variation des Anzugsmomentes der Klemmverbindungen, die Bestimmung der thermischen Zeitkonstanten, den ersten Dauerversuch sowie die Untersuchung des Isolieröls auf dessen Wasser- und Gasgehalt. Die Regelung der Versuchs-Parameter und die Aufzeichnung der Messergebnisse wurden über ein Mess- und Regelprogramm realisiert.

Die Messung der Spannungsabfälle über die Leiterabschnitte erfolgte mit einer konstruierten Messvorrichtung. Die Untersuchung der Widerstände mittels Widerstandsmessung ergab höhere Widerstandswerte im Vergleich zu den spezifischen Widerständen von Kupfer. Somit konnte auf kein Material zurückgeschlossen werden. Da die Messungen in den weiterführenden Arbeiten wiederholt werden, soll die Ursache dieser Abweichung untersucht werden.

Die Bestimmung der Gütefaktoren, in Kapitel 7.2.3, ergab bei der Betrachtung der rein gemessenen und der daraus berechneten Werte, dass die Klemmverbindungen mit einem Gütefaktor von 2,18 bzw. 2,39, als in Ordnung angesehen werden können. Beim Vergleich mit den spezifischen Werten ergeben sich hingegen Gütefaktoren von 28,36 bis 49,96 je nach Material und Klemmverbindung. In diesem Falle würden die Klemmverbindungen eine bis zu 49,96-fach erhöhte Verlustwärme im Vergleich zu einem

homogenen Leiter der gleichen Größe aufweisen. Der Ursache dieser großen Diskrepanz wird weiter nachgegangen.

Die Untersuchung des Anzugsmomentes ergab eine Temperaturerhöhung bei Klemmverbindungen geringerer Kontaktkraft. Beobachtet wurde zudem, dass der Einfluss nicht beidseitig erfolgte. Vermutlich liegt dies in der unterschiedlichen Verklemmung und Ausdehnung der Aluminiumschiene begründet. Des Weiteren wurde ein gleiches Temperaturverhalten an den Messstellen der Verbindungslaschen von Primärleiter und Wandlerkopf, genau wie an der manipulierten Klemmverbindung, beobachtet. Dies lässt sich jedoch nicht direkt auf einen Wärmeverzug zurückführen und muss noch weiterführend untersucht werden.

Die thermische Zeitkonstante des Gesamtsystems wurde im eingeschwungenen Zustand durch die Annäherung einer Exponentialkurve bestimmt und ergab ca. 4,3 Stunden. Für den zyklischen Dauerversuch bedeutet dies Zyklen von ca. 12 Stunden. Dadurch wird eine Erwärmung und Abkühlung von ca. 95 % erreicht.

Im Rahmen der Dauerversuche konnte wiederum ein gleiches Verhalten der Temperatur an den Messstellen der Verbindungslasche von Wandlerkopf zu Primärleiter beobachtet werden. In Bezug auf die Wasser- und Gasgehaltmessungen konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Das Isoliersystem des Kombimeschwandlers kann somit als trocken angesehen werden.

Diese Masterarbeit bildet die Grundlage für weiterführende Untersuchungen. Diese belaufen sich auf weitere Stromdauerversuche mit Doppelseilklemmen sowie Dauerspannungsversuche, Teilentladungsmessungen und Verlustfaktormessungen.

## V. Literaturverzeichnis

[1] A. Küchler, "*Hochspannungstechnik: Grundlagen-Technologie-Anwendungen*", Springer-Verlag GmbH, 2009.

[2] K. Heuck, K. Dettmann and D. Schulz, "*Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung Und Verteilung Elektrischer Energie Für Studium Und Praxis*", Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

[3] D. Oeding and B. R. Oswald, "*Elektrische Kraftwerke Und Netze*", Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

[4] K. H. Kind D., "*Hochspannungs-Isoliertechnik*", Braunschweig: Vieweg, 1982.

[5] R. Bauer, "*Die Meßwandler: Grundlagen, Anwendung Und Prüfung*", SPRINGER Publishing Company, 1953.

[6] Hochschule Karlsruhe, "*Fachgebiet Hochspannungstechnik - Lehre*", Available: [http://www.home.hs-karlsruhe.de/~lagu0001/lehre\\_exponate\\_messwandler\\_allgemeines\\_konven2.htm](http://www.home.hs-karlsruhe.de/~lagu0001/lehre_exponate_messwandler_allgemeines_konven2.htm).

[7] R. Woschitz, "*Hochspannungstechnologien*", Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, WS2011/12.

[8] O. Reyes, V. R. Garcia-Colon, H. Lara, E. Robles, M. Guzman, F. Elizarraraz and J. C. Martinez, "Abnormal failure rate on high voltage current transformers affected by environmental conditions", in *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium On*, 2008, pp. 247-251.

[9] E. Pagger, "Alternative Isolierflüssigkeiten im Vergleich zum klassischen Mineralöl", Dissertation an der TU Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Mai 2013.

[10] C. Kuen, "Bestimmung der Feuchtesorptionskurven von Zellulose für Transformatoren in Abhängigkeit vom Depolymerisationsgrad", Diplomarbeit an der TU Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Jänner 2008.

[11] IEC 60422:2006, "Richtlinie zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln", Februar 2007.

[12] J. Pukel, "Elektrische Festigkeit von Isolieröl", Dissertation an der TU Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Oktober 2008.

[13] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller and W. Zaengl, "Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung", pp. 145-225, 1986.

[14] M. Kahle, Ed., "*Elektrische Isoliertechnik*", Berlin: VEB Verlag Technik, 1988.

[15] C. Sumereder, "Feuchtigkeit in Transformatoren", *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, vol. 129, pp. 226-231, 06/01, 2012.

[16] METROHM, "Metrohm 851 Titrand Handbuch", 2013.

- [17] C. Sumereder, "Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik", Habilitation an der TU Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, 2010.
- [18] D. M. Robalino and S. M. Mahajan, "Dissolved gas analysis of a thermally overloaded oil-immersed current transformer", in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES*, 2010, pp. 645-652.
- [19] M. Muhr, "Hochspannungstechnik 1", Institut für Hochspannungstechnik, TU Graz, WS 2009/10.
- [20] H. P. Moser, *Transformerboard, "Die Verwendung Von Transformerboard in Grosstransformatoren"*, H. Weidmann AG, Rapperswil: Sonderdruck Scientia Electrica, 1979.
- [21] A. Schachenhofer, "Diagnostik an Transformatoren der elektrischen Energietechnik", Diplomarbeit an der TU Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2004.
- [22] CIGRE A2.18, "Life management techniques for power transformers", Jan 2003.
- [23] B. Buerschager and T. Leibfried, "Physik des feuchteaustauschs in einem öl-zellulose isoliersystem unter beachtung des grenzschichtverhaltens", in ETG-Fachtagung, Hanau, 2005, pp. 189-194.
- [24] F. Schultheiss and O. Institut für Elektro-Anlagen. Berlin, "*VEM-Handbuch Hochstromtechnik: Grundlagen, Dimensionierung Und Ausführung Von Hochstromanlagen*"; Mit 144 Tabellen. Verlag Technik, 1987.
- [25] R. Busch, "*Elektrotechnik Und Elektronik Für Maschinenbauer Und Verfahrenstechniker: Mit 132 Übungsaufgaben Mit Lösungen*", Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008.
- [26] M. Kahle, "*Elektrische Isoliertechnik : Mit 30 Tab.*", Berlin u.a: Springer, 1989.
- [27] H. Böhme, "*Mittelspannungstechnik*", Berlin München: Verl. Technik, 1992.
- [28] ZAMG. (29.08.2013). "*Sommer 2013: einer der wärmsten und sonnigsten der Messgeschichte - Erste Bilanz der ZAMG zum meteorologischen Sommer (Juni, Juli, August)*", Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/sommer-2013>.
- [29] M. Duval and J. - Crine, "Dielectric Behavior and Stabilization of Insulation Oils in EHV Current Transformers", *Electrical Insulation, IEEE Transactions On*, vol. EI-20, pp. 437-441, 1985.
- [30] ICNIRP, "ICNIRP GUIDELINES - FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz - 100 kHz)", vol. HEALTH PHYSICS 99(6), pp. 818-836, 2010.
- [31] T. Mühl, Ed., "*Messung Von Ohmschen, Blind- Und Scheinwiderständen*", Teubner, 2006.

## VI. Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 3-1: RELATIVE ALTERUNGSGESCHWINDIGKEIT DER ZELLULOSE, [20] .....	21
DIAGRAMM 3-2: ERWÄRMUNGS- UND ABKÜHLUNGSKURVE, X-ACHSE ANZAHL DER ZEITKONSTANTEN.....	25
DIAGRAMM 3-3: STROMDICHTEVERTEILUNG ÜBER DEN DURCHMESSER .....	29
DIAGRAMM 3-4: TEMPERATURENTWICKLUNG BEI DER ENTWICKLUNG EINES WÄRMEDURCHSCHLAGES, [26]	31
DIAGRAMM 5-1: BERECHNETE VERLUSTLEISTUNG BEI KUPFER .....	40
DIAGRAMM 5-2:BERECHNETE VERLUSTLEISTUNG BEI ALUMINIUM .....	40
DIAGRAMM 5-3: ÜBERTEMPERATUR VARIIERT NACH DEM ABGABEVERMÖGEN, <b>OBEN:</b> 60°C, <b>UNTEN:</b> 100°C, <b>LINKS:</b> KUPFER, <b>RECHTS:</b> ALUMINIUM .....	42
DIAGRAMM 6-1: MAGNETISCHE FLUSSDICHTE IM PRÜFFELD <b>LINKS:</b> 1575 A, 6 CM SCHIENENABSTAND, <b>RECHTS:</b> 3150 A, HOCHSPANNUNGSSEIL.....	51
DIAGRAMM 7-1: GEMESSENE SPANNUNG AN DEN ABGRIFFEN .....	65
DIAGRAMM 7-2: PRÜFUNG AM AS 1, 46 NM SENSOREN T03 UND T04 AN DEN KLEMMVERBINDUNGEN STROMSCHIENE-WANDLER .....	69
DIAGRAMM 7-3: AM AS 2, 51 NM, THERMOELEMENTE T03 UND T04.....	70
DIAGRAMM 7-4: AM AS 3, 30 NM, THERMOELEMENTE AN DER KLEMMVERBINDUNGEN STROMSCHIENE- WANDLER .....	70
DIAGRAMM 7-5:TEMPERATURSENSOR T03 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	71
DIAGRAMM 7-6: TEMPERATURSENSOR T04 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	71
DIAGRAMM 7-7: TEMPERATURSENSOR T07 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	72
DIAGRAMM 7-8: TEMPERATURSENSOR T13 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	72
DIAGRAMM 7-9: TEMPERATURSENSOR T14 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	72
DIAGRAMM 7-10: TEMPERATURSENSOR T15 DER VERSUCHE AM AS 1 -3 ÜBER DEN STROM .....	72
DIAGRAMM 7-11: MESSUNG ZUR ERMITTLUNG DER ZEITKONSTANTE.....	73
DIAGRAMM 7-12: ANNÄHERUNG DURCH EXPONENTIALFUNKTION ZUR ERMITTLUNG DER ZEITKONSTANTE...	74
DIAGRAMM 7-13: VERGRÖßERUNG DES TEMPERATURSTEIGERUNG AM T05 - BERSTSCHIEBE DES WANDLERS, ANNÄHERUNG UND INKL. ZEITKONSTANTE .....	74
DIAGRAMM 7-14: T03 UND T04, EINFLUSS DER AUSDEHNUNGSKRAFT DURCH DIE STROMSCHIENE AUF DIE KLEMMVERBINDUNG .....	75
DIAGRAMM 7-15: T13 - SELBIGES VERHALTEN WIE BEI T04.....	76
DIAGRAMM 7-16: T15, TEMPERATURCHARAKTERISTIK WIE VON T04.....	76
DIAGRAMM 7-17: DAUERVERSUCH DA_VG_AL.....	77
DIAGRAMM 7-18: T03 UND T04 WÄHREND DES DAUERVERSUCHS DA VG AS .....	78
DIAGRAMM 7-19: TEMPERATURVERHALTEN DER SENSOREN T12, T13, T14 UND T15.....	78
DIAGRAMM 7-20: ÜBERTEMPERATUR BEI 75°C LEITERTEMPERATUR .....	79
DIAGRAMM 7-21: WASSERGEHALT IM ÖL, ÖM KF AL, ÖM KF EW INKL. FEHLMESSUNGEN .....	81
DIAGRAMM 7-22: WASSERGEHALTSMESSUNGEN WÄHREND DES DAUERVERSUCHES.....	82
DIAGRAMM 7-23: GESAMTE WASSERGEHALTSENTWICKLUNG.....	83
DIAGRAMM 7-24: QUOTIENT $K_4$ - KOHLENDIOXID CO <sub>2</sub> /KOHLENMONOXID CO .....	85
DIAGRAMM 9-1: MESSERGEBNISSE DER VARIATION DER ANZUGSMOMENTE .....	97
DIAGRAMM 9-2: MESSERGEBNISSE DER VARIATION DER ANZUGSMOMENTE .....	98
DIAGRAMM 9-3: MESSERGEBNISSE DER ÜBRIGEN THERMOELEMENTE ZU EW_ZK_AS .....	99
DIAGRAMM 9-4: MESSERGEBNISSE DES DAUERVERSUCHS DA_VG_AS .....	100

## VII. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 3-1: AUSFÜHRUNGEN INDUKTIVER SPANNUNGSWANDLER [1] .....	5
ABBILDUNG 3-2: SF <sub>6</sub> SPANNUNGSWANDLER, [4] .....	5
ABBILDUNG 3-3: 110-KV-SPANNUNGSWANDLER [3] -TOPFBAUWEISE .....	6
ABBILDUNG 3-4: 800-KV-SPANNUNGSWANDLER , [4] - KASKADENSCHALTUNG, - ISOLIERMANTELBAUWEISE ....	6
ABBILDUNG 3-5: KAPAZITIVER SPANNUNGSWANDLER, [4].....	6
ABBILDUNG 3-6: KAPAZITIVER SPANNUNGSWANDLER AUFBAU, [4] .....	7
ABBILDUNG 3-7: MEHRFACHKERN EINES SF <sub>6</sub> -ISOLIERTEN STROMWANDLERS, [4] .....	8
ABBILDUNG 3-8: A) STÜTZERWANDLER, B) DURCHFÜHRUNGSWANDLER, [4].....	8
ABBILDUNG 3-9: GIEßHARZISOLIERTER STÜTZERSTROMWANDLER FÜR 10 KV, [4] .....	8
ABBILDUNG 3-10: STROMWANLDER FÜR FREILUFTANALGEN, A) TOPFBAUWEISE, B) MANTELBAUWEISE, C) KOPFBAUWEISE, [4] .....	9
ABBILDUNG 3-11: 400 KV -KOPFSTROMWANDLER [4] .....	9
ABBILDUNG 3-12: 500 KV-STROMWANDLER MIT U-FÖRMIGER PRIMÄRLEITER [4].....	9
ABBILDUNG 3-13: RINGKERNSTROMWANDLER FÜR GIS-ANLAGE, [4] .....	10
ABBILDUNG 3-14: KAPAZITIVE ABGESTEUERTE DURCHFÜHRUNGS AUSLEITUNG .....	11
ABBILDUNG 3-15: VERLUSTFAKTOR IN ABHÄNGIGKEIT VON A) WASSERGEHALT BEI 40°C, B) FELDSTÄRKE UND WASSERGEHALT RAUMTEMPERATUR, C) TEMPERATUR UND FELDSTÄRKE, [13] .....	15
ABBILDUNG 3-16: DURCHSCHLAGSFESTIGKEIT VON MINERALÖL ZUR ABSOLUTEN FEUCHTE, [14] .....	16
ABBILDUNG 3-17: DIELEKTRIZITÄTSZAHL IN ABHÄNGIGKEIT DER ROHDICHTE [13].....	19
ABBILDUNG 3-18: PHASEN DER TROCKNUNG [20] .....	20
ABBILDUNG 3-19: EINFLUSS VON TEMPERATUR UND WASSER AUF DIE ALTERUNGSFAKTOREN, [21, 22].....	20
ABBILDUNG 3-20: LÖSUNGSVERMÖGEN FÜR WASSER IN PPM VON MINERALÖL, [1] .....	21
ABBILDUNG 3-21: FEUCHTEBESTIMMUNGSKURVEN ZWISCHEN ÖL UND PAPIER, [10] .....	22
ABBILDUNG 3-22: ENTSTEHUNG UND WIRKUNG DES SKINEFFEKTES, A) STROMDICHTE S(T) UND ERZEUGTES MAGNETFELD $\Phi(T)$ , B) HERVORGERUFENE WIRBELSTRÖME, C) FREQUENZABHÄNGIGKEIT DES WIDERSTANDES [25] .....	29
ABBILDUNG 3-23: SIMULATION DES SKINEFFEKTES EINES KUPFERLEITERS .....	29
ABBILDUNG 3-24: SIMULATION DES SKIN- UND PROXIMITYEFFEKTES, <b>OBEN</b> : GLEICHSINNIGER STROMFLUSS, <b>UNTEN</b> : GEGENSINNIGER STROMFLUSS <b>LINKS</b> : STROMDICHTEVERTEILUNG, <b>RECHTS</b> : STROMDICHTE UND MAGNETISCHE FLUSSSTÄRKE .....	30
ABBILDUNG 3-25: URSPRUNG UND EINFLUSS THERMISCHER STROMBELASTUNG, AUS [27] ADAPTIERT .....	32
ABBILDUNG 3-26: DARSTELLUNG VERBINDUNGSWIDERSTAND, [27] .....	33
ABBILDUNG 3-27: GÜTEFAKTOR IN ABHÄNGIGKEIT DER KONTAKTKRAFT, [27].....	34
ABBILDUNG 5-1: MODELL DES PRÜFOBJEKTS - KOMBIWANDLER KOTEF 220 KV.....	35
ABBILDUNG 5-2: MODELL DES STROMWANDLERKOPFES MIT PRIMÄRLEITERSYSTEM KOTEF 220 KV .....	36
ABBILDUNG 5-3: PRIMÄRLEITERSYSTEM MIT VERBINDUNGLASCHEN.....	36
ABBILDUNG 5-4: SPANNUNGSWANDLER IM SOCKEL .....	36
ABBILDUNG 5-5: A) PRIMÄRVERSCHALTUNG IN SERIE I <sub>1</sub> =600 A, B) PRIMÄRVERSCHALTUNG PARALLEL I <sub>1</sub> = 1200, C) SPANNUNGSWANDLER SEKUNDÄR 220 V <sub>3</sub> , D) SPANNUNGSWANDLER SEKUNDÄR 110 V <sub>3</sub> .....	37
ABBILDUNG 5-6: EINTEILUNG DES PRIMÄRLEITERS IN ABSCHNITTE .....	39
ABBILDUNG 5-7: MODELL DES WÄRMEFLUSSES .....	41
ABBILDUNG 5-8: MODELL ZUR ERMITTLUNG DER MAXIMAL TEMPERATUR.....	41
ABBILDUNG 6-1: AUFHÄNGUNG UND ROHRLÜFTER DER PRÜFKABINE .....	48
ABBILDUNG 6-2: UMLUFTSYSTEM EINSAUGUNG UND RÜCKFÜHRUNG DER WARMLUFT.....	48
ABBILDUNG 6-3: UMLUFTSYSTEM ANSICHT VON AUßEN.....	48
ABBILDUNG 6-4: VERSORGUNG DER KOMPONENTEN IM PRÜFFELD.....	49
ABBILDUNG 6-5: MODELL DES PRÜFAUFBAUS, KONFIGURATION I = 1575 A - ALUMINIUMSCHIENE.....	50

ABBILDUNG 6-6: MODELL DES PRÜFAUFBAUS, KONFIGURATION I = 3150 A - SEILKLEMME UND HOCHSPANNUNGSSEIL.....	50
ABBILDUNG 6-7: ALUMINIUMSCHIENE UND WANDLERKONTAKTFLÄCHE .....	50
ABBILDUNG 6-8: AUFBAU DER STROMZUFUHR FÜR 1575 A .....	51
ABBILDUNG 6-9: TMG - TEMPERATURMESSGERÄT, 16-KANAL .....	52
ABBILDUNG 6-10: THERMOELEMENTE AM PRÜFOBJEKT .....	53
ABBILDUNG 6-11: POSITIONIERUNG DER INFRAROTKAMER UND DES TESTO 400 MESSGERÄTES .....	53
ABBILDUNG 6-12: VORBEREITUNGEN ZUR MESSUNG MITTELS MALER-KREPP-KLEBEBAND .....	54
ABBILDUNG 6-13: MESSPLATZ .....	54
ABBILDUNG 6-14: STROMMESSUNG MITTELS ROGOWSKISPULE.....	54
ABBILDUNG 6-15: FEUERMEHLER ÜBER DEM PRÜFOBJEKT .....	55
ABBILDUNG 6-16: PRÜFAUFBAU AUS SICHT DES REGEL- UND MESSKREISES .....	56
ABBILDUNG 6-17: SIGNALFLUSSGRAPH DER SPEICHERVARIABLE, MESSDATEN SOWIE DEM REGELKREIS.....	57
ABBILDUNG 6-18: RELAISKARTE.....	58
ABBILDUNG 7-1: THERMOELEMENTE AM PRÜFOBJEKT .....	59
ABBILDUNG 7-2: THERMOELEMENTE IM ÖLBAD ZUR KALIBRIERUNG .....	60
ABBILDUNG 7-3: ANSCHLUSSKLEMMENMODELL MIT EINGEZEICHNETEN, ZU MESSENDEN SPANNUNGEN .....	61
ABBILDUNG 7-4: VIER-LEITER-WIDERSTANDSMESSUNG, [31].....	62
ABBILDUNG 7-5: CAD-MODELL DER MESSVORRICHTUNG ZUR WIDERSTANDSMESSUNG AN DEN WANDLERKLEMMEN, SOWIE DARSTELLUNG DER SPANNUNGSSCHEIDE .....	62
ABBILDUNG 7-6: KLEMMEN P1 INKL. MESSVORRICHTUNG .....	63
ABBILDUNG 7-7: KLEMMEN P2/A BEIM AUFBAU.....	63
ABBILDUNG 7-8: LINKS: ERSATZSCHALTBILD ZUR WIDERSTANDSMESSUNG WI_DC, RECHTS OBEN: GLEICHSPANNUNGSQUELLE; RECHTS UNTEN: SHUNT, 1000 A/59,3 MV.....	63
ABBILDUNG 7-9: SPANNUNGSABGRIFF AM PRIMÄRLEITERSYSTEM DARGESTELLT IM CAD-MODELL .....	64
ABBILDUNG 7-10: IR-AUFNAHME UND POSITIONIERUNG DER THERMOELEMENTE DER KLEMMEN P1.....	79
ABBILDUNG 7-11: SPRITZE AUS PLASTIK VOM INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK .....	81
ABBILDUNG 7-12: SPRITZE ZUR ÖLENTNAHME AUS GLAS VON VERBUND UMWELTTECHNIK GMBH .....	81
ABBILDUNG 7-13: NADEL UND VENTILAUFSATZ ZUR ENTNAHME DES MINERALÖLS .....	81



## VIII. Tabellenverzeichnis

TABELLE 3-1: ANFORDERUNGEN AN DAS ISOLIERÖL NACH IEC 60422:2006 [11] .....	13
TABELLE 3-2: OXIDATIONSMECHANISMEN IM ÖL, [1] .....	14
TABELLE 3-3: ISOLIERPAPIERDICHTENACH VERDICHTUNG, [1].....	19
TABELLE 3-4: WÄRMEQUELLEN IN STROM- UND SPANNUNGSWANDLER, ZUSAMMENGEFASST AUS [5].....	23
TABELLE 3-5: GEGENÜBERSTELLUNG ELEKTROTECHNISCHE VS. THERMISCHE GRÖßEN .....	24
TABELLE 5-1: SPEZIFISCHE WERTE VON KUPFER, ALUMINIUM UND EISEN, [5].....	39
TABELLE 5-2: BERECHNETE WIDERSTANDSWERTE VOM PRIMÄRLEITERSYSTEM BEI 20°C .....	40
TABELLE 6-1: DAUERPRÜFSTROM BEI $T_{AMB} = 40^{\circ}C$ .....	43
TABELLE 6-2: PRÜFKONFIGURATION ZUR UNTERSUCHUNG DES WÄRMEVERZUGS DURCH VERSCHIEDENE ANZUGSMOMENTE .....	44
TABELLE 6-3: DAUERVERSUCH 1 DA_VG_AS, DAUERVERSUCH 2 DA_VG_SK .....	44
TABELLE 6-4: DAUERVERSUCH 3 DA_EW_SK, DAUERVERSUCH 4 DA_ZY_SK .....	45
TABELLE 6-5: GESAMTER UNTERSUCHUNGSABLAUF IM LABOR .....	46
TABELLE 6-6: MAGNETISCHE FLUSSDICHTEN IM NAHBEREICH DES PRÜFFELDES .....	52
TABELLE 6-7: AUSZUG DER MESSDATEN .....	57
TABELLE 7-1: AUFNAHME DER MESSABWEICHUNG DER KLEMME P1 .....	60
TABELLE 7-2: AUFNAHME MESSABWEICHUNG KLEMME P2/A .....	60
TABELLE 7-3: MESSABWEICHUNG NACH ERNEUTER VERLÖTUNG VON T03 UND T06.....	61
TABELLE 7-4: ZUORDNUNG DER ABGEGRIFFENEN SPANNUNGEN, WI_DC .....	64
TABELLE 7-5: ABMESSUNGEN UND BERECHNETER WIDERSTAND AUS DEN GEMESSENEN SPANNUNGEN.....	66
TABELLE 7-6: $R_{SCH}$ ZUR BERECHNUNG DES GÜTEFAKTORS DER KLEMMVERBINDUNGEN .....	66
TABELLE 7-7: GÜTEFAKTOR BEI VERWENDUNG VON SPEZIFISCHEN WIDERSTANDSWERTEN .....	67
TABELLE 7-8: ANZUGSMOMENT HERSTELLERANGABEN .....	67
TABELLE 7-9: PRÜFSTROM ZUR UNTERSUCHUNG DES WÄRMEVERZUGS AUFGRUND DES ANZUGSMOMENTES.....	68
TABELLE 7-10: PRÜFBEZEICHNUNG ANZUGSMOMENT .....	68
TABELLE 7-11: TEMPERATURMAXIMA T03 UND T04 DER VERSUCHE AM AS 1 - 3.....	71
TABELLE 7-12: BESTIMMUNG DER ZEITKONSTANTE - PRÜFFPARAMETER .....	73
TABELLE 7-13: DAUER DER ERWÄRMUNG NACH EINER BIS FÜNF ZEITKONSTANTEN.....	75
TABELLE 7-14: PRÜFKONFIGURATION DA_VG_AS .....	77
TABELLE 7-15: PRÜFBEZEICHNUNG DER ÖLUNTERSUCHUNGEN.....	81
TABELLE 7-16: ABSTÄNDE DER ÖLENTNAHMEN .....	82
TABELLE 7-17: PAPIERFEUCHTE WÄHREND DES DAUERVERSUCHES.....	84
TABELLE 7-18: GRENZWERTE VON GASEN IM ÖL LAUT OVE-EMPFEHLUNG .....	84
TABELLE 7-19: ERGEBNISSE DER GAS-IN-ÖL ANALYSE .....	85
TABELLE 9-1: ABMESSUNGEN DER UNTERSUCHTEN ABSCHNITTE DES PRIMÄRLEITERSYSTEMS.....	96

## IX. Anhang

### A. Untersuchungsobjekt

Tabelle 9-1: Abmessungen der untersuchten Abschnitte des Primärleitersystems

Abschnitt	Breite	Dicke	Länge	Querschnitts- fläche	Oberfläche Leiter - Isolation	Volume
#	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>
1	200	20	175	4000	0,061	700
2	200	20	175	4000	0,0785	700
3	50	20	125	1000	0,015	125
4	Radius	25	640	1963,5	0,1005	125,66
5	50	20	125	1000	0,015	125
6						
7	50	20	125	1000	0,015	125
8	Radius	25	640	1963,5	0,1005	125,6
9	50	20	125	1000	0,015	125
10	200	20	175	4000	0,0785	700
11	200	20	175	4000	0,061	700

## B. Widerstandsmessung – WI\_DC

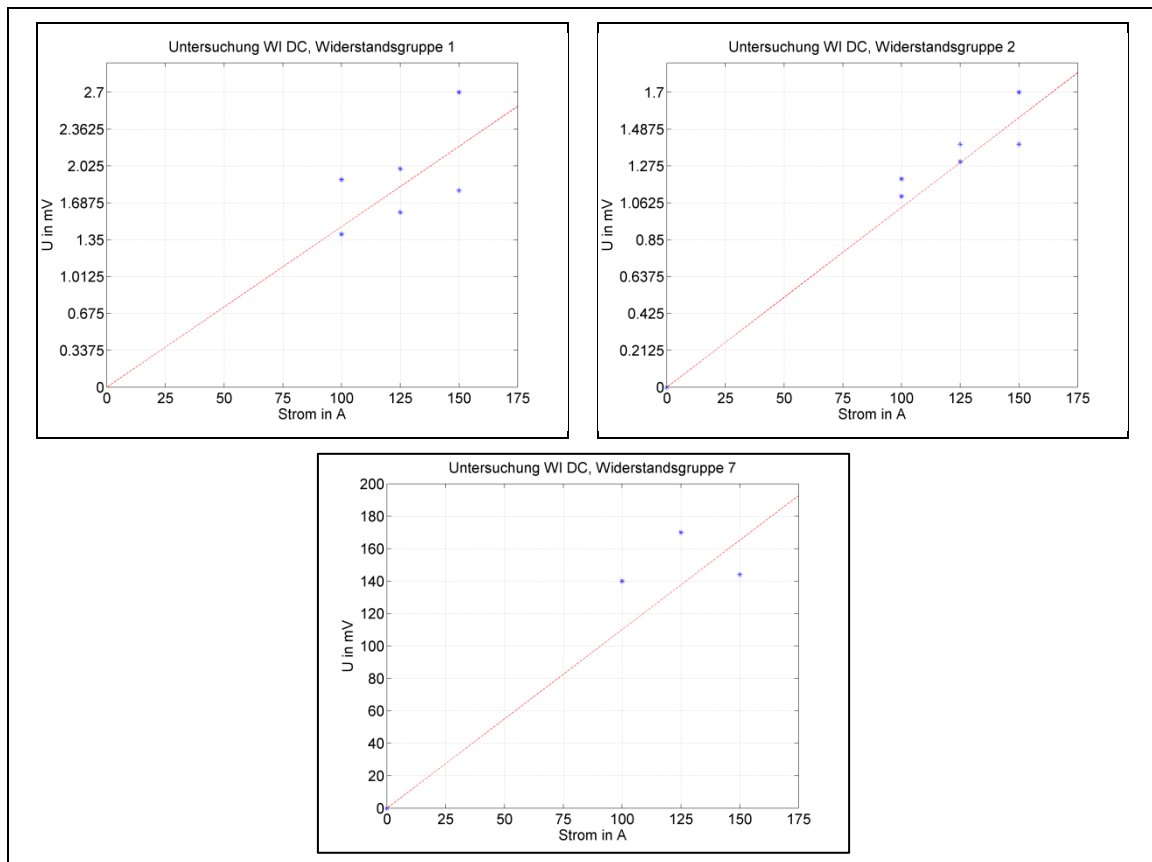


Diagramm 9-1: Messergebnisse der Variaton der Anzugsmomente

### C. Einfluss des Anzugsmomentes – AM\_AS\_#

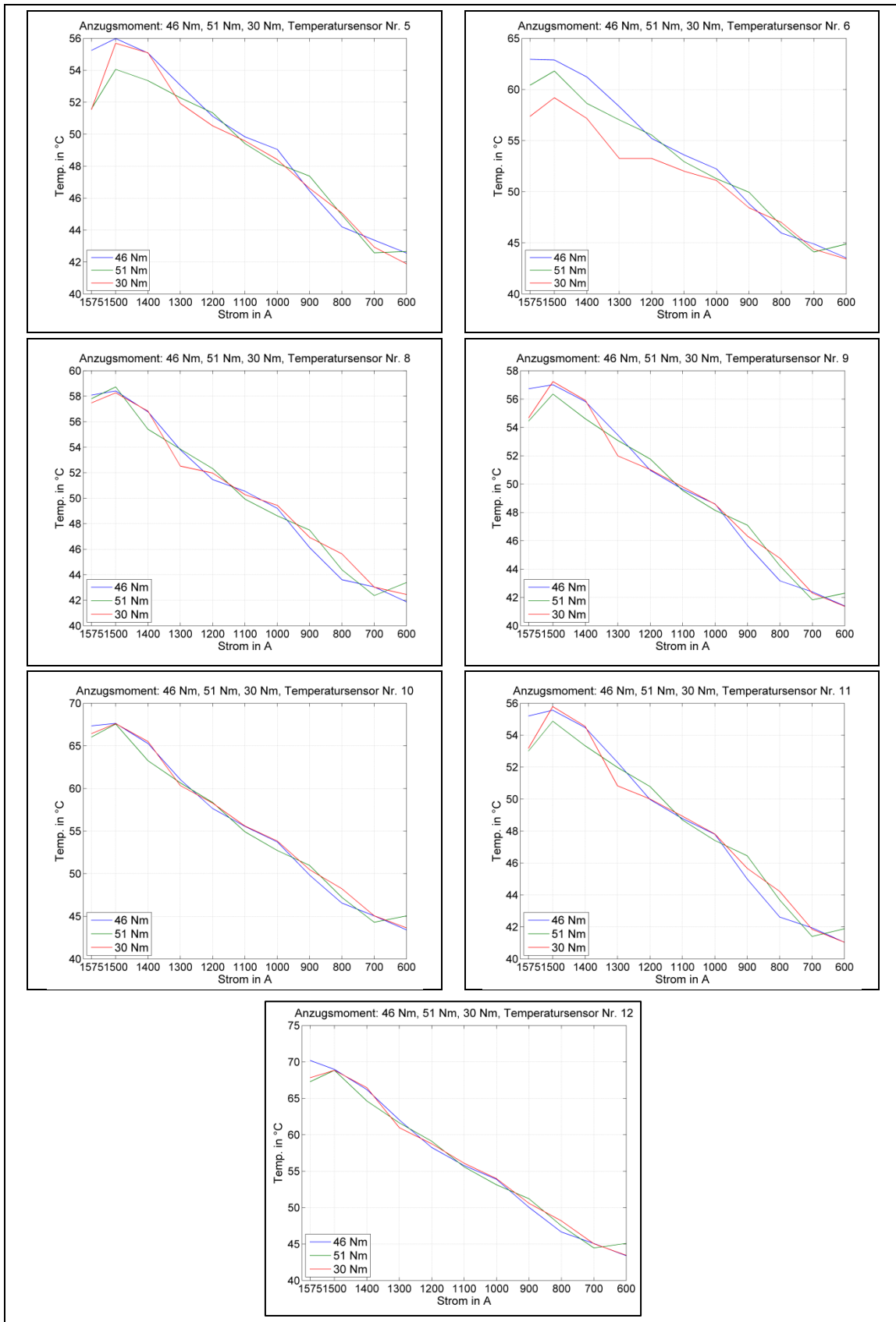


Diagramm 9-2: Messergebnisse der Variaton der Anzugsmomente

### D. Ermittlung der Zeitkonstante – EW\_ZK\_AS

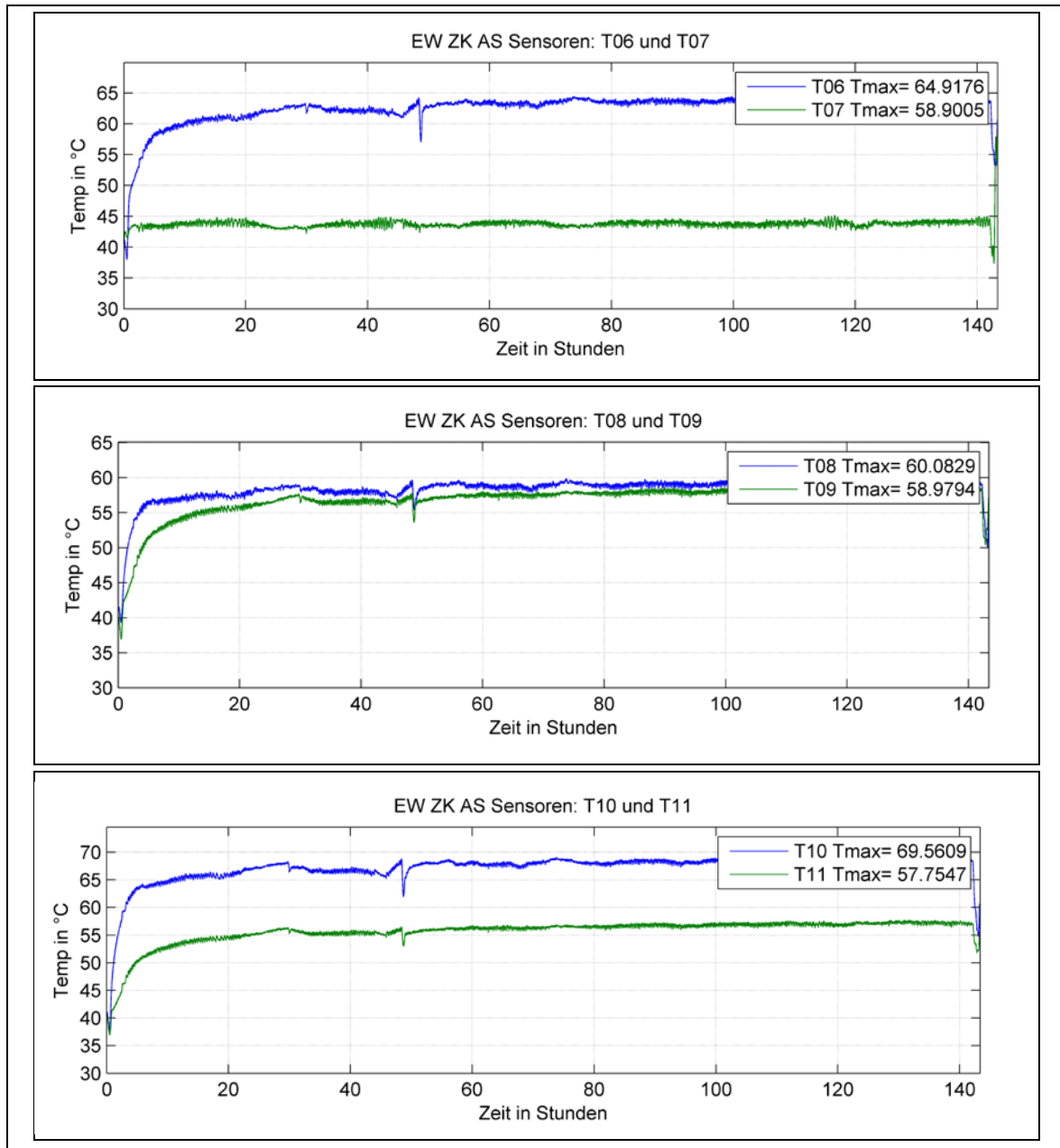


Diagramm 9-3: Messergebnisse der übrigen Thermoelemente zu EW\_ZK\_AS

### E. Dauerversuch – DA\_VG\_AS

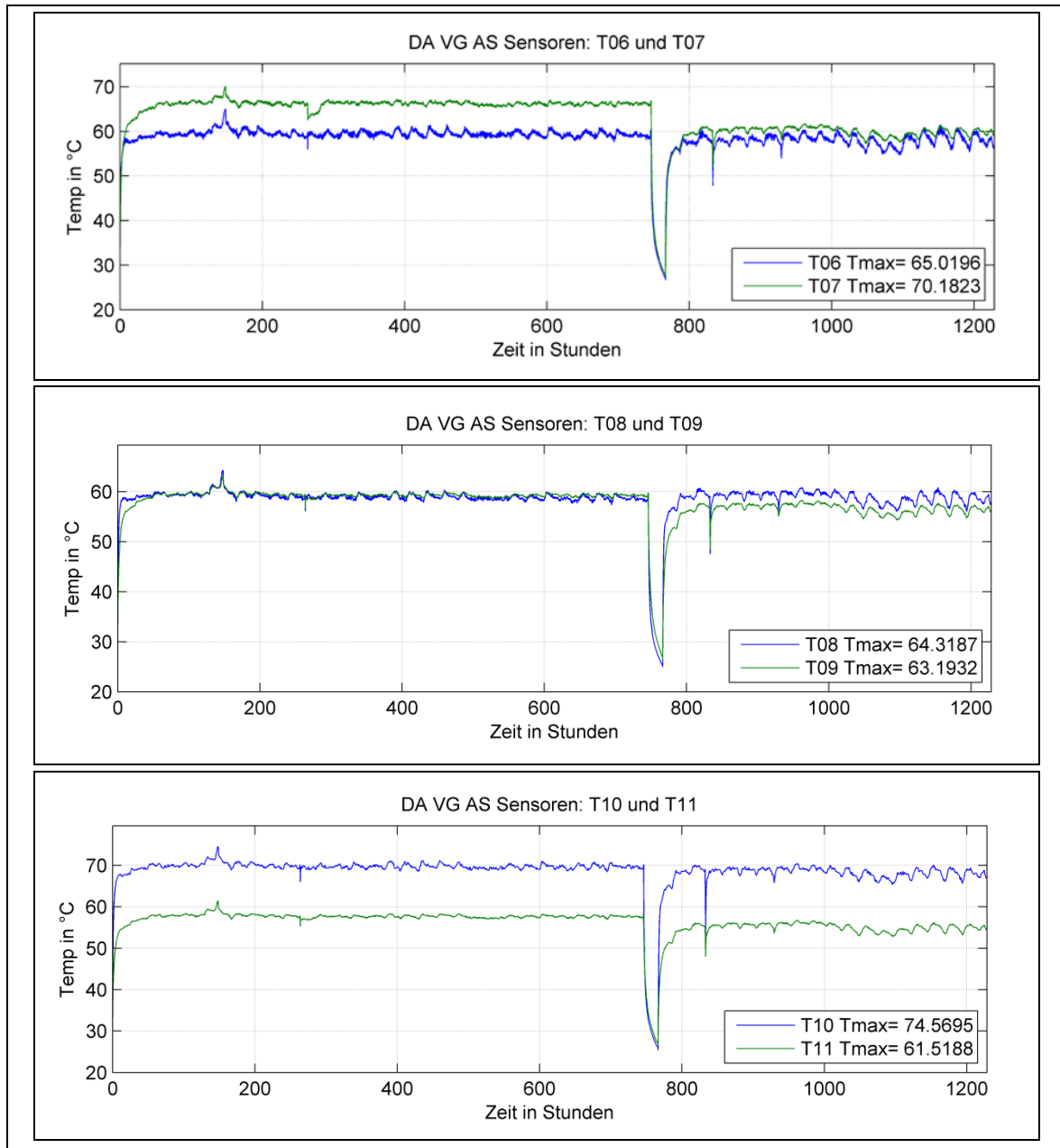


Diagramm 9-4: Messergebnisse des Dauerversuchs DA\_VG\_AS