



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

---

Datum

---

Unterschrift

# I Danksagung

Die Masterarbeit stellt den sichtbaren Gipfel jenes Eisbergs dar, welcher die Gesamtheit eines Studiums erfasst. Und auch wenn die Deckblätter der Masterarbeiten nur einen Namen für den Verfasser der selbigen tragen, so bedarf es doch einer Vielzahl von Menschen, um eine solche Arbeit schlussendlich aufs Papier zu bringen.

Diesen Menschen gehört mein Dank und diesen Menschen gehören auch die folgenden Zeilen.

Bedanken möchte mich zuerst bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz, welcher mir als Betreuer bei dieser Arbeit allzeit zur Seite gestanden ist. Danke für Ihre fachliche Kompetenz, Ihr offenes Ohr und danke für die Art und Weise wie Sie mit Ihren Mitarbeitern und Diplomanten umgehen.

Weiters möchte ich mich beim Geschäftsführer der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz, Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c Michael Muhr und beim Leiter des Instituts für Hochspannungstechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler, für die Plattform und die Möglichkeit eine solche Arbeit schreiben zu können, bedanken.

Mein Dank geht ferner an die Mitarbeiter der Werkstatt, besonders an Herrn Anton Schriebl und Herrn Michael Paier, die mich stets bei den aufwendigen Aufbauten im Prüffeld unterstützt haben, an Frau Karin Wukounig aus dem Sekretariat und Herrn Rainer Reischenbacher aus der EDV.

Ein besonderer Dank geht an die Kollegen, deren Arbeitsgruppe ich Teil sein durfte, allen voran Herrn Bernhard Heine für die großartige Unterstützung bei der Erstellung des in dieser Arbeit verwendeten CAD-Modells, an Frau Bettina Wieser für ihre schier endlose Kenntnis zum Thema Mineralöl und ihren unbeugsamen Arbeitseinsatz und Herrn Gernot Komar für die Unterstützung und die Unterhaltung.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, besonders bei meiner Cousine Helena und meinem besten Freund David, für die willkommene Zerstreuung und den Austausch während der Studienzeit, vor allem in der letzten Phase dieser Arbeit.

Unendlich dankbar bin ich meiner Mutter Brigitte, welcher ich diese Arbeit widmen möchte, dafür, dass sie mir in der gesamten Studienzeit den Rücken frei gehalten und mir Halt gegeben hat, dafür dass sie meine Launen und zeitweilige Zerstreuung mit einem Lächeln ertragen hat und dafür, dass sie einfach immer für mich da ist. Ohne dich wäre ich nicht da wo ich bin. Danke Mom.

## II Kurzfassung

Die Energieversorgung befindet sich im Wandel. Das Unbundling von Energieerzeugern und Netzbetreibern, der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien durch beispielsweise Windkraft- und Photovoltaikanlagen und der stetig steigende Bedarf an Energie bedeuten eine nicht unerhebliche Herausforderung für das gesamte Energieversorgungssystem, welches das infrastrukturelle Rückgrat einer industrialisierten und zunehmend technifizierten Welt und deren Bevölkerung darstellt.

Sowohl die energieerzeugenden Unternehmen als auch jene, die für deren Verteilung sorgen, stehen vor der Aufgabe, nicht nur sicherzustellen, dass die Energie beim Verbraucher zu jeder Zeit in ausreichender Menge ankommt, sondern sie müssen dies zudem unter zunehmendem, marktwirtschaftlichem Druck gewährleisten können. Neue wie bestehende Anlagen und Betriebsmittel müssen dafür zwangsweise kosteneffizient genutzt werden, was nicht selten dazu führt, dass diese verstärkt in Richtung ihrer Leistungsgrenzen betrieben werden. Die Kenntnis entsprechender Bemessungswerte ist dabei für die Bewertung der Betriebsmittel, wie sie beispielsweise beim „Thermal Rating“ erfolgen, von entscheidender Bedeutung. Das Wissen um das elektrische und magnetische Verhalten dieser Systeme reicht dabei längst nicht mehr aus. Besonders das thermische Verhalten gewinnt dabei ansteigend an Interesse.

Messwandler in Hoch- und Höchstspannungsnetzen, im Besonderen kombinierte Messwandler, sind hier keine Ausnahme. Diesen Betriebsmitteln, im speziellen deren Hauptstrombahn, und deren Verhalten unter thermischem Stress widmet sich diese Arbeit.

Das Verhalten wurde dabei durch mehrere Belastungsversuche mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom des Wandlers von 3150 A, durch dielektrische Vergleichsmessungen mit einem unbelasteten Wandler, durch die Untersuchung des Mineralöls sowie begleitende mechanische, thermische und fluiddynamische Simulationen untersucht.

Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Thema Kontakte und Kontaktverhalten gelegt.

### **Stichwortverzeichnis:**

- Messwandler
- Thermischer Belastungsversuch
- Kontakte
- Feuchteentwicklung
- Simulation



## III Abstract

Electrical power supply is changing. The unbundling of energy production and energy distribution, the continuous expansion of renewable energy for example through wind power and photovoltaics as well as the steady growing demand of energy are facing the electrical supply system, which is the infrastructural backbone of an industrialized and more and more technologized world and its population, with quite some challenges.

Power supply companies as well as those who are in charge of distribution are faced with the task, not just to ensure that the needed amount of energy reaches the consumers at all times, they have to guarantee to do so being under increasing pressure by the market economy. Therefore, new as well as already existing electrical facilities have to be used cost efficient, which often means that this equipment is operated closer and closer at its limit. The knowledge of rated values for this equipment is of major importance for its rating, for example its thermal rating. The knowledge of the electrical and magnetical behavior of these components is not enough. Thus, the thermal behavior in particular is of gaining interest.

Measuring transformers in high voltage grids, especially combined measurement transformers, are no exception. These transformers, especially their main conductors and their behavior on thermal stress, are content of this thesis.

Their behavior was investigated by thermal stress tests with the rated thermal current of 3150 A, by comparative dielectrical measurements with an unstressed transformer, by analysis of the mineral oil as well as accompanying mechanical, thermal and fluid dynamics simulations.

Special attention was given to the issue of contacts and contact behavior.

### **Keywords:**

- measurement transformers
- thermal stress tests
- contacts
- moisture development
- Simulation

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b>  | <b>2</b>  |
| 2.1      | Kontakte   | 2         |
| 2.1.1    | Einführung   | 3         |
| 2.1.2    | Der Kontaktwiderstand  | 3         |
| 2.1.3    | Kontakterwärmung und Kontaktschweißen                            | 6         |
| 2.1.4    | Kontaktwerkstoffe und deren Eigenschaften                        | 7         |
| 2.2      | Erwärmung und Wärmeübertragung bei Kombiwandlern                 | 11        |
| 2.2.1    | Thermodynamisches System   | 11        |
| 2.2.2    | Energie- und Leistungsbilanzgleichung                            | 13        |
| 2.2.3    | Wärmetransport   | 15        |
| 2.2.4    | Erwärmung von Wandlern   | 20        |
| 2.3      | Zersetzungsprozesse in Öl-Papier-Isolationssystemen              | 24        |
| 2.3.1    | Alterungs- und Zerfallsprozesse im Mineralöl                     | 24        |
| 2.3.2    | Feuchtigkeit im Papier und dessen Auswirkung                     | 27        |
| <b>3</b> | <b>Versuchsaufbau</b>  | <b>30</b> |
| 3.1      | Die Untersuchungsobjekte   | 30        |
| 3.2      | Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur | 32        |
| 3.2.1    | Prüfaufbau   | 33        |
| 3.2.2    | Prüfungsdurchführung   | 37        |
| 3.2.3    | Auswertung   | 39        |
| 3.3      | Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit    | 50        |
| 3.3.1    | Prüfungsdurchführung   | 51        |
| 3.3.2    | Auswertung   | 52        |
| 3.4      | Vergleichsuntersuchungen   | 64        |
| 3.4.1    | Prüfaufbau   | 64        |
| 3.4.2    | Prüfungsdurchführung   | 66        |
| 3.4.3    | Auswertung   | 68        |
| 3.5      | Untersuchung des Mineralöls                                      | 74        |
| 3.5.1    | Bestimmung der Ölfeuchtigkeit                                    | 75        |
| 3.5.2    | Bestimmung der Papierfeuchtigkeit                                | 76        |
| 3.5.3    | Bestimmung des Gasgehalts  | 80        |
| <b>4</b> | <b>Modellierung und Simulation</b>                               | <b>84</b> |
| 4.1      | Materialdaten  | 84        |
| 4.2      | Mechanische Simulation   | 87        |
| 4.2.1    | Das Modell   | 88        |
| 4.2.2    | Kontakte und Modellklassen                                       | 89        |
| 4.2.3    | Variation  | 90        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.2.4    | Ergebnisse   | 92         |
| 4.3      | Thermische Simulation  | 96         |
| 4.3.1    | Das Modell   | 97         |
| 4.3.2    | Elektrische Strömungsfeldsimulation                              | 97         |
| 4.3.3    | Variation der Simulationsparameter                               | 99         |
| 4.3.4    | Abgleich mit den Stützstellen                                    | 101        |
| 4.3.5    | Ergebnisse   | 102        |
| 4.4      | CFD – Simulation   | 106        |
| 4.4.1    | Das Modell   | 107        |
| 4.4.2    | Studie der Ölbewegung / Ergebnisse                               | 107        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>113</b> |
| 5.1      | Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur | 113        |
| 5.2      | Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit    | 113        |
| 5.3      | Vergleichsuntersuchungen   | 114        |
| 5.4      | Untersuchung des Mineralöls                                      | 114        |
| 5.5      | Modellierung und Simulation                                      | 115        |
| <b>6</b> | <b>Anhang</b>  | <b>117</b> |
| 6.1      | Literaturverzeichnis   | 118        |
| 6.2      | Bilderverzeichnis  | 121        |
| 6.3      | Diagrammverzeichnis  | 126        |
| 6.4      | Tabellenverzeichnis  | 128        |

# Abkürzungsverzeichnis

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| CAE:                            | Computer-Aided Engineering  |
| FEM:                            | Finite-Elemente-Methode bzw. Methode der finiten Elemente         |
| FVM:                            | Finite-Volumen-Methode bzw. Finite-Volumen-Verfahren              |
| kV:                             | Kilovolt  |
| A:                              | Ampere  |
| kVA:                            | Kilovoltampere  |
| Cu:                             | Kupfer  |
| Al:                             | Aluminium   |
| PRPD:                           | Phase Resolved Partial Discharge (phasenaufgelöste Teilentladung) |
| TE:                             | Teilentladung   |
| BV 1:                           | Belastungsversuch 1   |
| BV 2:                           | Belastungsversuch 2   |
| H <sub>2</sub> :                | Wasserstoff   |
| CO:                             | Kohlenmonoxid   |
| CO <sub>2</sub> :               | Kohlendioxid  |
| CH <sub>4</sub> :               | Methan  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : | Ethan   |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : | Ethen (Ethylen)   |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : | Ethin (Acetylen)  |

# Formelzeichen

| Formelzeichen                               | Physikalische Größe                           | Einheit                            |
|---|---|------------------------------------|
| <i>Geometrische Formelzeichen</i>           |   |                                    |
| A   | Querschnittsfläche                            | m <sup>2</sup>                     |
| D   | Durchmesser                                   | m                                  |
| h   | Höhe  | m                                  |
| l, s  | Länge   | m                                  |
| r   | Radius  | m                                  |
| <i>Allgemeinphysikalische Formelzeichen</i> |   |                                    |
| E   | Energie                                       | J                                  |
| F   | Kraft   | N                                  |
| P   | Leistung                                      | W                                  |
| W   | Arbeit  | J                                  |
| f   | Frequenz                                      | Hz                                 |
| m   | Masse   | kg                                 |
| $\rho$                                      | Dichte  | kg m <sup>-3</sup>                 |
| $\tau$                                      | Zeitkonstante                                 | s                                  |
| <i>Thermodynamische Formelzeichen</i>       |   |                                    |
| C   | Strahlungskoeffizient                         | W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>  |
| C <sub>s</sub>                              | Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers   | W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>  |
| c <sub>p</sub>                              | Spezifische Wärmekapazität (konstanter Druck) | Ws g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| C <sub>12</sub>                             | Strahlungsaustauschzahl                       | W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>  |
| Q   | Wärme   | J                                  |
| Q'  | Wärmestrom                                    | W                                  |

|  |  |                      |
|--|--|----------------------|
| $q'$                                   | Wärmestromdichte                                   | $W m^{-2}$           |
| $R_{th}$                               | Wärmewiderstand                                    | $K W^{-1}$           |
| $T$                                    | Absolute Temperatur                                | K                    |
| $\alpha$                               | Wärmeübergangskoeffizient                          | $W m^{-2} K^{-1}$    |
| $\alpha_T$                             | Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands | $K^{-1}$             |
| $\beta$                                | Wärmedehnungskoeffizient                           | $K^{-1}$             |
| $\varepsilon$                          | Emissionszahl                                      | -                    |
| $\vartheta$                            | Celsiustemperatur                                  | $^{\circ}C$          |
| $\Lambda, \lambda$                     | Wärmeleitfähigkeit                                 | $W m^{-1} K^{-1}$    |
| <hr/>                                  |  |                      |
| <i>Elektrotechnische Formelzeichen</i> |  |                      |
| <hr/>                                  |  |                      |
| $C$                                    | Elektrische Kapazität                              | F                    |
| $E$                                    | Elektrische Feldstärke                             | $V m^{-1}$           |
| $G$                                    | Elektrischer Leitwert                              | S                    |
| $I$                                    | Strom  | A                    |
| $P$                                    | Leistung   | W                    |
| $Q_{el}$                               | Elektrische Ladung                                 | As                   |
| $R$                                    | Elektrischer Widerstand                            | $\Omega$             |
| $U$                                    | Elektrische Spannung                               | V                    |
| $W_{el}$                               | Elektrische Arbeit                                 | J                    |
| $\kappa$                               | Elektrische Leitfähigkeit                          | $S m^{-1}$           |
| $\rho$                                 | Spezifischer elektrischer Widerstand               | $\Omega mm^2 m^{-1}$ |
| $\varphi$                              | Elektrisches Potential                             | V                    |
| <hr/>                                  |  |                      |
| <i>Konstanten</i>                      |  |                      |
| <hr/>                                  |  |                      |
| $k_B$                                  | Boltzmann-Konstante = $1,38064852 \cdot 10^{-23}$  | $J K^{-1}$           |
| $e$                                    | Elementarladung = $1,60217662 \cdot 10^{-19}$      | C                    |

# 1 Einleitung

Das Hoch- und Höchstspannungsnetz stellt das Rückgrat des Energieversorgungssystems dar. Um die Spannungen und Ströme in einem solchen zu überwachen werden Messwandler eingesetzt. Dabei ist von einigen Messwandlern bekannt, dass diese unter hoher thermischer Beanspruchung, zum Beispiel durch erhöhte Umgebungstemperatur, ein Fehlverhalten aufweisen können. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit dem Verhalten von kombinierten Messwandlern für die 220 kV-Spannungsebene unter thermischer Belastung.

Das Ziel der Arbeit war zu untersuchen, ob diese Betriebsmittel unter maximalen thermischen Parametern in Form der höchsten zulässigen Umgebungstemperatur und unter Führung des thermischen Bemessungsgrenzstroms die Grenzwerte für deren Betrieb einhalten oder ob es hier zu Verfehlungen in Folge der thermischen Belastungen kommt. Abzuklären war außerdem, ob dieser thermische Stress neben möglichen Grenzwertüberschreitungen auch zu anderem, womöglich schädigenden Verhalten und Vorgängen führt.

Für die Untersuchung wurden hierzu zwei Belastungsversuche, einmal unter erhöhter Umgebungstemperatur sowie einmal unter erhöhter Umgebungstemperatur und erhöhter Umgebungsluftfeuchte, durchgeführt. Zudem wurden Vergleichsmessungen in Form von Teilentladungs- und Verlustfaktormessungen mit einem zweiten, thermisch unbelasteten Wandler gleichen Typs gemacht. Begleitend wurden diese Versuche durch die Entnahme und Analysen von Mineralölproben.

Bei diesen Untersuchungen wurde besonders Augenmerk auf die Kontakte beziehungsweise die Kontaktwiderstände, den Zustand und die Entwicklung des Mineralöls und die Temperaturverteilung an der Hauptstrombahn gelegt.

Um die thermischen Eigenschaften und Phänomene besser untersuchen zu können wurden begleitend Simulationen durchgeführt die abklären sollten, ob der Prüfaufbau selbst Rückwirkungen auf den Prüfling hat, um die Verteilung der Temperaturen näher zu untersuchen und um die Bewegung des Öls näher betrachten zu können.

## 2 Grundlagen

Die thermische Untersuchung und Modellierung eines elektrischen Betriebsmittels, wie dem in dieser Arbeit untersuchten Kombiwandler, führt zwangsweise durch einige Disziplinen der Naturwissenschaften. Neben der Elektrotechnik, im Speziellen dem Themengebiet der Hochspannungstechnik, ist Wissen aus den Bereichen der Thermodynamik, der Wärmeübertragung, der Mechanik, der Fluidodynamik bzw. Strömungsmechanik und der Finiten Elemente Analyse, im weiteren Text mit FEA abgekürzt, notwendig. Diese Kenntnisse, wenngleich häufig nur auf Ebene eher fundamentaler Grundlagen und spezieller Fälle, mögen dem einen oder anderen Leser im Zuge seiner Fachausbildung kaum oder vielleicht gar nicht dargelegt worden sein. In diesem Kapitel werden darum diese Grundlagen, zumindest ansatzweise, behandelt, um ein grundlegendes Verständnis der durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse zu erleichtern und den sprichwörtlichen roten Faden durch die kommenden Seiten zu ziehen. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass auf Grund des Umfangs hier auf eine entsprechend breite Darlegung der Grundlagen verzichtet und auf die Fachliteratur im Anhang verwiesen wird. Dabei wird zu Beginn das Thema der Kontakte, deren Werkstoffe und Eigenschaften sowie der Einflussparameter auf eben diese behandelt, gefolgt von den für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Thermodynamik und Wärmeübertragung als auch den Erwärmungsvorgängen in Kombiwandlern im Speziellen. Abschließend folgt eine genauere Darlegung der Zersetzungsprozesse des Isolationssystems, genauer des Öl-Papier-Isolationssystem, welche in einem solchen System auftreten bzw. auftreten können. Auf eine Darlegung der Grundlagen zur mechanischen, thermischen als auch fluiddynamischen Simulation wird aufgrund des großen Umfangs, welchen diese Grundlagen umfassen, in dieser Arbeit absichtlich verzichtet. Es sei an dieser Stelle aber auf die verwendete Literatur [1], [2] und besonders [3] verwiesen, die für die hier vorliegende Arbeit hauptsächlich verwendet wurden.

### 2.1 Kontakte

Vorweg sei gesagt, dass sich dieser Abschnitt vorwiegend auf elektrische beziehungsweise, durch deren Verhältnis zueinander, gegeben durch das Wiedemann-Franz'sche Gesetz, thermische Kontakte bezieht. Unterkapitel 4.2.2 geht zudem separat auf das Thema der mechanischen Kontakte im Zuge derer Nachbildung in der Simulation ein. Tatsächlich spielen Kontakte eine nicht zu vernachlässigende Rolle, besonders durch das Phänomen des Kontaktwiderstands, beziehungsweise der Kontaktleitfähigkeit. Auf diese wird nun näher eingegangen. Als inhaltliche Referenz seien an dieser Stelle besonders [4], [5] und [6] genannt.



### 2.1.1 Einführung

Kontakten, also der Verbindung zweier gesonderter Körper, wird in den meisten Grundlagenbüchern und vielen Fachbüchern der Elektrotechnik nicht besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt, was umso verwunderlicher ist, wenn man überlegt, wie häufig diese anzutreffen sind. Bevor das Thema jedoch näher behandelt wird, ist es sinnvoll eine Eingrenzung der Bedeutung des Begriffs *Kontakt* vorzunehmen. In dieser Arbeit ist unter einem Kontakt immer die Verbindung zweier Feststoffe, um es zu präzisieren zweier Metalle, gemeint. Elektrischer und thermischer Kontakt gehen dabei oft Hand in Hand, da besonders bei Metallen, nicht nur der elektrische Strom, sondern auch der Großteil des Wärmestroms, in Folge von Wärmeleitung, von Elektronen getragen wird. Da es sich bei den Untersuchungsobjekten um elektrische Betriebsmittel handelt, soll hier der Schwerpunkt auch auf elektrischen Kontakten liegen. Damit ist eine hinreichende Definition gegeben, wobei eine weitere Unterteilung möglich wäre.

Dabei unterscheidet [4] die elektrischen Kontakte nach ihrer Funktion zum Beispiel folgendermaßen:

1. *Nicht lösbare Dauerkontakte, z.B. Quetsch- und Schweißverbindungen*
2. *Bei Montagearbeiten nur mit einem Werkzeug lösbare Kontakte, z.B. Schraubverbindungen*
3. *Nur im stromlosen Zustand, jedoch ohne Werkzeug zu betätigende Anschluss- oder Verbindungskontakte, z.B. Steck- und Klemmkontakte*
4. *Schaltkontakte, welche im Inneren eines Schaltgeräts bestimmte Verbindungen betriebsmäßig herstellen und wieder aufheben*
5. *Rollkontakte, in denen die Stromübertragung zwischen aufeinander abrollenden Kontaktstücken erfolgt, z.B. in kontaktgebenden Lagern oder Rollstromabnehmern*
6. *Gleitkontakte, in denen die Stromübertragung während einer Gleitbewegung erfolgt, z.B. in elektrischen Maschinen oder Stromabnehmern elektrischer Bahnen*

### 2.1.2 Der Kontaktwiderstand

Bei der Verbindung zweier leitfähiger Körper, zum Beispiel zwei Kupferschienen die verschraubt oder verpresst werden, resultiert ein Leiter, dessen Gesamtwiderstand höher ist, als wenn derselbe Leiter aus einem homogenen Stück Kupfer gefertigt wird. Diese Widerstandsdifferenz wird als Kontaktwiderstand bezeichnet. Dessen Ursache sind mikroskopische Unebenheiten, Verunreinigungen und/oder isolierende Beläge der Kontaktflächen. Diese Ursachen sind unvermeidbar und treten bei allen Kontakten auf, so dass sich nie ein vollflächiger Kontakt ergibt, sondern stattdessen sich stets nur einige punktförmige Kontaktstellen bilden, wie in Bild 2-1 zu sehen.

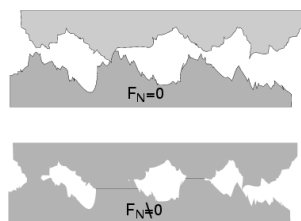


Bild 2-1 – Kontaktflächen mit und ohne Krafteinfluss. Quelle: [7]

Durch eine erhöhte Kraft in Normalrichtung nimmt die Anzahl der Kontaktstellen zu. Man nennt diese Kraft auch Kontaktkraft. [4] stellt hierfür folgende Beziehung zwischen Kontaktkraft  $F_k$ , der Härte  $H$  des Kontaktmaterials und Radius der verformten Fläche  $r_p$  her.

$$F_k = r_p^2 \cdot \pi \cdot H \quad \text{bzw.} \quad r_p = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \cdot H}} \quad (1)$$

Auf der Oberfläche bilden sich also verschiedene Teilflächen, wie Bild 2-2 darstellt, nämlich metallisch leitende ( $A_m$ ), quasimetallisch leitenden ( $A_{qm}$ ) und fremdschichtbehaftete, tragend isolierende Teilflächen ( $A_i$ ). Die Summe dieser Flächen wird zur mechanisch tragenden Fläche  $A_t$  zusammen gefasst.



Bild 2-2 – unterschiedliche Kontaktteilflächen. Quelle: [4], S 11

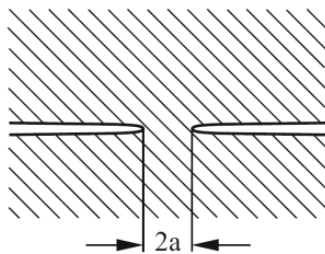
Die metallisch leitenden Flächen bilden die Zentren der Kontaktstellen und entsprechen dabei jenen Stellen, an welchen die Metalle direkt in Berührung stehen. Um diese herum befinden sich Teilflächen, welche Adsorptionsschichten, also monomolekulare Schichten an der Oberfläche, an denen sich Stoffe ansammeln, ausbilden. Solche Schichten entstehen selbst bei nicht oxidierenden Metallen z.B. durch Sauerstoffmoleküle, welche durch van-der-Waals-Kräfte an diesen haften und den Stromfluss eigentlich unterbinden müssten. Durch diese Schichten können Elektronen dennoch hindurchtreten, was in der Quantenmechanik als Tunneleffekt bekannt ist, worauf an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen wird. Hierfür wurde der Begriff des Tunnelwiderstands eingeführt. Dieser lässt sich nach [4] wie folgt berechnen

$$R_t = \frac{\sigma_t}{\pi \cdot a^2} \quad (2)$$

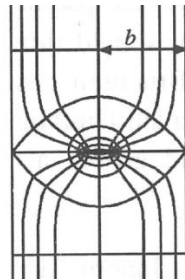
wobei  $\sigma_t$  der spezifische Tunnelwiderstand, welcher nur von der Austrittsarbeit des Metalls und der Molekülschichtdicke abhängig ist. Dieser ist für die technische Anwendung jedoch grundsätzlich vernachlässigbar.

Die restlichen Teilflächen bilden keinen leitenden Kontakt, sind also isoliert, und haben eine rein mechanisch tragende Rolle.

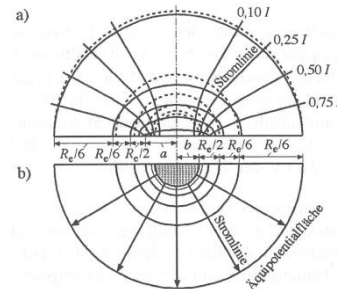
Betrachtet man nun eine einzelne Kontaktstelle, siehe Bild 2-3 und Bild 2-4, ist ersichtlich, dass sich ein dominanter Widerstand mit der Länge  $2a$  ausbildet.



**Bild 2-3 – Kontaktstelle**  
Quelle: [6], S 93



**Bild 2-4 – Stromfäden**  
Quelle: [4], S 11



**Bild 2-5 – Kugelmodell**  
Quelle: [4], S 11

Mit der Überführung in das vereinfachte Kugelmodell, wie es in Bild 2-5 dargestellt ist, kann dieser wie folgt berechnet werden.

$$R_E = \frac{\rho}{2a} \quad (3)$$

Dieser dominante Anteil des Widerstands wird als Engewiderstand bezeichnet. Der Leitwert einer solchen Stelle lässt sich aus dem Kehrwert des Engewiderstands bestimmen. Da über den Kontakt mehrere parallele Kontaktstellen wirken, können die Leitwerte summiert werden.

$$G_{ges} = \sum \frac{1}{R_{E,i}} = \frac{1}{\rho} \cdot \sum 2a_i = \frac{L_K}{\rho} \quad (4)$$

$L_K$  ist dabei die sogenannte Kontaktlänge, welche der Summe aller Durchmesser der Kontaktstellen entspricht. Für den Quotienten aus Kontaktlänge und Kontaktkraft erhält man laut [6] folgende Beziehung in guter Näherung

$$\frac{L_K}{F_k} \approx \frac{3,7}{E^* \cdot l} \quad (5)$$

Hierin ist  $l$  der quadratische Mittelwert der Höhenverteilung der Asperiten, sprich der Rauigkeitsspitzen des Materials. Für nähere Informationen sei hierzu aber auf [6] Kapitel 7-„Kontakt zwischen rauen Oberflächen“ verwiesen. Formt man Gleichung ( 5 ) nach  $L_K$  um, setzt dies in ( 4 ) ein und bildet anschließend noch den Kehrwert, erhält man folgende Näherung für den Kontaktwiderstand.

$$R \approx \frac{E^* \cdot l \cdot \rho}{3,7 \cdot F_k} \quad (6)$$

Aus ( 6 ) ist ersichtlich, dass der Kontaktwiderstand mit steigendem Elastizitätsmodul zunimmt, was darin begründet ist, dass das Material sich mit größer werdendem Elastizitätsmodul zunehmend schwerer verformen lässt. Der Widerstand nimmt ebenfalls mit dem Mittelwert der Höhenverteilung der Spitzen, sowie mit steigendem spezifischem Widerstand des Materials zu. Die scheinbare Kontaktfläche spielt keine Rolle. Die Erhöhung der Kontaktkraft führt hingegen zu einer Verringerung des Kontaktwiderstands. Dies ist solange möglich, einstweilen die Kontaktlänge nicht die Größenordnung des Durchmessers  $D$  der in Kontakt stehenden Körper erreicht. In diesem Punkt wird dann die Leitfähigkeitssättigung erreicht und eine weitere Reduktion des Kontaktwiderstands ist nicht mehr möglich. Diese Grenzkraft lässt sich mit Hilfe von Formel ( 7 ) abschätzen zu

$$F_{k,grenz} \approx \frac{D \cdot E^* \cdot l}{3,7} \quad (7)$$

Für den thermischen Widerstand kann die Theorie des elektrischen Widerstands übernommen werden mit der Analogie das der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstands, also der spezifische elektrische Leitwert mit dem Wärmeleitwert ersetzt wird. Für die Wärmeleitfähigkeit eines Kontaktes ergibt sich somit folgender Zusammenhang

$$\Lambda \approx \frac{3,7 \cdot \lambda}{E^* \cdot l} \cdot F_k \quad (8)$$

### 2.1.3 Kontakterwärmung und Kontaktschweißen

Da in dieser Arbeit vor allem der thermische Aspekt von Bedeutung ist, soll an dieser Stelle kurz auch auf die Wärmemechanismen in Kontaktstellen eingegangen werden.

#### **B-Fritung**

Durch die engen Kontaktstellen kommt es in diesen zu einer Erhöhung der Stromdichte. Mit zunehmender Temperatur nimmt nun nicht nur der Widerstand des Leiters zu, sondern auch der Engewiderstand. Dies führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Kontaktstelle was, bei Erreichen der sogenannten Entfestigungstemperatur des Kontaktmaterials, zur Erweichung des Kontaktmaterials führen kann. In diesem Fall kommt es zur lokalen Aufschmelzung der Kontaktoberfläche, was zu einer Reduktion des E-Moduls führt, wodurch bei konstanter Kontaktkraft, wie aus ( 6 ) folgt, der Widerstand wieder sinkt. In diesem Fall steigt die Temperatur nicht weiter an und die Kontaktstelle kann sich wieder verfestigen, womit sich auch wieder ein konstanter kleinerer Engewiderstand einstellt. Dieser Vorgang wird als B-Fritten bezeichnet.

## Heißkontaktbildung

Metalle wie Kupfer oder besonders Aluminium bilden an Luft sogenannte passivierende Oxidschichten an deren Oberfläche. Dieser Effekt ist im Allgemeinen z.B. bei Aluminium erwünscht, da er die Korrosionsbeständigkeit des Metalls erhöht. Genau diese Hautschichten, die als Diffusionssperre agieren, stellen für Kontakte aber ein nicht unerhebliches Problem dar, da diese Schichten von Elektronen nicht passiert werden können. Die Reaktionsgeschwindigkeit steigt dabei exponentiell mit der Temperatur, weshalb die Kontaktstücktemperaturen laut [4] in den Vorschriften mit 100°C begrenzt werden. Damit solche Schichten überhaupt leitfähig werden, muss das Material makroskopisch über die Fließgrenze hinaus beansprucht werden, wodurch sich Risse in den Oxidschichten bilden und leitende Metallverbindungen, sogenannte Kontaktengen, entstehen können. Bei schaltenden Kontakten werden diese Schichten für gewöhnlich durch mechanische Tangentialkräfte beim Schaltvorgang zerstört. Bei permanent geschlossenen Kontakten, erfolgt ein Luftabschluss der Berührungsflächen und Oxidation kann nur am Rand eintreten. In ungünstigen Fällen kann es dazu kommen, dass die Kontaktenge zunehmend kleiner wird, wodurch auch der Engewiderstand, siehe Kapitel 6, größer wird, was zu einer erhöhten Kontakttemperatur führt, was wiederum die Ausbildung der Hautschichten stark begünstigt. Dem wirkt zwar der Vorgang des B-Frittens teilweise entgegen, jedoch kann die Temperatur nach der Verfestigung erneut ansteigen, zum Beispiel durch einen erhöhten Strom. Was den Vorgang stark begünstigt ist eine Stromunterbrechung. Dadurch kühlt das heiße Metall ab, zieht sich dabei zusammen und ermöglicht so ein Eindringen von Luft in die Kontaktstelle, was die Hautschichtbildung zusätzlich fördert. Dieser Prozess kann soweit führen, dass der Kontakt thermisch überlastet wird und schmilzt oder seine Leitfähigkeit verliert. Diese thermischen Vorgänge führen zu zusätzlichen Wärmeströmen in die Kontaktstücke und weitere Komponenten des elektrischen Stromkreises.

### 2.1.4 Kontaktwerkstoffe und deren Eigenschaften

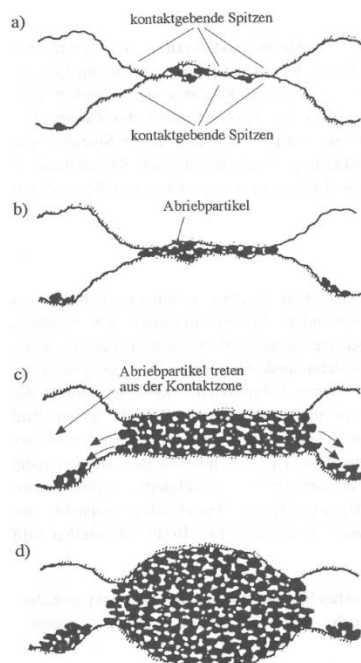
Da beim untersuchten Prüfling ausschließlich Kupfer und Aluminiumteile in Kontakt treten, beschränkt sich die Betrachtung hier ebenfalls auf Kupfer, Aluminium und Kupfer-Aluminiumkontakte. Folgende Tabelle zeigt eingangs die hierfür wichtigsten Eigenschaften der Werkstoffe.

Tabelle 2-1 - Materialeigenschaften von Aluminium und Kupfer

| Material | $\rho$                                 | $\lambda$                            | $\alpha_T$                          | $\gamma$                               | Härte                              | Entfestigungs-<br>temperatur | Schmelz-<br>temperatur | $c_p$  |
|----------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|          | $\times 10^{-8}$<br>$\Omega \text{ m}$ | $\text{W m}^{-1}$<br>$\text{K}^{-1}$ | $\times 10^{-3}$<br>$\text{K}^{-1}$ | $\times 10^{-3}$<br>$\text{kg m}^{-3}$ | $\times 10^8$<br>$\text{N m}^{-2}$ | $^{\circ}\text{C}$           | $^{\circ}\text{C}$     | $\times 10^{-3}$<br>$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ |
| Cu       | 1,65                                   | 394                                  | 4,3                                 | 8,95                                   | 4...9                              | 190                          | 1083                   | 0,385  |
| Al       | 2,65                                   | 222                                  | 4,6                                 | 2,7                                    | 1,8...4                            | 150                          | 660                    | 0,896  |

### **Reibkorrosion oder Fretting**

Das thermische Ausdehnen und Zusammenziehen von Metallen führt, besonders bei Kontaktwerkstücken unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten, wie z.B. Aluminium und Kupfer, zu einer Erhöhung des Kontaktwiderstandes, da es zu einer Erosion der Oberflächen kommt. Bild 2-6 zeigt einen solchen Vorgang.



**Bild 2-6 – Reibkorrosionsvorgang. Quelle: [4],S 20**

Durch die unterschiedliche Ausdehnung der Materialien entsteht an der Oberfläche eine Tangentialkomponente, welche die Kontaktspitzen sozusagen abschleift, Bild 2-6 a. Dadurch entstehen Abriebpartikel, die eine weitere Degradierung der Kontaktstelle vorantreiben, Bild 2-6 b. Ab einer bestimmten Partikelschichtdicke nimmt der Verschleiß wieder ab, Bild 2-6 c, bis Partikel am Rand aus der Kontaktzone austreten und somit eine erhöhte Kraftwirkung in der Mitte der Kontaktstelle entsteht, Bild 2-6 d.

Laut [8] können als Ursachen für die Verschlechterung des Kontaktwiderstandes auf Grund von Alterungserscheinungen folgende Punkte genannt werden:

- a. Kraftabbau
- b. Fremdschichtbildung
- c. Elektromigration
- d. Reibkorrosion
- e. Interdiffusion

Die Punkte b und d wurden bereits behandelt. Nimmt die Kontaktkraft mit der Zeit, zum Beispiel durch häufiges Ausdehnen und Zusammenziehen der Kontaktmaterialien, ab, reduziert sich, siehe( 6 ), folglich auch die Leitfähigkeit der Kontaktstelle, der Widerstand nimmt zu. Man spricht vom Kraftabbau. Die Elektromigration spielt bei Wechselstrom eine untergeordnete Rolle und soll darum hier nicht weiter behandelt werden. Bei Verbindungen unterschiedlicher Metalle, kommt es zu einem Diffusionsvorgang, bei dem Atome aus dem einen Metall in das andere diffundieren und umgekehrt. Dies wird als Interdiffusion bezeichnet.

### **Kupfer**

In der Energietechnik spielt bei der Auswahl des stromtragenden Leitermaterials in erster Linie dessen Leitfähigkeit beziehungsweise dessen spezifischer Widerstand eine Rolle, da die Verluste mit diesem in linearem Verhältnis stehen. Das so gesehen beste Leitermaterial wäre Silber, welches zudem nicht oxidiert und den geringsten Kontaktwiderstand bildet. Kupfer bietet aber die fast selbe Leitfähigkeit wie Silber, liegt aber mit einem Tonnenpreis von rund 4300 Euro, (Stand 03.04.2016) bei unter einem Hundertstel des Silberpreises.

[4] schreibt zum Kontaktwerkstoff Kupfer folgendes:

*„Kupfer ist das billigste Kontaktmaterial fast gleicher Leitfähigkeit und Härte wie Silber, bildet aber ständig weiterwachsende Oxidschichten, die sich bei hohen Temperaturen nicht zersetzen, sondern exponentiell mit der Temperatur ( $\sim e^T$ ) wachsen (Heißkontaktbildung). Cu erfordert selbstreinigende Kontaktbewegung. Temperaturbegrenzung 100°C“*

### **Aluminium**

In den letzten Jahren findet das Metall Aluminium zunehmend Einzug in die Energietechnik. Zwar hat es einen Rund 60 Prozent höheren spezifischen Widerstand als Kupfer, wiegt dafür aber auch nur ein Drittel, weshalb es seit Jahren das Leitermaterial für Freileitungen ist. Zudem führt der zunehmende Preis von Kupfer und der immer größer werdende Wettbewerbsdruck in der Energietechnik dazu, dass Aluminium auch in anderen Bereichen der Branche, wie zum Beispiel den Leistungstransformatoren, für die Hersteller immer attraktiver wird. Jedoch ist das Metall nicht unproblematisch in seiner Verwendung.

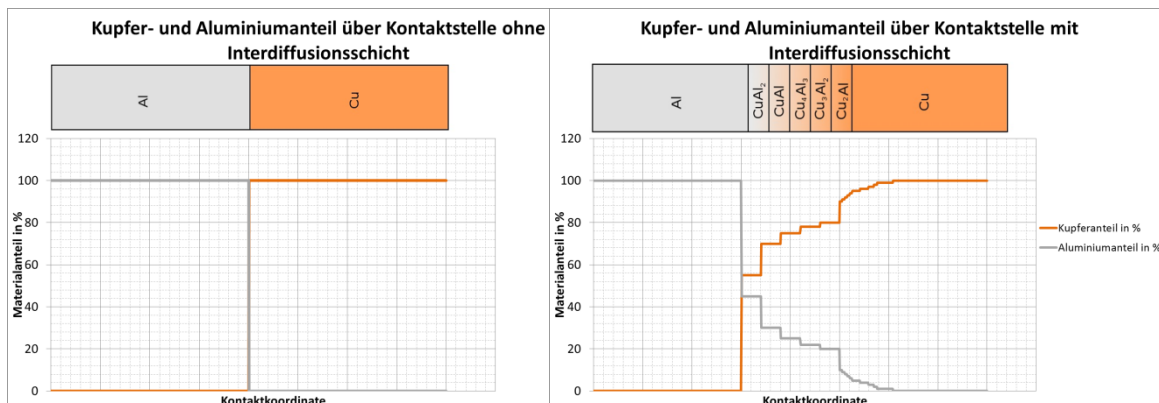
In [4] schreibt Prof. Dr. Rieder hierzu folgendes:

*„Aluminium ist trotz seiner hohen Leitfähigkeit wegen des hochtemperaturbeständigen Oxids, der geringen Härte (Fließens) und des tiefen*

*Schmelzpunktes als Kontaktmaterial ungeeignet. Al-Dauerkontakte (Versraubungen) sind problematisch.“*

**Kupfer-Aluminium**

Wie bereits erläutert treten bei der Verbindung unterschiedlicher Metalle sogenannte Interdiffusionsvorgänge auf. Dies bedeutet, dass sich zwischen den beiden Metallen sogenannte intermetallische Phasen bilden, was in Bild 2-7 illustriert ist.



**Bild 2-7 – Intermetallische Phasen bei Al-Cu-Verbindungen in Anlehnung an [8]**

Diese bilden sich mit zunehmender Zeit und Temperatur aus. Dabei weisen diese Schichten wesentlich veränderte Eigenschaften, vor allem bezüglich des Widerstandes, gegenüber den reinen Kontaktwerkstoffen auf. Ein Auszug dieser Eigenschaften ist in folgender Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 2-2 - Eigenschaften der intermetallischen Phasen**

| Phase       | Kupfer      | Aluminium   | Chemische Zusammensetzung | Spezifischer Widerstand   | Härte        |
|-------------|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
|             | in Gew. - % | in Gew. - % |                           | $\times 10^{-8} \Omega m$ | $kg mm^{-1}$ |
| Cu          | 100         | 0           | Cu                        | 1,75                      | 42           |
| $\chi_2$    | 80          | 20          | $Cu_2Al$                  | 14,2                      | 35           |
| $\delta$    | 78          | 22          | $Cu_3Al_2$                | 13,4                      | 180          |
| $\zeta_2$   | 75          | 25          | $Cu_4Al_3$                | 12,2                      | 624          |
| $\eta_2$    | 70          | 30          | $CuAl$                    | 11,4                      | 648          |
| $\vartheta$ | 55          | 45          | $CuAl_2$                  | 8                         | 413          |
| Al          | 0           | 100         | Al                        | 2,9                       | 38           |

Dabei sei erwähnt, dass sich nicht alle dieser intermetallischen Schichten ausbilden müssen. Welche sich ausbilden und wie stark hängt unter anderem von der Temperatur, der Zeit und



der Atommenge ab, sowie vom Interdiffusionskoeffizienten der jeweiligen Schicht.

Die Auswirkungen der Interdiffusion kommen bereits bei etwa 140°C verstärkt zum Tragen. In [8] wurde hierzu ein Test über ein Jahr mit Cu/Cu-, Al/Al- und Al/Cu-Schienen durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass der Kontaktwiderstand bei gleichen Metallverbindungen über ein Jahr hinweg konstant blieb, während er bei der Aluminium-Kupfer-Verbindung auf den fünffachen Wert anstieg.

## **2.2 Erwärmung und Wärmeübertragung bei Kombiwandlern**

Da diese Arbeit sich im Speziellen dem thermischen Verhalten eines elektrischen Betriebsmittels widmet, werden an dieser Stelle die nötigen Grundlagen der Thermodynamik und der allgemeinen Wärmelehre vorgestellt. Da eine detaillierte Behandlung eben dieser jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde, sei an jener Stelle auf die Fachlektüre [9] und [10] sowie auf das Skriptum zu [11] verwiesen, welche hier als inhaltliche Referenz verwendet werden.

### **2.2.1 Thermodynamisches System**

Als thermodynamisches System versteht man im Allgemeinen jenen Bereich im Raum, auf den sich die eigentliche Untersuchung bezieht. Dabei wird quasi eine gedachte Begrenzungslinie, die Systemgrenze, gezogen, welche dann das System von seiner Umgebung trennt. Dabei unterscheidet man die Systeme entsprechend den Eigenschaften ihrer Systemgrenzen, siehe z.B. [9], vor allem in Bezug auf den Materie- und Energietransport über die Systemgrenze hinweg. Die Art des Systems hat, verständlicher Weise, eine direkte Auswirkung auf die Gleichungen, unter anderem den ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, welche das System in weiterer Folge beschreiben. Es können folgende Systeme unterschieden werden.

#### ***Geschlossenes System***

Ist die Systemgrenze zwar für Materie undurchlässig jedoch nicht für Energie z.B. in Form von Arbeit oder Wärme, spricht man von einem sogenannten geschlossenen System. Das Lehrbuchbeispiel hierfür stellt häufig ein gasgefüllter Zylinder dar. Durch den Kolben kann Arbeit in das System übertragen werden, durch die Oberfläche kann ein Wärmestrom fließen und somit Wärme mit dem System austauschen, jedoch bleibt die Gasmenge im Inneren des Zylinders und damit innerhalb der Systemgrenze, immer konstant. Bild 2-8 zeigt das Schema eines solchen geschlossenen Systems.

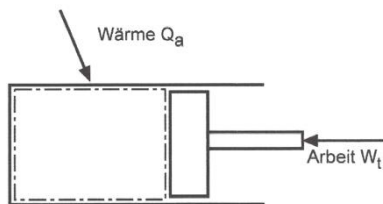


Bild 2-8 – Geschlossenes System. Quelle: [11],S 5

### Offenes System

Ist die Systemgrenze ebenfalls für Materie durchlässig, handelt es sich um ein offenes System. Ein anschauliches Beispiel hierfür stellt ein klassischer Wärmeübertrager, wie er in Bild 2-9 dargestellt ist, oder eine Dampfturbine eines Kraftwerks, siehe Bild 2-10, dar. In beiden Systemen findet ein Materieaustausch über die Systemgrenzen hinweg statt. Beim Wärmeübertrager in Form zweier zu- und abfließender Fluide, z.B. Wasser, zwischen denen ein Wärmeaustausch erfolgt.

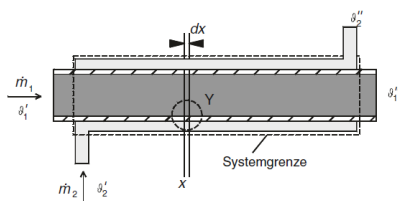


Bild 2-9 – Offenes System, Wärmeübertrager. Quelle: [10],S 6

Bei der Dampfturbine in Form von zuströmendem, heißem Dampf unter hohem Druck, welchen dieser unter Abgabe von Arbeit an die Turbine abbaut, und abströmendem Dampf niederen Drucks.

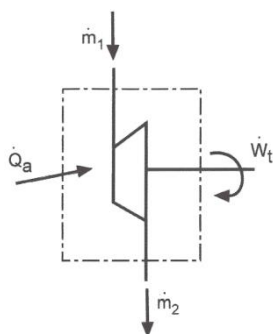


Bild 2-10 – Offenes System, Dampfturbine. Quelle: [11],S 6

Geschlossenes und offenes System haben beide gemein, dass ein Energieaustausch über die Systemgrenzen hin erfolgen kann. Ändert sich auch die Fähigkeit der Energieübertragung über die Systemgrenzen hinweg, ergeben sich noch zwei weitere Systeme.

### **Adiabates System**

Ein adiabates System ist dadurch gekennzeichnet, dass keinerlei Wärmeaustausch zwischen System und Umgebung erfolgt. Dabei können adiabate Systeme geschlossen (z.B. ein isolierter Zylinder), oder offen (z.B. Dampfturbine) sein.

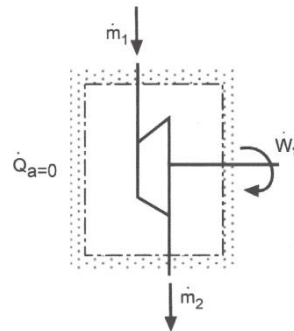


Bild 2-11 – isolierte Dampfturbine. Quelle: [11],S 6

### **Abgeschlossenes System**

Findet über die Systemgrenzen überhaupt keine Wechselwirkung mit der Umgebung statt spricht man von einem abgeschlossenen System. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist z.B. eine Thermosflasche.

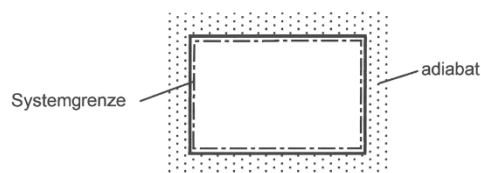


Bild 2-12 – abgeschlossenes System. Quelle: [11],S 5

Zusätzlich sei erwähnt, dass auch noch andere Systemunterscheidungen wie beispielsweise homogenes oder heterogenes System, welche die Zusammensetzung innerhalb des Systems als Kriterium hernehmen, unterschieden werden können, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird.

## **2.2.2 Energie- und Leistungsbilanzgleichung**

Um die Systemvorgänge in einem thermodynamischen System beschreiben zu können, bedarf es entsprechender Gleichungen. Da die Thermodynamik keine reine Wärmelehre darstellt, sondern vielmehr eine Art der Energielehre, ist es zweckmäßig, die Beschreibung solcher Systeme durch deren Energie durchzuführen. Hierfür stellt die Thermodynamik die allgemein bekannten Hauptsätze der Thermodynamik zur Verfügung. In [9] wird der 1. Hauptsatz der Thermodynamik durch folgende drei Postulate ausgedrückt:

1. *Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße<sup>1</sup> Energie E. Kinetische und potenzielle Energie eines Systems sind Teile dieser Systemenergie E.*
2. *Die Energie eines Systems kann sich nur durch Energietransport über die Systemgrenzen ändern: Für Energie gilt ein Erhaltungssatz.*
3. *Formen des Energietransports über die Systemgrenzen sind*
  - i. *das Verrichten von Arbeit*
  - ii. *der Übergang von Wärme*
  - iii. *der Transport von Materie*

Aus dem 1. Hauptsatz geht hervor, dass eine Energieänderung nur durch einen Energietransport in Form von Arbeit, Wärme oder Materie erfolgen kann. Bei einem, wie in Kapitel 2.2.1, erläuterten abgeschlossenen System folgt also, dass die Energie im System konstant bleiben muss. Bei einem geschlossenen System hingegen, ist ein Energietransport in Form von Arbeit und Wärme möglich.

Da es sich bei den Untersuchungsobjekten ebenfalls um geschlossene Systeme handelt, sollen die weiteren Betrachtungen auch nur für eben solche erfolgen.

Betrachten wir also zwei unterschiedliche Systemzustände, zwischen denen sich die Energie des Systems ändert, können wir die Energiebilanzgleichung wie folgt schreiben:

$$Q_{12} + W_{12} = E_2 - E_1 \quad (9)$$

Dabei ist  $Q_{12}$  die Wärme und  $W_{12}$  die Arbeit die beim Übergang der beiden Systemzustände, welcher in der Thermodynamik allgemein als Prozess bezeichnet wird, über die Systemgrenzen tritt, sowie  $E_1$  und  $E_2$ , welche die Energie der beiden Systemzustände wiedergeben. Betrachtet man den Übergang, also das Zeitintervall, in welchem sich das System ändert, erhält man folgende Energiebilanzgleichung:

$$\Delta Q + \Delta W = E(t + \Delta t) - E(t) \quad (10)$$

Durch die Division mit  $\Delta t$  und anschließender Anwendung des Limes, erhält man aus Gleichung (10) die Leistungsbilanzgleichung:

$$Q'(t) + P(t) = \frac{dE}{dt} \quad (11)$$

Diese Gleichung gilt allgemein für geschlossene Systeme, zu welchen auch der Kombiwandler, bedingt durch seinen wartungsfreien Aufbau, gezählt werden kann.

---

<sup>1</sup> Extensive Zustandsgrößen sind Größen die von der Größe des Systems abhängig sind, wie z.B. das Volumen

### 2.2.3 Wärmetransport

Gleichung ( 28 ) im vorhergehenden Kapitel besagt, dass die Energieänderung eines geschlossenen Systems durch die elektrische Verlustleistung im System und den Wärmestrom über die Systemgrenzen hinweg bestimmt wird. An dieser Stelle wird nun auf Zweiteren eingegangen.

[10] schreibt zur Wärmeübertragung folgendes:

*„Wärmeübertragung ist der Transfer von der Energieform Wärme auf Grund einer Temperaturdifferenz.“*

An dieser Stelle sei zudem der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der das Prinzip der Irreversibilität behandelt, erwähnt. Auch für dessen Kernaussage, nämlich, dass alle Prozesse in der Natur irreversibel sind, da in allen realen Prozessen Reibung auftritt, gibt es unterschiedliche Aussagen verschiedener großer Wissenschaftler. Für den hier behandelten, thermischen Schwerpunkt sei der Grundsatz, von dem R. Clausius in [12] ausging, angeführt:

*„Es kann nie Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen, wenn nicht gleichzeitig eine andere damit zusammenhängende Änderung eintritt.“*

Es gibt zwei Arten der Wärmeübertragung, siehe [13] und [10], wobei hier inhaltlich auf [10] Bezug genommen wird.

**Tabelle 2-3 – Vergleich der Größen aus Elektrotechnik und Wärmelehre**

| Wärmelehre          |   | Elektrotechnik                   |                                     |
|---------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| Bezeichnung         | Formel  | Bezeichnung                      | Formel                              |
| Temperaturgefälle   | $\frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{l}$ | Elektrisches Feld                | $E = \frac{U_1 - U_2}{l}$           |
| Temperaturdifferenz | $T_1 - T_2 = \vartheta_1 - \vartheta_2$                     | Spannung bzw. Potentialdifferenz | $U_1 - U_2 = \varphi_1 - \varphi_2$ |
| Wärmestrom          | $Q' = \frac{dQ}{dt}$  | Elektrischer Strom               | $I = \frac{dQ_{el}}{dt}$            |
| Wärmewiderstand     | $R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$                        | Elektrischer Widerstand          | $R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$      |

#### Wärmeleitung

Besteht in einem Stoff eine Temperaturdifferenz, fließt, entsprechend einem Diffusionsvorgang, ein Wärmestrom vom Ort höherer zum Ort niedrigerer Temperatur. Der Wärmeleitungsmechanismus ist dabei vom Material, in dem der Temperaturgradient

vorherrscht, abhängig. Man unterscheidet Wärmeleitung durch Gitterschwingungen, Elektronen oder andere Teilchenstöße. In dielektrischen Feststoffen dominiert dabei die Gitterschwingung, da nur wenige freie Elektronen vorhanden sind. In Metallen hingegen überwiegt die Wärmeleitung durch Elektronen, was im Wiedemann-Franz'schen Gesetz

$$\frac{\lambda}{\kappa} = L_Z \cdot T \quad (12)$$

zum Ausdruck kommt, wobei  $L_Z$  die Lorenz-Zahl, oder auch Lorentz-Konstante gegeben ist durch

$$L_Z = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 = 2,44 \cdot 10^{-8} \left[\frac{V}{K}\right]^2 \quad (13)$$

wobei  $e$  die Elementarladung und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist. Dem folgt also, dass elektrisch besser leitende Metalle auch über eine bessere thermische Leitfähigkeit verfügen.

In Fluiden wird die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls durch Stöße der Atome bestimmt, sofern diese ruhend sind, jedoch treten in Fluiden für gewöhnlich Dichte- bzw. Druckunterschiede auf, welche zu Strömungen führen, man spricht dann von strömenden Stoffen, womit die Konvektion dominant wird.

Bei der Konvektion handelt es sich, wie in Bild 2-13 ersichtlich, um einen Spezialfall der Wärmeleitung, nämlich wenn ein Wärmeübergang von einem festen, ruhenden Stoff auf ein strömendes Fluid vorliegt. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist etwa eine Gebäudeaußenwand mit Übergang auf die Umgebungsluftschicht. In diesem Fall wird die Wärmeleitung von der Temperaturgrenzschicht, die sich zwischen Feststoff und Fluid bilden, bestimmt, welche jedoch strömungsabhängig ist.

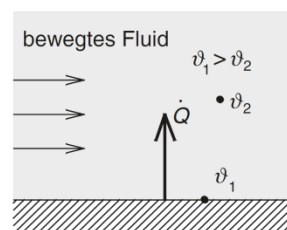


Bild 2-13 – Konvektion. Quelle: [10],S 4

Aufgrund der Strömungsabhängigkeit werden zwei Arten der Konvektion unterschieden:

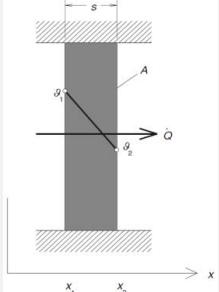
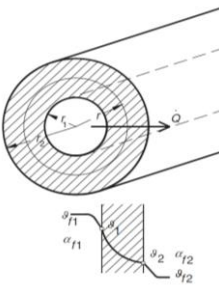
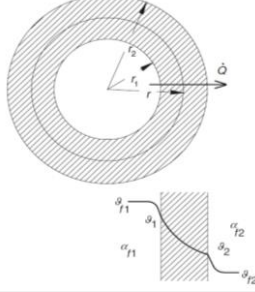
1. Freie Konvektion: Die Strömung des Fluid entsteht durch den Temperaturunterschied und den damit einhergehenden Druckunterschied im Fluid. Die Temperatur bzw. vielmehr der Temperaturunterschied ist also die Ursache für die Strömung.

2. Erzwungene Konvektion: Die Strömung des Fluid wird durch einen äußeren Druckunterschied verursacht. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Luftgebläsen, Ventilatoren oder Umwälzpumpen, die das Fluid in Bewegung setzen.

Eine Ausnahme von den oben erwähnten Wärmeleitungsmechanismen stellen sogenannte Suprafluide dar in denen der Effekt des zweiten Schalls für die Wärmeleitung verantwortlich ist, auf die aber nicht weiter eingegangen wird.

Die Wärmeleitung wird neben dem Temperaturunterschied und der Wärmeleitfähigkeit des Mediums durch die Geometrie bestimmt. Für einfache Geometrien zeigt Tabelle 2-4 die Bestimmung des Wärmestroms.

**Tabelle 2-4 – Wärmestrombestimmung einfacher Geometrien**

| Formel  | Fall   |
|---|--|
| $Q' = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$ <p style="text-align: center;">( 14 )</p> |  <p style="text-align: center;"><b>Bild 2-14 – Wärmeleitung ebene Wand. Quelle: [10],S 19</b></p> |
| $Q' = \lambda \cdot \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$ <p style="text-align: center;">( 15 )</p>                 |  <p style="text-align: center;"><b>Bild 2-15 – Wärmeleitung Zylinder. Quelle: [10],S 27</b></p>  |
| $Q' = \frac{\lambda \cdot 4 \cdot \pi}{1/r_1 - 1/r_2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$ <p style="text-align: center;">( 16 )</p>                              |  <p style="text-align: center;"><b>Bild 2-16 – Wärmeleitung Hohlkugel. Quelle: [10],S 36</b></p> |

## Wärmestrahlung

Wärme in Form von Strahlung, also elektromagnetischen Wellen, wird von Oberflächen aller Festkörper, deren Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt liegen, aber auch von Fluiden und Gasen abgegeben, sofern deren Moleküle mehr als zwei Atome aufweisen, siehe Bild 2-17. Im Gegensatz zur Wärmeleitung benötigt die Strahlung hierfür kein Trägermedium und kann daher auch im Vakuum erfolgen. Da es sich jedoch um Wellen handelt, die gebrochen, reflektiert und absorbiert werden können, bestimmen die Eigenschaften der Oberflächen den Prozess sehr stark. Es gilt

$$\alpha_W + \rho_W + \tau_W = 1 \quad (17)$$

wobei  $\alpha_W$  der Absorptions- oder Schluckgrad,  $\rho_W$  der Reflexionsgrad und  $\tau_W$  der Transmissionsgrad der Oberfläche ist<sup>2</sup>.

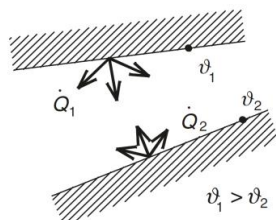


Bild 2-17 – Wärmestrahlung. Quelle: [10], S 4

In [10] werden die Eigenschaften, wie in folgender Tabelle, unterschieden bzw. eingeteilt.

Tabelle 2-5 - Oberflächeneigenschaften bei Wärmestrahlung

| Bezeichnung | Eigenschaften  |
|-------------|--|
| Schwarz     | Alle auftreffenden Strahlen werden absorbiert ( $\alpha_W = \epsilon = 1$ )  |
| Weiß        | Alle Strahlen werden reflektiert ( $\rho_W=1$ )  |
| Grau        | Alle auftreffenden Strahlen werden im gesamten Wellenlängenbereich zum gleichen Anteil absorbiert ( $\epsilon < 1$ ) |
| Farbig      | Von den auftreffenden Strahlen werden bestimmte Wellenlängen, die der entsprechenden Farbe, bevorzugt reflektiert    |
| Spiegelnd   | Die auftreffenden Strahlen werden, bezogen auf die Flächennormale, unter dem gleichen Winkel reflektiert             |
| Matt        | Auftreffende Strahlen werden diffus in alle Richtungen gestreut  |

<sup>2</sup> Diese Größen werden normalerweise ohne tiefgestelltes W angeschrieben. Da in dieser Arbeit  $\alpha$ ,  $\rho$  und  $\tau$  bereits andere Größen beschreiben, soll das tiefgestellte W hier auf die Welleneigenschaft hinweisen um Verwechslungen zu vermeiden.



Die Wärmestromdichte der durch Strahlung abgegebenen Wärme eines nicht schwarzen Körpers berechnet sich entsprechend Formel ( 18 ) zu

$$q' = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (18)$$

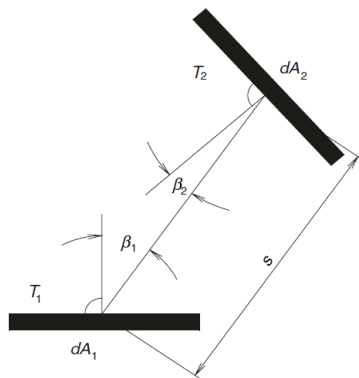
wobei  $C_s$  die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers ist, die laut [10] folgenden Wert hat:

$$C_s = (5,6696 \pm 0,0075) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \\ \approx 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad (19)$$

Bei den meisten technischen Anwendungen liegen mehrere Flächen vor. Das bedeutet folglich, dass diese in Wechselwirkung zueinander stehen, da jede Oberfläche Strahlung absorbiert, transmittiert und reflektiert. Der Wärmestrom, welcher zwischen diesen Flächen ausgetauscht wird, bestimmt sich folgendermaßen

$$Q'_{12} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_s \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \\ \cdot \iint \frac{\cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)}{\pi \cdot s^2} dA_1 dA_2 \quad (20)$$

Anschaulich zeigt dies folgende Abbildung.



**Bild 2-18 – Wärmestrom zwischen zwei Oberflächen. Quelle: [10],S 210**

Für simple Anordnungen, bei denen der Abstand gering im Verhältnis zu den Oberflächen ist, vereinfacht sich Formel ( 20 ) zu

$$Q'_{12} = C_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (21)$$

wobei  $C_{12}$  die sogenannte Strahlungsaustauschzahl darstellt, die von der Anordnung der Flächen und deren Emissionszahlen abhängig ist.

## Erwärmung eines Körpers

Die Erwärmung eines Körpers hängt von dessen zugeführter und abgeführter Wärmemenge, sowie dessen Masse und spezifischer Wärmekapazität ab und steht in folgender Beziehung.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{c_p \cdot m} \quad (22)$$

Die maximale Temperatur, welche ein Körper annehmen kann, entspricht dem Quotienten der vom Körper absorbierten Wärme  $Q_\vartheta$  und dessen Wärmeabgabevermögen  $A_\vartheta$ . Der Erwärmungsvorgang wird dabei durch die allgemein bekannte Temperaturgleichung

$$\vartheta = \frac{Q_\vartheta}{A_\vartheta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_\vartheta}}\right) \quad (23)$$

beschrieben, wobei  $\tau_\vartheta$  die thermische Zeitkonstante darstellt.

### 2.2.4 Erwärmung von Wandlern

Eingangs muss bei Messwandlern unterschieden werden, ob ein Strom-, ein Spannungs- oder ein Kombiwandler betrachtet wird. Spannungswandler werden im Normalbetrieb quasi konstant mit Nennspannung betrieben, was zu einer eher konstanten Erwärmung führt, während Stromwandler durch die über den Tag auftretenden Lastschwankungen unregelmäßigere Belastungen erfahren und deren Temperatur diesen Schwankungen zeitlich versetzt folgt. Kombiwandler hingegen werden sowohl mit quasi konstanter Spannung als auch mit über den Tag variablen Ströme beaufschlagt und haben ein überlagertes Erwärmungsverhalten.

Bei Transformatoren, Leistungs- wie auch Messtransformatoren, wird Leistung nicht durch mechanische Arbeit, sondern durch elektrische Energie in Form von Verlusten in das System eingebracht. Ganz allgemein gilt hierbei

$$P_{el}(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (24)$$

Und für die Arbeit

$$W_{el,12} = \int_t^{t+\Delta t} U(t) \cdot I(t) dt \quad (25)$$

Zusätzlich treten bei Transformatoren noch Eisen- und Kupferverluste, sowie zusätzliche Verluste, wie Verluste durch Wirbelströme in nicht zum magnetischen Kreis gehörenden

Komponenten oder dielektrische Verluste in der Isolierung, auf.

### Wicklungen

Wenn wir uns das Gehäuse des Wandlers als Systemgrenze vorstellen, besteht beim untersuchten Prüfling der innere Aufbau aus zwei zylindrischen Leiterstäben, die den gesamten Strom und damit die Leistung in das System einbringen. Da es sich um massive Leiter reinen Kupfers handelt, kann die Gleichung ( 25 ) umgeformt werden zu

$$W_{el,12} = \int_t^{t+\Delta t} \frac{U^2(t)}{R_{Leiter}} dt = \int_t^{t+\Delta t} I^2(t) \cdot R_{Leiter} dt \quad (26)$$

wobei

$$I^2(t) \cdot R_{Leiter} = P_{v,Leiter} \quad (27)$$

Mit Gleichung ( 27 ), welche dabei aus der Elektrotechnik bekannt ist als Formel der ohmschen Verlustleistung, und Gleichung ( 11 ), ergibt sich für die Kombiwandler folgende Leistungsgleichung:

$$Q'(t) + I^2(t) \cdot R_{Leiter} = \frac{dE}{dt} \quad (28)$$

Die Anwendung der Formel ( 28 ) ist jedoch an die Verwendung von Leitern mit kleinem Durchmesser gebunden. Bei größeren Durchmessern können zusätzliche Wirbelströme dazu führen, dass der Wechselstromwiderstand erheblich größer als der Gleichstromwiderstand ausfällt. Durch diese zusätzlichen Verluste und das Einbringen der Temperaturabhängigkeit des Leiterwiderstands, muss Gleichung ( 27 ) erweitert werden zu

$$I^2 \cdot k \cdot \rho_{20} \frac{l}{A} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (\vartheta - 20)) = P_{v,Leiter} \quad (29)$$

wobei k der dimensionslose Stromverdrängungsfaktor ist. Dieser ist von einer Vielzahl an Faktoren, wie beispielsweise den geometrischen Leiterabmessungen, der Frequenz, dem Leitermaterial, Anzahl und Abstand benachbarter Leiter und deren Geometrien abhängig. [14] Schlägt für die Bestimmung des Stromverdrängungsfaktors folgende Formeln vor.

Für rechteckigen Profildraht

$$k = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 \quad (30)$$

Für Rundleiter

$$k = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} \cdot \xi^4 \quad (31)$$

mit

$$\xi = 2\pi b \cdot \sqrt{\frac{n \cdot h \cdot f}{l_\sigma \cdot \rho \cdot 10^5}} \quad (32)$$

wobei  $h$  die axiale Höhe in Millimeter und  $b$  die axiale Breite eines Leiters in Zentimeter,  $m$  die Zahl der radial aufeinanderliegenden und  $n$  die Zahl der axial nebeneinanderliegenden Leiter,  $f$  die Frequenz und  $l_\sigma$  die Länge der Streulinie, sprich die Höhe der gesamten Spule, in Millimeter ist.

Für bestimmte Leiterprofile gibt es auch Stromverdrängungsfaktorkurven, welche bei einer bestimmten Frequenz für unterschiedliche Materialien und Querschnitte bei der Wahl des richtigen Wertes hilfreich sein können. Eine solche Kurvenschar für Rundleiter bei 50 Hertz ist im folgenden Bild dargestellt.

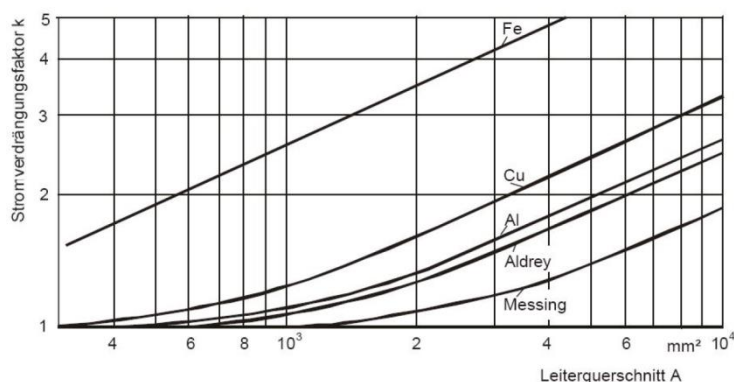


Bild 2-19 – Stromverdrängungsfaktor für Rundleiter. Quelle: [15]

Eine analytische Bestimmung ist häufig jedoch viel zu aufwendig oder überhaupt nicht möglich, weshalb der Stromverdrängungsfaktor, sofern er überhaupt berechnet wird, meistens numerisch mit Hilfe geeigneter FEM-Programme bestimmt wird. [16] schreibt hierzu, dass sich der Stromverdrängungsfaktor für eine gegebene Anordnung aus dem Quotienten der Wechselstrom- zu den Gleichstromverlusten bestimmen lässt.

## Eisenkern

Wirbelströme und die Reibung beim Umklappen der Dipole beim Durchlaufen der Hysteresekurve führen zu einer Erwärmung des Eisenkerns. Diese Verluste können unter

Kenntnis des Kernmaterials entsprechenden Kurven entnommen werden. Eine solche Kurve ist für Dynamoblech IV im folgenden Bild dargestellt.

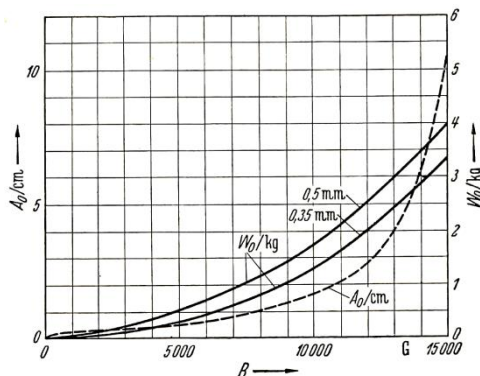


Bild 2-20 – Magnetisierungskurve und spezifische Wattverluste. Quelle: [14],S 187

## Dielektrikum

Das Pendant zu den Hystereverlusten des Eisenkreises, ist der Wirkstrom  $I_\delta$  bei Kondensatoren. Die Isolierung, z.B. Öl- und Papierisolierung des Stromwandlers, bildet gegenüber der hochspannungführenden Primärleiter einen Kondensator, wobei neben der kapazitiven Stromkomponente

$$I_c = U \cdot 2\pi f \cdot C \quad (33)$$

auch eine ohmsche Stromkomponente, der Wirkstrom

$$I_\delta = U \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \tan \delta \quad (34)$$

auftritt, da die Polarisations- und Leitfähigkeitsverluste eine Änderung der Phasenverschiebung, von den idealen  $90^\circ$ , um den Verlustwinkel  $\delta$ , bewirken.

Dieser Wirkstrom befindet sich mit der Spannung in Phase und verursacht die sogenannte dielektrische Verlustleistung

$$P_\delta = U \cdot I_\delta = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \tan \delta \quad (35)$$

Für beispielsweise einen 220 kV Stromwandler mit Ölpapier-Dielektrikum berechnet [14] diese Verlustleistung zu 13 Watt.

## Zusätzliche Wirbelstromverluste

Durch die Streuflüsse kann es in Komponenten, die nicht zum magnetischen Kreis gehören, wie unter anderem das Wandlergehäuse, zu Wirbelströmen und damit zu einer zusätzlichen

Erwärmung kommen. Diese zusätzlichen Wirbelstromverluste fallen in der Regel jedoch so gering aus, dass sie guten Gewissens vernachlässigt werden können. In Anbetracht der gewählten Prüfungsmodalitäten, siehe Kapitel 3.2, können die dielektrischen Verluste ebenfalls vernachlässigt werden, da diese gegenüber den ohmschen Verlusten in den Wicklungen praktisch nicht zum Tragen kommen.

## 2.3 Zersetzungsprozesse in Öl-Papier-Isolationssystemen

Ölpapier ist der wichtigste Isolierstoff in der Hochspannungstechnik. Die Kombination aus Mineralöl, welches neben den guten dielektrischen Eigenschaften auch sehr vorteilhafte thermische Eigenschaften aufweist, und Zellulose, welche vor allem in Form von Weichpapier, Kraftpapier und Pressspan in Öl-Papier-Isolationssystemen zum Einsatz kommt, findet in einer Vielzahl von Hochspannungskomponenten Anwendung. Es wird in Leistungstransformatoren, Kondensatoren, Durchführungen, Kabeln und auch Messwandlern verwendet und dies bereits seit vielen Jahren. Jedoch unterliegen beide Komponenten unvermeidbar einer Zahl von Degradierungsprozessen, die zum Teil erhebliche Auswirkungen auf das Isolationssystem haben können. In diesem Kapitel sollen diese näher beschrieben werden.

### 2.3.1 Alterungs- und Zerfallsprozesse im Mineralöl

Mineralöl wird durch Raffination und Hydrierung aus Erdöl gewonnen. Um die Eigenschaften des Öles zusätzlich zu konditionieren, werden zudem Inhibitoren wie beispielsweise Stickstoffverbindungen, Phosphor und Schwefel beigemischt, um die Oxidationsvorgänge zu reduzieren. Mineralöl enthält jedoch immer die in Bild 2-21 dargestellten Grundbausteine.

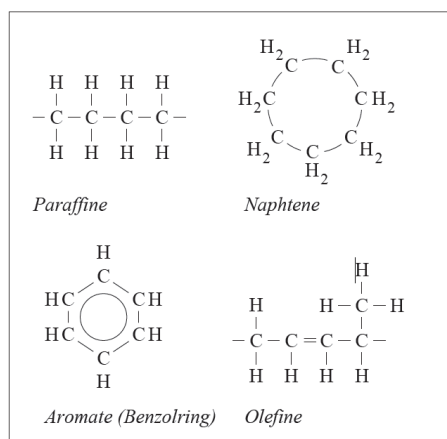


Bild 2-21 – Grundbausteine Mineralöl. Quelle: [17],S 338

Diese Bestandteile tragen dabei für unterschiedliche Eigenschaften des Mineralöls

Verantwortung. Für die Alterung und Zersetzung des Öles spielen besonders der Gehalt an Olefinen und Aromaten eine entscheidende Rolle. Der am meisten zur Alterung des Öls beitragende Vorgang oder Mechanismus ist die Oxidation. [18] beschreibt diesen wie folgt: Ölmoleküle unter Zugabe von Sauerstoff und Wärme bilden Peroxide, welche aufgrund ihrer labilen Sauerstoff-Sauerstoff-Bindung freie, reaktive Radikale bilden und somit leicht Alkohole, Aldehyde und Ketone formen. Diese Stoffe verändern die Eigenschaften des Öls wie beispielsweise die Löslichkeit von Wasser im selbigen. Zudem ist Wasser ein Beiprodukt dieser Reaktionen. In der Anwesenheit von Sauerstoff und Wärme bilden Aldehyde und Ketone zudem Säuren und Kohlenstoffdioxid, welches das Reaktionsendprodukt darstellt und daher beispielsweise bei der Analyse der gelösten Gase von Interesse ist. Säuren und Aldehyde können zudem miteinander reagieren und nichtlösliche Komponenten bilden. Man spricht dann häufig von Schlacke oder Schlämmen.

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass Kupfer katalytisch beschleunigend auf diese Vorgänge wirkt weshalb blankes Kupfer nicht in direktem Kontakt mit Öl stehen sollte.

Ein weiteres Phänomen ist die Bildung des sogenannten X-Waxes. Unter der Einwirkung von Teilentladungen kann es dadurch zu einer starken Vernetzung der Spaltprodukte und der Bildung von Wasserstoffgasen kommen, welche die Spannungsfestigkeit erheblich gefährden können. Prädestinierte Stellen für die Bildung solchen X-Waxes sind delaminierte Papierlagen oder unvollständig imprägnierte Isolierungen. Der Wasserstoffgasgehalt ist daher auch ein aussagekräftiger Parameter, welcher bei der Analyse der gelösten Gase untersucht wird.

Bei Aromaten kann es zu einem Aufbrechen der Doppelbindungen kommen, was dazu führen kann, dass das Öl verharzt.

Eine entscheidende Größe für die Beurteilung der Qualität des Mineralöls stellt der Wassergehalt dar. Wasser im Mineralöl setzt nicht nur die Spannungsfestigkeit des Mineralöls herab, sondern begünstigt Teilentladungen und die Bildung von Bläschen, bekannt als Bubble-Effekt, welche eine „verschleierte Gasentladung“ begünstigen und erhöht den Verlustfaktor. [19] beschreibt dabei die Formen in denen Wasser in Mineralöl auftritt wie folgt:

- Gelöstes Wasser: einzelne Wassermoleküle oder Molekülgruppen im Mineralöl
- Verteiltes Wasser: in Form von feinen Dispersionen und Emulsionen
- Gebundenes Wasser: Gruppiertes und adsorbiertes Wasser sowie Clathrate und Mizellen die durch Selbstassemblierung entstanden sind
- Freies Wasser welches vom Öl komplett gelöst ist

Der Übergang erfolgt bei einer Wasserzunahme im Öl dabei von gelöstem Wasser zu verteilttem Wasser zu freiem Wasser. Bestimmt wird der Wassergehalt dabei meist mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration, einem kapazitiven Sensor oder dielektrischen Messverfahren wie PDC, Polarisations- Depolarisationsstrom-Analyse und FDS, Frequenzbereichsspektroskopie.

Zwei entscheidende Größen sind hierbei die relative Sättigung von Wasser in Öl  $RS$  (Relative Saturation) sowie die Löslichkeit von Wasser in Öl  $S_0$  (Solubility). Die Löslichkeit gibt dabei an, wie viel Wasser bei einer bestimmten Temperatur im Öl gelöst sein kann während die relative Sättigung dem Verhältnis aus der gemessenen Menge Wasser im Öl zu dessen Löslichkeit bei einer bestimmten Temperatur entspricht.

[20] gibt für die Berechnung der Löslichkeit in Mineralöl folgende Formel an

$$\log S_0 = -\frac{1567}{T} + 7,0895 \quad (36)$$

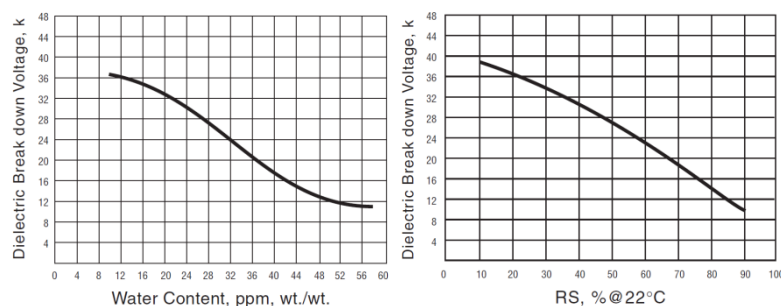
Diese ist auch unter dem Namen „Arrhenius Formel“ bekannt. Durch entsprechende Umformung erhält man

$$S_0 = 10^{-\frac{1567}{T} + 7,0895} \quad (37)$$

Die relative Sättigung bestimmt sich laut [20] wie folgt

$$RS = \frac{W_c}{S_0} \cdot 100\% \quad (38)$$

wobei  $W_c$  dem gemessenen Wassergehalt des Öls in ppm entspricht. Dadurch lässt sich die Durchschlagspannung als Funktion des Wassergehalts oder der relativen Sättigung darstellen, siehe Bild 2-22.



**Bild 2-22 – Durchschlagspannung als Funktion von Wassergehalt und Sättigung. Quelle: [20],S 3**

Die relative Feuchte spielt besonders bei der Beurteilung des Wassergehalts im Papier eine Rolle. Auf diese Thematik wird im nächsten Unterkapitel eingegangen. Abschließend sind in



Tabelle 2-6 die Mechanismen der Alterungs- und Zerfallsprozesse von Mineralöl, ihre Ursache und Folgen nochmals zusammengefasst angeführt.

Tabelle 2-6 - Oxidationsvorgänge in Mineralöl

| Mechanismen   | Ursache                                | Folgen  |
|---|--|---|
| <p>Aufbrechen von Doppelbindungen und Anlagerung polarer Gruppen</p> $\begin{array}{c}   \\ -\text{C}=\text{C}- \\   \end{array} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \begin{array}{c}   \quad \text{OH} \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \end{array}$                                       | Oxidation                              | <p>Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverluste irreversibel an.</p> <p>Vernetzung und Verharzung</p>   |
| <p>Oxidation von Ölmolekülen</p> $\begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{H} \\   \end{array} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{OH} \\   \end{array}$  | TE-, UV- und Lichteinwirkung           | <p>Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverluste an.</p> <p>Zersetzungsprodukte, Bildung von Säuren und Schlämmen</p>                                      |
| <p>Oxidation und Polykondensation</p> $\begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{H} \\   \end{array} + \text{O}_2 + \begin{array}{c}   \\ \text{H}-\text{C}- \\   \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c}   \quad   \\ -\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\   \quad   \end{array} + \text{H}_2\text{O}$ | TE-, UV- und Lichteinwirkung           | <p>Durch Wasserabspaltung sinkt die Durchschlagfeldstärke. Leitfähigkeit und Verlustfaktoren nehmen zu.</p> <p>Verharzung und Bildung von Schlamm</p>         |
| <p>X-Wachsbildung</p> $\begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{OH} \\   \end{array} + \begin{array}{c}   \\ \text{H}-\text{C}- \\   \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c}   \quad   \\ -\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\   \quad   \end{array} + \text{H}_2$                                     | Hohe Wechselfeldstärken, TE-Einwirkung | <p>Irreversibler Anstieg der Polarisationsverluste durch Oxidation.</p> <p>Verharzung, X-Wachsbildung, Volumenverringerng und Gasbildung durch Vernetzung</p> |

### 2.3.2 Feuchtigkeit im Papier und dessen Auswirkung

Wasser hat nicht nur auf das Mineralöl eine schadhafte Wirkung sondern ebenso auf die festen Isolationsbestandteile aus Papier und Zellulose. Die Zellulosefasern des Papiers sind stark hydrophil, was dazu führt, dass diese das Wasser aus dem Öl aufnehmen, was wiederum die Alterung und Zersetzung des Papiers beschleunigt. Eine Verdopplung des Wassergehalts im Papier führt zu einer Verdopplung der Alterungsgeschwindigkeit des Papiers [20], [21]. Das Wasser in der Zellulose wirkt dabei als Katalysator für die Depolymerisation und führt zur Spaltung der Zellulosemolekülketten [22]. Dadurch können Faserteilchen aus der Isolation gelöst werden und als freie Teilchen ins Öl gelangen. Diese

Fasern nehmen aufgrund ihrer hydrophilen Eigenschaften Wasser aus dem Öl auf und werden dadurch polarisierbar, was dazu führt, dass diese entsprechend der Feldlinien ausgerichtet werden. Die Bildung leitender Faserbrücken zwischen den Elektroden und ein sogenannter Faserbrückendurchschlag können die Folge sein. Es ist daher von entsprechendem Interesse, den Feuchtegehalt des Papiers zu bestimmen. Da eine Entnahme einer Papierprobe aber in den seltensten Fällen möglich ist, werden häufig indirekte Methoden angewandt, um diese zu bestimmen.

Da Öl und Papier in direktem Kontakt zueinander stehen, wird angenommen, dass bedingt durch ein Wasserkonzentrations- und/oder Temperaturungleichgewicht ein Diffusionsvorgang zwischen diesen stattfindet, über welchen der Feuchteaustausch erfolgt. Da aber die Berechnung der Feuchte im Papier während eines solchen Diffusionsvorgangs praktisch nicht möglich ist oder nur mit aufwändigen Modellen bestimmt werden kann, nutzt man in der Praxis Näherungsmethoden, welche vom Gleichgewichtszustand im Öl-Papier-Isolationssystem ausgehen, in welchem die relative Sättigung in Öl und Papier gleich groß ist. Tatsächlich wird dieses jedoch in der Praxis durch thermische Schwankungen niemals erreicht. Am gängigsten ist dabei die Verwendung von sogenannten Gleichgewichtskurven wie den Fabre-Pichon-Kurven, den Oommen-Kurven oder den Griffin-Kurven. Diese sind in den Bildern Bild 2-23, Bild 2-24 und Bild 2-25 dargestellt.

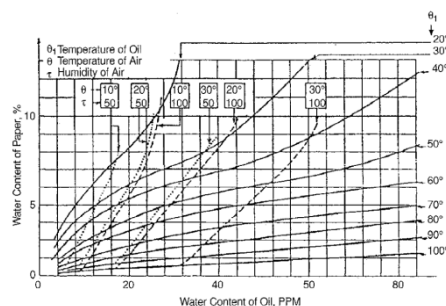


Bild 2-23 – Fabre-Pichon-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 12

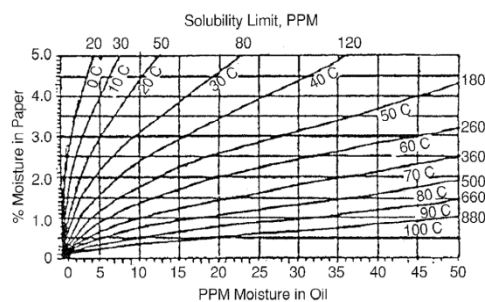


Bild 2-24 – Oommen-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 14

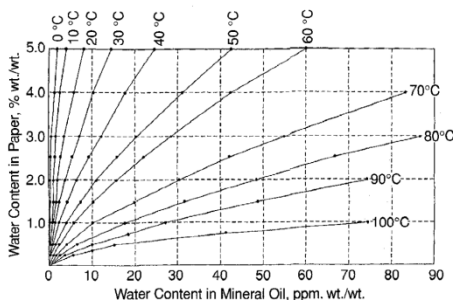


Bild 2-25 – Griffin-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 19

Neben den Kurven gibt es auch einige Formeln zur Berechnung des Papierfeuchtegehalts. Drei dieser Formeln, entnommen aus [23], sind in Tabelle 2-7 angeführt.

Tabelle 2-7 - Gleichungen zur Feuchtebestimmung des Papiers

| Name             | Formel  |
|------------------|---|
| ABB-Gleichung    | $H_2O_{\text{Papier}}(\%) = 2,06915e^{-0,0297\vartheta} \cdot H_2O_{\text{öl}}^{0,40489\vartheta^{0,09733}} \quad (39)$                   |
| Serena-Gleichung | $H_2O_{\text{Papier}}(\%) = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot H_2O_{\text{öl}} \cdot e^{\frac{4953}{T}} \quad (40)$                                |
| Shkolnik-Model   | $H_2O_{\text{Papier}}(\%) = c \cdot \left[ 10^{\left(8,94 - \frac{2254}{T}\right)} \cdot \frac{H_2O_{\text{öl}}}{S} \right]^n \quad (41)$ |

Der Zustand der Papierisolation wird dabei laut [24] wie folgt eingeteilt:

- 0 – 2 %: Trockene Isolierung
- 2 – 4 %: Feuchte Isolierung
- >4,5 %: Sehr feuchte Isolierung

Die IEC 60422 gibt zudem eine Einteilung des Zustandes der Zelluloseisolationen in Abhängigkeit der relativen Sättigung des Mineralöls vor:

- 0 – 5 %: Trockene Isolierung
- 6 – 20 %: Mäßig feuchte Isolierung
- 21 – 30 %: Feuchte Isolierung
- > 30 %: Extrem feuchte Isolierung

### 3 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Auswirkungen von thermischem Stress auf einen 220 kV Kombiwandler, wurde dieser einer Reihe von Versuchen, siehe unterzogen. Den Kern stellen dabei die zyklischen Belastungen des Wandlers mit dem thermischen Grenzstrom, beziehungsweise dem thermischen Bemessungsdauerstrom, dar. Um Vergleichsmessungen anstellen zu können wurde zudem ein zweiter baugleicher Wandler, der im Netz als Reserve diente und daher als unbelastet angesehen werden konnte, untersucht. Die beiden Wandler wiesen den gleichen Typ, den gleichen Hersteller sowie dasselbe Baujahr auf und besaßen sogar aufeinander folgende Fabrikationsnummer, weshalb davon ausgegangen wurde, dass beide Wandler bei Auslieferung in vergleichbarem Zustand waren. Es wurden begleitend Ölproben entnommen und analysiert als auch Teilentladungs- und Verlustfaktormessungen umfassende Vergleichs- beziehungsweise Entwicklungsuntersuchungen durchgeführt.

#### 3.1 Die Untersuchungsobjekte

Bei dem zu untersuchenden Betriebsmittel handelte es sich um einen Messwandler, sprich einen Messtransformator, zur Erfassung von Spannungen und Strömen in Hochspannungsnetzen der 220 kV Ebene. Das Fabrikat war vom Typ KOTEF 220 der Firma RITZ, Baujahr 2006. Dieser ist ein sogenannten kombinierter Wandler, oder kurz Kombiwandler, der sowohl aus einem Strom-, als auch einem Spannungswandler, vereint in einem Gehäuse, besteht. Der grundlegende Aufbau beider Wandlertypen ist in den Bildern Bild 3-1 und Bild 3-2 dargestellt.

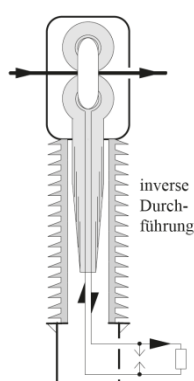


Bild 3-1 – Stromwandler. Quelle: [17], S 401

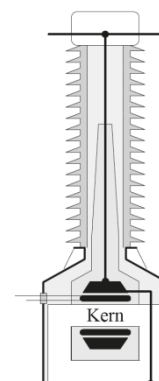


Bild 3-2 – Spannungswandler. Quelle: [17], S 400

Der Stromwandler besitzt eine Primärwicklung aus zwei massiven Kupferstäben, den Primärleiterstäben, von 50 mm Durchmesser, welche innerhalb des Wandlerkopfs durch den Torus der Sekundärspule geführt sind. Mit Hilfe der Verbindungs- oder auch Umschaltlaschen lassen sich diese Kupferstäbe in Serie oder parallel verschalten. Der Spannungswandler, beziehungsweise dessen Kern, hingegen sitzt im Sockel des

Wandlergehäuses. Dieser Aufbau macht es notwendig, zum einen den geerdeten Stromwandler gegen die hochspannungsführenden Primärleiterstäbe zu isolieren und zum anderen das Hochspannungspotential vom Kopf des Wandlers zum Sockel an den Spannungswandler zu führen und gegen den geerdeten Kern zu isolieren. In beiden Fällen wird dies mit Hilfe einer Öl-Papier-Isolierung, in Form von papiergewickelten Durchführungen in einem Ölvolumen, erreicht. Da der Kopf dabei stets auf Hochspannungspotential liegt, ist dieser mittels Stützisolator mit dem geerdeten Sockel verbunden. Im nachfolgenden Bild ist der Prüfling zu sehen.



Bild 3-3 – Untersuchungsobjekt RITZ KOTEF 220 kV Kombiwandler

Wie Eingangs zu Kapitel 3 bereits erwähnt wurde, handelte es sich um zwei Wandler. Deren beider Typenschilder sind in den zwei folgenden Bildern dargestellt.

| RITZ             |   | KOTEF 220  | Nr. 06/604 852       | DE 98  |
|------------------|---|--|----------------------|--|
|                  |   | 245 / 469 / 1050 kV                                  | 50 Hz                | M 050  |
|                  |   | In   | 50                   | ka <sub>lim</sub> 175 ka <sub>lim</sub> I <sub>th</sub> 2 x 1575 A |
| Prim.            | A | 2 x (600-300) Kern 1+2                               | /                    | 2 x 600 Kern 3+4   |
| Sek. Kern 1      | A | 1 VA 30  | Kl. 0.2 ext. 200% FS | 10 - 5   |
| Sek. Kern 2      | A | 1 VA 30  | Kl. 0.5 ext. 200% FS | 10 - 5   |
| Sek. Kern 3      | A | 2-1-0.5 VA 60  | Kl. 10P10            |  |
| Sek. Kern 4      | A | 1 Rb 7.5 Ω   | Kl. TPZ              |  |
|                  |   | Tr   | 100 ms               | Ksso 69   psc 2x41 ka   Ret 4.1 Ω                                  |
| Prim.            | V | 220 000/45   |                      |  |
| Sek. Wickl. 1    | V | 220/42-110/42  | VA 25/1000           | Kl. 0.2 Ue < 0.5 mV/kA   |
| Sek. Wickl. 2    | V | 110/42   | VA 60/1500           | Kl. 0.5 Ue < 0.4 mV/kA   |
|                  |   | 1.9 Un   | 4h                   |  |
| DVE EN 60044 - 3 |   | Wandler mit Luftabschluß keine Ölwanter erforderlich |                      |  |
|                  |   | Ölfüllung: NYNAS 4000X 480 kg                        |                      |  |
|                  |   | Gesamtgewicht: 1535 kg   Transport: liegend          |                      |  |

Bild 3-4 – Typenschild Wandler #1

| RITZ             |   | KOTEF 220  | Nr. 06/604 851       | DE 98  |
|------------------|---|--|----------------------|--|
|                  |   | 245 / 469 / 1050 kV                                  | 50 Hz                | M 050  |
|                  |   | In   | 50                   | ka <sub>lim</sub> 175 ka <sub>lim</sub> I <sub>th</sub> 2 x 1575 A |
| Prim.            | A | 2 x (600-300) Kern 1+2                               | /                    | 2 x 600 Kern 3+4   |
| Sek. Kern 1      | A | 1 VA 30  | Kl. 0.2 ext. 200% FS | 10 - 5   |
| Sek. Kern 2      | A | 1 VA 30  | Kl. 0.5 ext. 200% FS | 10 - 5   |
| Sek. Kern 3      | A | 2-1-0.5 VA 60  | Kl. 10P10            |  |
| Sek. Kern 4      | A | 1 Rb 7.5 Ω   | Kl. TPZ              |  |
|                  |   | Tr   | 100 ms               | Ksso 69   psc 2x41 ka   Ret 4.1 Ω                                  |
| Prim.            | V | 220 000/45   |                      |  |
| Sek. Wickl. 1    | V | 220/42-110/42  | VA 25/1000           | Kl. 0.2 Ue < 0.5 mV/kA   |
| Sek. Wickl. 2    | V | 110/42   | VA 60/1500           | Kl. 0.5 Ue < 0.4 mV/kA   |
|                  |   | 1.9 Un   | 4h                   |  |
| DVE EN 60044 - 3 |   | Wandler mit Luftabschluß keine Ölwanter erforderlich |                      |  |
|                  |   | Ölfüllung: NYNAS 4000X 480 kg                        |                      |  |
|                  |   | Gesamtgewicht: 1535 kg   Transport: liegend          |                      |  |

Bild 3-5 – Typenschild Wandler #2

Da das Auftrag gebende Unternehmen von Problemen mit diesen Wandlern berichtet hatte, die besonders an heißen, sonnenreichen Tagen auftraten, wurde von Seiten des Unternehmens vermutet, dass es sich um ein Problem mit thermischer Ursache, besonders im Zusammenhang mit erhöhter Umgebungslufttemperatur, handelte. Daher sollte der Wandler an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz auf sein Verhalten unter thermischem Stress und dessen Auswirkungen untersucht werden.

Da in der vorliegenden Arbeit häufig auf Komponenten der Hauptstrombahn Bezug genommen wird, seien diese kurz an einer Explosionszeichnung des Modells, siehe Kapitel 4, in den folgenden beiden Bildern angeführt.

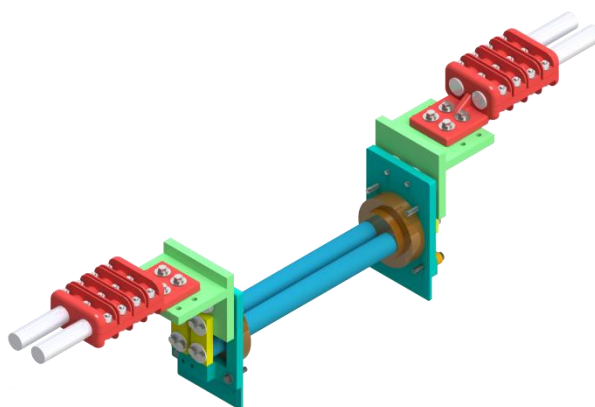


Bild 3-6 – CAD-Modell der Hauptstrombahn mit markierten Komponenten

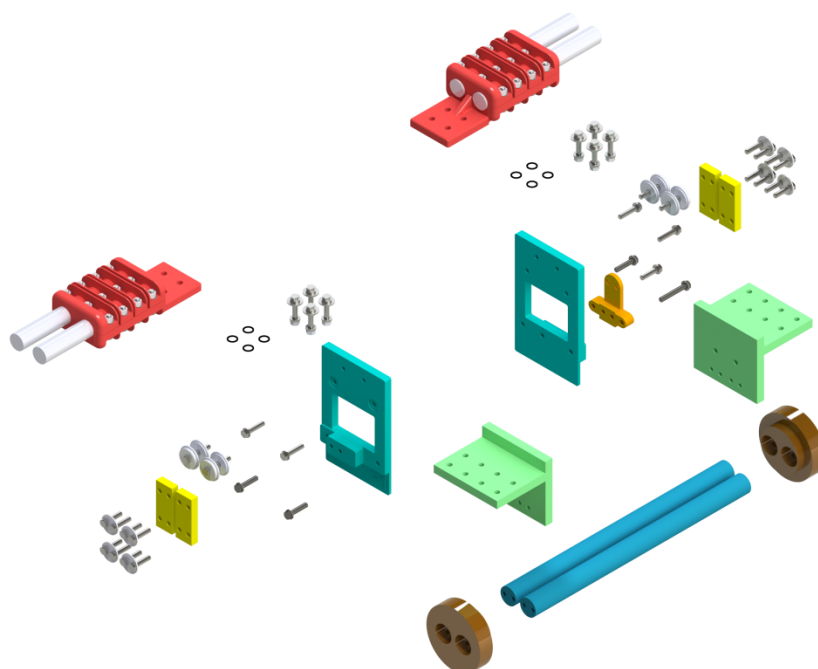


Bild 3-7 – Explosionsansicht der Hauptstrombahn mit Seilklemmen (rot), Kontaktringe (schwarz), Verbindungslaschen (gelb), Gehäuseanschlussplatten (türkis), Serienlasche (orange), Winkelaschen (grün), Primärleiterstäben (blau) und Dichtungen (braun)

### 3.2 Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens wurde der Wandler mit dem thermischen Bemessungsdauerstrom  $I_{cth}$ , entsprechend dem Typenschild unter Bild 3-4, von zweimal

1575 Ampere zyklisch beaufschlagt. Der thermische Bemessungsdauerstrom stellt dabei ein Vielfaches der primären Bemessungsstromstärke dar, mit der ein Wandler belastet werden darf, ohne dabei die zulässigen Grenzwerte der Erwärmung zu überschreiten. Diese Grenzwerte sind in Tabelle 3-4 in Unterkapitel 3.2.3, beziehungsweise in [25], Tabelle 5, angeführt. Dabei wurden die Temperaturen an signifikanten Stellen des Wandlers erfasst, aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Zudem wurden begleitend in bestimmten Intervallen Ölproben vom Transformator entnommen und analysiert, deren Ergebnisse jedoch erst in Kapitel 3.5 diskutiert werden sollen.

### 3.2.1 Prüfaufbau

Im Folgenden ist der Prüfaufbau etwas näher beschrieben. Dabei wird unter anderem auf die Anspeisung und die Temperaturerfassung eingegangen, sowie der Prüffeldaufbau an sich näher erläutert.

#### *Anspeisung*

Um den Wandler mit dem thermischen Bemessungsdauerstrom zu beaufschlagen, war ein Strom von insgesamt 3150 Ampere notwendig. Da weder die Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik noch das Institut für Hochspannungstechnik zum Durchführungszeitpunkt der Untersuchungen über eine eigene Hochstromanlage verfügte, musste hierfür ein eigener Aufbau mit Anspeisung aus dem Niederspannungsnetz realisiert werden. Dafür wurde der Wandler mit einem Leiterseil aus Aluminium von zwei mal 625 mm<sup>2</sup> Querschnitt, Typ 626-AL, kurzgeschlossen. Bild 3-8 zeigt diesen Aufbau.



**Bild 3-8 – Aufbau innerhalb der Kabine**

In dieses wurde mittels sechs Stromtransformatoren, siehe Bild 3-9 bis Bild 3-11, eine Spannung induziert, die schließlich den notwendigen Strom durch den Prüfling getrieben hat.



**Bild 3-9 – Stromtransformatoren  
Längsansicht**



**Bild 3-10 – Stromtransformatoren  
Queransicht**



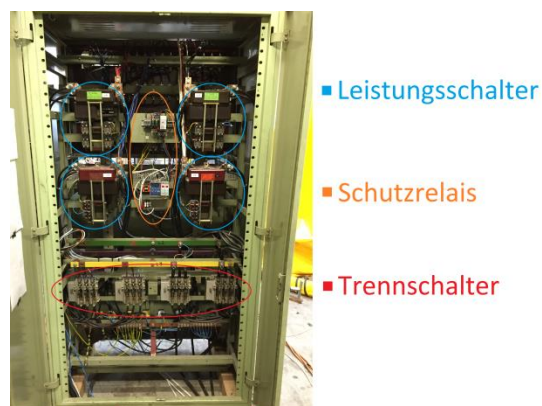
**Bild 3-11 – Leiterseilführung  
durch die Stromtransformatoren**

Dabei wurden jeweils drei dieser Transformatoren an eigene Stelltransformatoren zur Regelung der Stromamplitude, siehe Bild 3-12, beziehungsweise direkt ans Niederspannungsnetz angeschlossen.



**Bild 3-12 – Stelltransformatoren**

Alle Transformatoren wurden von einem zentralen Schalt- und Steuerschrank mit vier Abgängen, welcher in Bild 3-13 zu sehen ist, gespeist. In diesem wurden Leistungsschalter, Trennschalter, Sicherungen und Sammelschiene untergebracht.



**Bild 3-13 – Schalt- und Steuerschrank**



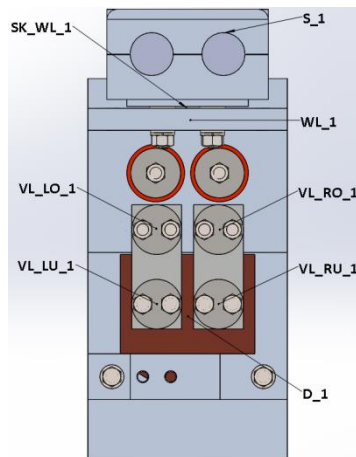
Der Schaltschrank selbst wurde an die Gebäudesammelschiene, aufgrund infrastruktureller Begebenheiten, über drei Anspeiseleitungen angeschlossen und verfügte über eine Anschlussleistung von rund 100 kVA.

Die hohe Anschlussleistung, die inhärente Brandgefahr und die Tatsache, dass der Versuch über lange Zeiträume, zum Beispiel in der Nacht oder über Wochenenden hinweg, teilweise unbeaufsichtigt laufen musste, machten die Etablierung eines geeigneten, umfangreichen Schutz- und Sicherheitskonzeptes unabdingbar. Neben der Absicherung der drei Anspeisungen, sowie einer Hauptsicherung für den gesamten Schrank, wurden alle acht Anschlüsse der vier Abgänge ebenfalls abgesichert. Zudem wurde ein Sicherheitskreis eingerichtet, in welchen weitere überwachende Schutzsysteme eingegliedert wurden. Diese umfassten Not-Aus-Taster, Unter- und Überspannungs-, sowie Spannungssymmetrieüberwachungsrelais für jeden Abgang, Rauch- und Feuermelder, Fehlerstromschutzschalter und Signalbeleuchtungskörper für das Prüffeld. Die verschiedenen Einrichtungen und Elemente der Schutzbeschaltung und des Sicherheitskreises wurden ebenfalls im Schaltschrank untergebracht.

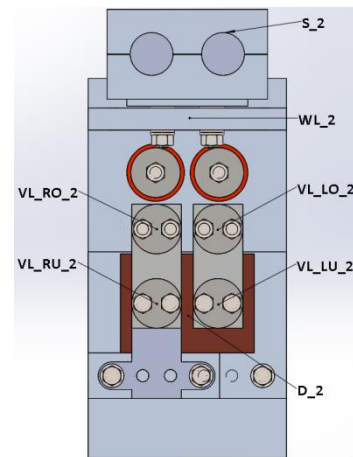
Um auf die Umgebungsbedingungen während des Versuches Einfluss nehmen zu können, wurde der gesamte Aufbau in einer Kabine aus industriellem Kunststoffgewebe untergebracht. Mit Hilfe eines Heizlüfters und eines Umluftsystems wurde die Umgebungstemperatur innerhalb der Kabine zwischen 40 °C und 50 °C gehalten. Die Höhe der Umgebungstemperatur ist dabei entsprechend [25], 4.2.1 beziehungsweise 4.3.3, gewählt. Geregelt wurden beide Komponenten mit Hilfe einer Relaiskarte, welche durch die Messwerte eines Testo 400, welches Temperatur, relative Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft innerhalb der Kabine aufzeichnete, gesteuert wurde.

### ***Temperaturmessung***

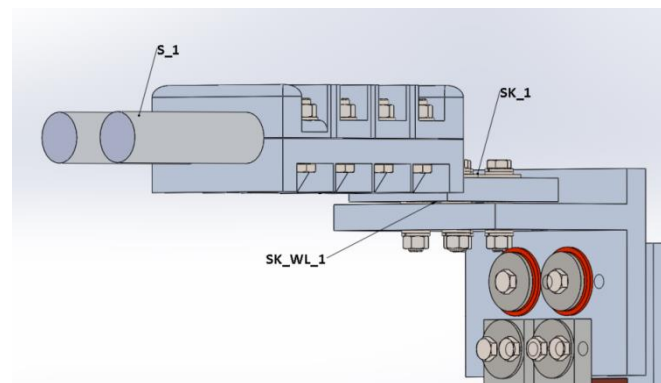
Die Messung der Temperaturen erfolgte entsprechend [25] mittels Thermoelementen. Die Bezeichnungen der einzelnen Thermoelemente, unter welchen sie auch in den Diagrammen der Auswertungen, siehe Kapitel 3.2.3 und 3.3.2, angeführt sind, sowie deren Position auf dem Messwandler, sind in Tabelle 3-1 aufgelistet. Dabei sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich alle Angaben (links, rechts, oben, unten) auf die Seite P1 des Wandlers beziehen. Das bedeutet, dass Thermoelemente mit der Position „rechts“ von der Seite P1 gesehen auf der rechten Seite, von der Seite P2/A gesehen jedoch auf der linken Seite angebracht sind. So sind, als Beispiel, die Thermoelemente 10 und 11 beide auf Verbindungsglaschen, die mit demselben Primärleiter verbunden sind, angebracht. Dieser Primärleiter entspricht auf der Seite P1 dem rechten Primärleiter jedoch von Seite P2/A betrachtet, dem linken Primärleiter. Die Platzierung der Thermoelemente ist zudem nochmals grafisch hier in den Bildern Bild 3-14 bis Bild 3-16 dargestellt.



**Bild 3-14 – Thermoelementpositionen Seite P1**

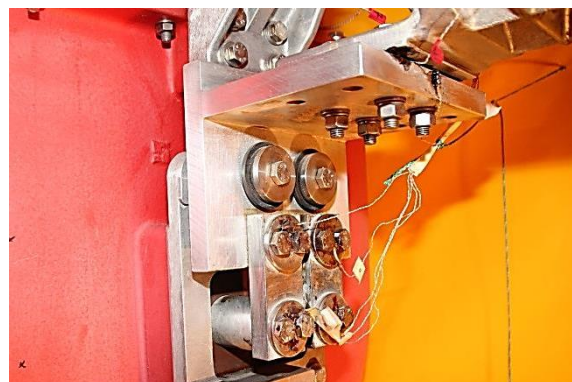


**Bild 3-15 – Thermoelementpositionen Seite P2/A**



**Bild 3-16 – Thermoelementpositionen um die Seilklemme**

Ein weiteres Thermoelement befand sich innerhalb des Wandlerkopfes, unterhalb der Dehndosen, direkt auf der Berstscheibe und diente der Messung der Öltemperatur, sowie zwei Thermoelemente die jeweils mittig auf den Dichtungen angebracht waren. Diese wurden an den Messstellen mit temperaturbeständigem Epoxidharz auf den Wandler aufgeklebt. Dies ist in nachfolgendem Bild exemplarisch für die Winkel- und Verbindungslaschen der Wandlerseite P1 dargestellt.



**Bild 3-17 – Angebrachte Thermoelemente an der Seite P1**

Tabelle 3-1 – Position und Bezeichnung der Thermoelemente

| Elementnummer | Bezeichnung | Position                             | Wandlerseite |
|---------------|-------------|--------------------------------------|--------------|
| 1             | RT_1        | Frei hängend in Kabine               | P1           |
| 2             | RT_2        | Frei hängend in Kabine               | P2/A         |
| 3             | WL_1        | Winkellasche Vorderkante             | P1           |
| 4             | WL_2        | Winkellasche Vorderkante             | P2/A         |
| 5             | BERST       | Mitte Berstscheibe im Kopf           | -            |
| 6             | D_1         | Zwischen Primärleitern auf Dichtung  | P1           |
| 7             | D_2         | Zwischen Primärleitern auf Dichtung  | P2/A         |
| 8             | VL_RO_1     | Rechte Verbindungsglasche Oben       | P1           |
| 9             | VL_RO_2     | Rechte Verbindungsglasche Oben       | P2/A         |
| 10            | VL_RU_1     | Rechte Verbindungsglasche Unten      | P1           |
| 11            | VL_RU_2     | Rechte Verbindungsglasche Unten      | P2/A         |
| 12            | VL_LO_1     | Linke Verbindungsglasche Oben        | P1           |
| 13            | VL_LO_2     | Linke Verbindungsglasche Oben        | P2/A         |
| 14            | VL_LU_1     | Linke Verbindungsglasche Unten       | P1           |
| 15            | VL_LU_2     | Linke Verbindungsglasche Unten       | P2/A         |
| 16            | S_1         | Auf Leiterseil                       | P1           |
| 17            | S_2         | Auf Leiterseil                       | P2/A         |
| 18            | SK_1        | Hinten auf Seilklemme                | P1           |
| 19            | SK_WL_1     | Zwischen Seilklemme und Winkellasche | P1           |

### 3.2.2 Prüfungsdurchführung

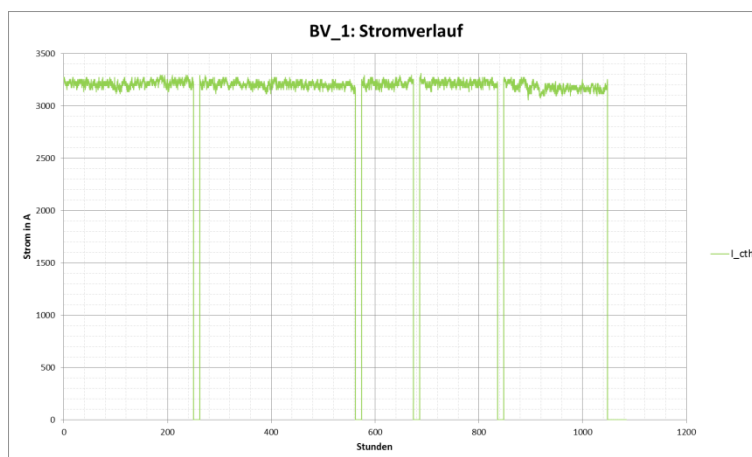
Um die Auswirkungen des thermischen Stresses auf die Hauptstrombahn, bestehend aus Seilklemme, Kontaktringen, Winkellasche, Verbindungsglaschen und Primärleiterstäbe sowie auf das Isolationssystem und die Dichtungen zu untersuchen, wurde der Wandler insgesamt für 1000 Stunden mit dem thermischen Bemessungsdauerstrom von 3150 Ampere beaufschlagt. Um eine Aussage über die Auswirkung der Beaufschlagungsdauer zu erhalten, wurden diese 1000 Stunden in fünf unterschiedlich lange „Heizphasen“, also jene Zeit in welcher der Wandler mit Strom beaufschlagt wurde, jeweils gefolgt von einer „Kühlphase“, in welcher der Wandler stromlos blieb, unterteilt. In Tabelle 3-2 sind der geordnete Ablauf

inklusive der einzelnen Beaufschlagungsdauern angeführt. Die Länge der Kühlphase wurde dabei so gewählt, dass einerseits die Komponenten der Hauptstrombahn vollständig abkühlten und andererseits die Änderung der Öltemperatur unter 1 K die Stunde fiel, was beides nach zwölf Stunden gegeben war.

**Tabelle 3-2 - Stromzyklen bei erhöhter Umgebungstemperatur**

| Zyklus        | Dauer in Stunden |
|---------------|------------------|
| Heizenphase 1 | 250              |
| Kühlphase     | 12               |
| Heizenphase 2 | 300              |
| Kühlphase     | 12               |
| Heizphase 3   | 100              |
| Kühlphase     | 12               |
| Heizphase 4   | 150              |
| Kühlphase     | 12               |
| Heizphase 5   | 200              |
| Kühlphase     | 12               |

Die unterschiedlichen Zykluslängen sind in der Darstellung des Stromverlaufs über der Zeit, welcher im folgenden Diagramm dargestellt ist, ebenfalls sehr gut erkennbar.



**Diagramm 3-1 – BV 1: Stromverlauf**

Die Messsignale der Thermolemente wurden mit Hilfe eines am Institut für Hochspannungstechnik gebauten Messverstärkers, welcher mittels Datenkabel mit einem Rechner in unmittelbarer Prüfplatznähe verbunden war, erfasst und aufgezeichnet. Am Institut wurde hierfür zudem ein eigenes Prüfprogramm geschrieben, welches schlussendlich

alle Messeingänge, in einem Datenfile zusammenfasste. Dabei wurde etwa alle 20 Sekunden ein neuer Messpunkt der Thermoelemente, welche direkt am Wandler angebracht waren, beziehungsweise alle 30 Sekunden ein Messpunkt der Thermoelemente auf Seil und Seilklemmen, aufgenommen, was für den gesamten Versuch einer Anzahl von rund 4 Millionen Messwerten entspricht und in Anbetracht der relativen Trägheit von thermischen Vorgängen, eine ausreichend hohe Auflösung der Messdaten gewährleistet hat.

Zu Beginn eines jeden Zyklus wurde dem Wandler im kalten Zustand eine Ölprobe von zweimal zehn Millilitern für die Karl-Fischer-Titration und die Analyse der gelösten Gase (Dissolved Gas Analysis oder kurz DGA) entnommen und analysiert. Dies wurde ebenfalls am Ende eines jeden Zyklus im warmen Zustand wiederholt.

### 3.2.3 Auswertung

Während des Versuches konnten einige sehr interessante, komponentenspezifische Vorgänge beobachtet werden. Um diese zu strukturieren, wird die Auswertung für die relevanten Wandlerkomponenten separat diskutiert, während die gesamtsystemspezifischen Aussagen sowie die Zusammenfassung am Schluss dieses Unterkapitels erfolgen.

#### Temperaturgrenzwerte

Um die Temperaturverläufe qualitativ bewerten zu können, ist es erforderlich, die Höhen der Grenzübertemperaturen zu kennen. Die IEC/TR 60943 gibt dabei folgende Grenzwerte an.

**Tabelle 3-3 – Grenzen der Übertemperatur in Anlehnung an [26]**

| Komponenten         |   | Grenze der Übertemperatur in K        |
|---------------------|---|---------------------------------------|
| Schraubverbindungen | - Cu, Al blank in oxidierender Atmosphäre   | 60                                    |
|                     | - Cu, Al versilbert oder vernickelt in oxidierender oder nichtoxidierender Atmosphäre | 75                                    |
|                     | - Cu, Al verzinkt in oxidierender oder nicht oxidierender Atmosphäre                  | $105 - \vartheta_{\text{Umgebung}}^3$ |
| Anschlussklemmen    | - Blank   | 60                                    |
|                     | - versilbert oder vernickelt  | 75                                    |
|                     | - verzinkt  | $105 - \vartheta_{\text{Umgebung}}$   |

Die speziell für Messwandler spezifizierten Grenzwerte werden in Tabelle 5 der DIN EN 61869 angeführt oder können der nachfolgenden Tabelle 3-4 entnommen werden.

<sup>3</sup> Mit  $\vartheta_{\text{Umgebung}}$  ist die Umgebungstemperatur in °C gemeint. Der Wert von 105 K ist bedingt durch die Kriecheinsatztemperatur von Zinn.

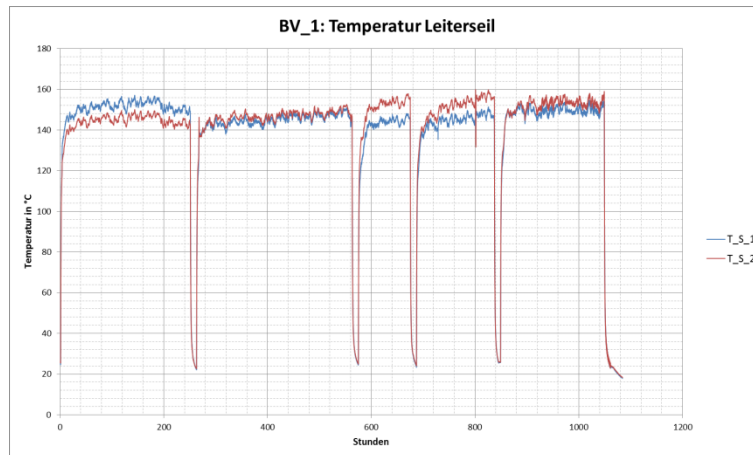
Tabelle 3-4 – Grenzen der Übertemperatur in Anlehnung an [25] Tabelle 5

|   |                            | Teile des Messwandlers                            | Grenze der Übertemperatur in K |
|---|----------------------------|---|--------------------------------|
| Ölgefüllte Messwandler  |                            | - Oben  | 50                             |
|   |                            | - oben, hermetisch abgeschlossen                  | 55                             |
|   |                            | - Wicklung Durchschnitt                           | 60                             |
|   |                            | - Wicklung Durchschnitt, hermetisch abgeschlossen | 65                             |
|   |                            | - andere metallische Teile in Kontakt mit Öl      | wie für Windungen              |
| Verbindungen verschraubt oder gleichwertig für Kupfer oder Kupfer- und Aluminiumlegierungen | Blank                      | - in Luft   | 50                             |
|   |                            | - in SF6  | 75                             |
|   |                            | - in Öl   | 60                             |
|   | Versilbert oder vernickelt | - in Luft   | 75                             |
|   |                            | - in SF6  | 75                             |
|   |                            | - in Öl   | 60                             |
|   | Verzinkt                   | - in Luft   | 65                             |
|   |                            | - in SF6  | 65                             |
|   |                            | - in Öl   | 60                             |
|   |                            |   |                                |

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass eine direkte Messung an der Primärwicklung im Inneren des Wandlers nicht erfolgt ist, da dies, ebenso wie die direkte Messung der Öltemperatur, nicht ohne invasiven Eingriff und der damit einhergehenden Verfälschung des Prüflingszustandes, möglich gewesen wäre, sondern lediglich an den Komponenten, die außerhalb des Wandlers zugänglich waren, Temperaturen erfasst wurden.

### Leiterseil

Die verwendeten Leiterseile waren vom Typ 626 - Al und wiesen eine Dauerstromtragfähigkeit im Bereich von 1100 Ampere auf [27]. Durch den hohen thermischen Strom wurden diese darum permanent mit rund 150 % des Dauerstroms überlastet. Dies führte dazu, dass die eigentliche Grenztemperatur für Freileitungen von etwa 80°C deutlich überschritten wurde. Während der Belastungszyklen traten daher am Leiterseil Temperaturspitzen von 159,9 °C und stellenweise Betriebstemperaturen über 140 °C auf. Der gesamte Temperaturverlauf, gemessen an den beiden Seilenden in einem Abstand von etwa 20 cm vor der Seilklemme, ist in Diagramm 3-2 dargestellt.



**Diagramm 3-2 – BV 1: Temperaturverlauf an den Leiterseilenden**

Die hohe Temperatur an diesen Stellen spiegelt jedoch nicht die mittlere Leiterseiltemperatur wieder. An den Messpunkten überlagerten sich vielmehr die Eigentemperatur des Leiterseils und jene Übertemperatur, welche der Seilklemmen zuzuschreiben ist. In jenem Bereich, in dem das Seil durch die Transformatoren geführt wurde, wies es hingegen Temperaturen von etwa 80 bis 100°C auf. Die hohen Seiltemperaturen führten dennoch dazu, dass sich das Schmiermittel, welches sich in dem Freileitungsseil befand, komplett verflüssigte und, wie in den Bildern Bild 3-18 und Bild 3-19 dargestellt, aus dem Seil austrat.



**Bild 3-18 – BV 1: Abgetropftes Leiterschmiermittel**



**Bild 3-19 – BV 1: Ausgelaufenes Leiterschmiermittel**

Bei der Untersuchung des Wandlers nach Beendigung des 1000-Stunden-Versuchs konnte zudem eine starke Verformung der Leiterseilabschlusskappen festgestellt werden, siehe Bild 3-20 und Bild 3-21. In Bild 3-21 ist hierbei das Profil der Seilklemme auf der Leiterseiloberfläche selbst erkennbar.



**Bild 3-20 – BV 1: Leiterseilabschluss nach Zyklen**



**Bild 3-21 – BV 1: Leiterseilabschluss Nahaufnahme**

Außerdem kam es zu lokalen Verschweißungen mit der Seilklemme, die so deutlich ausgeprägt waren, dass das Seil selbst bei geöffneten Seilklemmen am Wandler haftete und erst unter zusätzlicher Krafteinwirkung gelöst werden konnte. Im Bereich der Seilklemmen wies es überdies eine deutliche Fremdschichtbildung auf, wie an den vorhergehenden beiden Bildern ebenfalls gut erkennbar ist. Da das Leiterseil jedoch nicht Bestandteil des Prüflings ist, wird an dieser Stelle auf eine nähere Betrachtung dessen thermischen Verhaltens verzichtet.

### **Seilklemmen**

Die Messpunkte an den Seilklemmen wiesen während des thermischen Belastungsversuchs unter erhöhter Umgebungstemperatur die höchsten Temperaturen des gesamten Aufbaus auf. In Diagramm 3-3 sind die Temperaturkurven der drei Thermoelemente an der Seilklemme P1 dargestellt. Die Temperatur am Seil und zwischen Seilklemme und Winkellasche war dabei, abgesehen vom ersten Zyklus, über den gesamten Versuch praktisch identisch, mit Höchstwerten von rund 160 °C und Durchschnittswerten von 150 °C. Das dritte Thermoelement, in Diagramm 3-3 rot dargestellt, war auf der Befestigungsglasche der Seilklemme, zwischen den vier Schrauben, mit welchen die Seilklemme und die Winkellasche verschraubt werden, angebracht. Die Ursache für den Temperaturunterschied von gut 20 °C lässt sich zum einen damit erklären, dass das Thermoelement SK\_P1 durch seine oberflächliche Platzierung eine gute Wärmeabgabemöglichkeit zur umgebenden Luft hatte, während das Thermoelement SK\_WL\_P1 zwischen zwei massiven Aluminiumrechteckleitern, die in einem Abstand von etwa fünf Millimetern angebracht waren, befestigt wurde. Des Weiteren war die Position des Thermoelementes an der Oberseite der Seilklemme günstig, da hier durch die freie Konvektion, siehe Kapitel 2.2.3, verursacht durch die Abwärme der tiefer liegenden Komponenten der Hauptstrombahn, ein entsprechender Wärmetransport und somit eine verhältnismäßig gute Kühlung bestand.



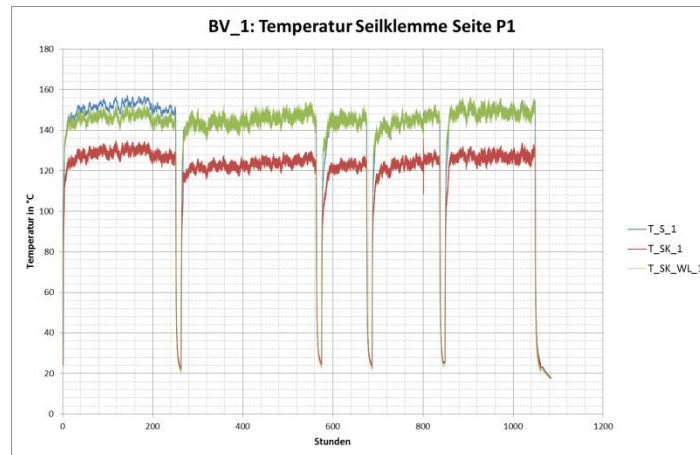


Diagramm 3-3 – BV 1: Temperaturverlauf an der Seilklemme

Die Seilklemme selbst wies, im Gegensatz zum Leiterseil, keine Deformation, sehr wohl aber punktuelle Verschweißungsstellen auf. Zudem bildeten sich deutliche Fremdschichten innerhalb der Seilklemme, wie in Bild 3-22 dargestellt ist.



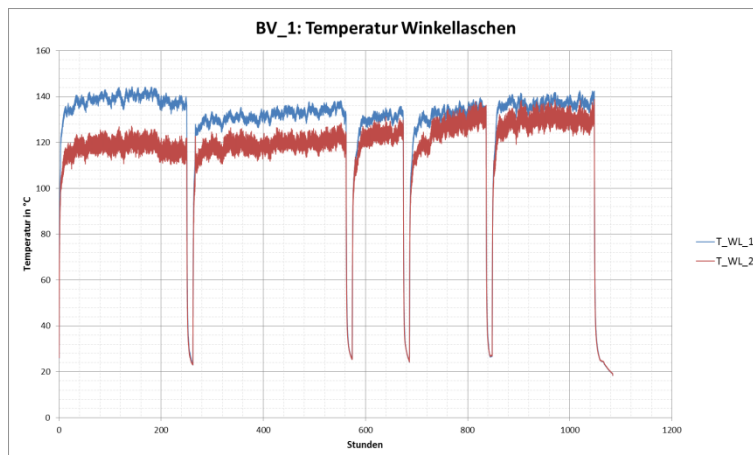
Bild 3-22 – BV 1: Seilklemme nach Zyklen

Bei der Demontage des Freileitungsseils wurde zudem, wie in Kapitel 2.1.4 bereits beschrieben, ein Kraftverlust aller 24 Schraubverbindungen der Seilklemmen festgestellt. Diese waren vor Beginn des Versuchs mit 45 Newtonmeter angezogen worden. Nach dem Versuch lag das Anzugsmoment aller Schrauben unter 20 Newtonmeter. Das Anzugsmoment nahm dabei zum Teil sogar so deutlich ab, dass viele der Schraubverbindungen mit bloßen Händen und ohne den Einsatz von Werkzeugen gelöst werden konnten.

### Winkellaschen und Kontaktringe

Betrachtet man Diagramm 3-4, erkennt man, dass die Temperaturen der Winkellaschen zu Beginn deutlich voneinander abwichen und sich jedoch mit fortlaufender Zeit immer weiter aneinander annäherten. Ursache hierfür dürfte eine zunehmende Verschlechterung der Kontakte an der Seite P2/A sein. Dies lässt sich damit argumentieren, dass der Temperaturverlauf an der Seite P1 über die Zyklen weitgehend gleich geblieben ist, mit Ausnahme des ersten Zyklus, während welchem jedoch mehrheitlich erhöhte Temperaturen

an unterschiedlichen Stellen des Wandlers festgestellt werden konnten. Die zusätzliche Verschlechterung der Kontakte könnte dann zu einer höheren Erwärmung geführt haben.



**Diagramm 3-4 – BV 1: Temperaturverlauf an den Winkellaschen**

Im Allgemeinen überschreiten die Übertemperaturen der Winkellaschen die vorgegeben Grenzwerte laut [25] und [26] deutlich, im Besonderen auf der Seite P1 des Wandlers.

Die Kontakttringe, welche die Seilklemme mit der Winkellasche verbinden, zeigten starke Abnützung und Verschmutzung, wie in den Bildern Bild 3-23 bis Bild 3-26 zu sehen ist. Der Formkunststoff war geschmolzen, spröde und teilweise sehr brüchig. Die metallischen Ringe selbst zeigten jedoch keine Deformation oder schadhafte Beeinträchtigung entlang des Kontaktantenprofils. Jedoch hafteten diese sehr gut an der Winkellasche. Die Ursache hierfür kann wieder im punktuellen Verschweißen der Kontaktstellen und/oder einfach am geschmolzenen Kunststoff, beziehungsweise Rückständen vom Schmiermittel oder Kontaktfett liegen.



**Bild 3-23 – BV 1: Winkellasche P1 mit Kontakttringen nach Zyklen**



**Bild 3-24 – BV 1: Kontakttring auf Seite P1 nach Zyklus**

Um dies genauer zu untersuchen, wurden die Kontakttringe nach diesem Versuch durch neue ersetzt. Diese sind in Bild 3-27 abgebildet.



Bild 3-25 – BV 1: Winkellasche P2/A mit Kontaktringen nach Zyklen



Bild 3-26 – BV 1: Kontaktring auf Seite P2/A nach Zyklus

Vor dem Tausch der Kontaktringe wurden die Kontaktflächen von Seilklemmen und Winkellaschen mittels Drahtbürste, Isopropanol und Aceton gereinigt und mit einer Kontaktpaste behandelt.



Bild 3-27 – BV 1: neue Kontaktringe

## Verbindungslaschen

An den vier Verbindungslaschen waren jeweils zwei Thermoelemente, eines am oberen Kontakt zur Winkellasche und eines am unteren Kontakt zum Primärleiterstab, befestigt, siehe hierzu auch Bild 3-14 und Bild 3-15, sowie Tabelle 3-1.

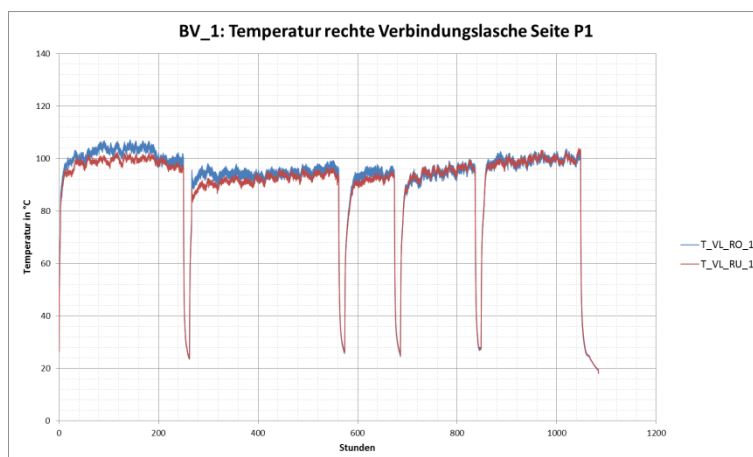


Diagramm 3-5 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungslasche rechts auf Seite P1

Diagramm 3-5 zeigt die Temperaturverläufe der rechten Verbindungslasche auf der Seite P1 des Wandlers. Die Temperaturen an beiden Stellen der Lasche weisen praktisch denselben Verlauf und gleiche Höhe auf, mit einer durchschnittlichen Temperatur, die während den Zyklen bei über 90 °C lag.

Ein interessanter Temperaturverlauf ergab sich bei der linken Lasche auf der Seite P1, welcher in Diagramm 3-6 zu sehen ist.

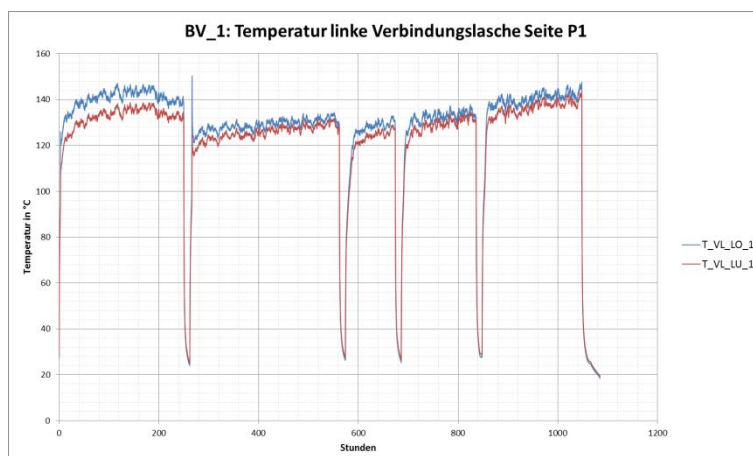


Diagramm 3-6 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungslasche links auf Seite P1

Hier lassen sich einige Beobachtungen machen. Zum einen fällt auf, dass die Temperaturen im Verlauf jenen der rechten Verbindungslasche ähneln, die Temperaturen jedoch etwa 30 bis 40 °C höher liegen, als bei der benachbarten rechten Lasche. Somit trat hier eine ständige Überschreitung der Übertemperatur nach [25] auf. Der Grund für diesen Temperaturunterschied dürfte der Aluminiumverbinder oder Serienlasche auf der Seite P2/A sein, welcher den rechten Primärleiterstab mit dem großflächigen, verhältnismäßig deutlich kühleren Wandlerkopfgehäuse verbindet und somit eine entsprechende Wärmesenke darstellt. Dies wurde in Kapitel 0 mit Hilfe einer thermischen Simulation untersucht.

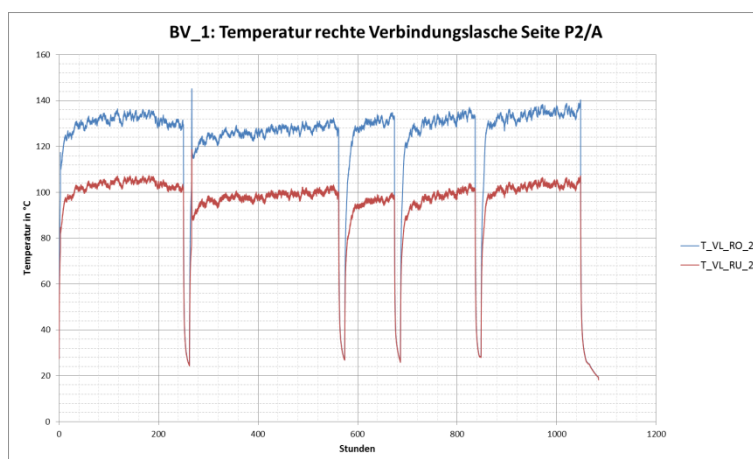


Diagramm 3-7 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungslasche rechts auf Seite P2/A

Diagramm 3-7 stellt den Temperaturverlauf an der rechten Verbindungs- beziehungsweise Umschaltlasche auf der Seite P2/A des Wandlers dar. Hier zeigt sich ein erheblicher Temperaturunterschied zwischen den beiden Thermoelementen, welche auf derselben Lasche sitzen. Auch dies unterstützt die Annahme der Wärmesenke, welche durch die Serienlasche an der Seite P2/A gegeben ist.

In den Diagrammen Diagramm 3-6 und Diagramm 3-7 erkennt man zudem am Beginn des zweiten Zyklus eine sehr schnelle, kurzfristige aber hohe Temperaturänderung. Dies ist ein charakteristischer Temperaturverlauf einer Heißkontaktausbildung und anschließendem B-Frittens, welche bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurden. Die Temperatur stieg hierbei innerhalb von etwa zehn Minuten um 40 °C, in 30 Minuten um insgesamt 45 °C an, bevor sie wieder absank. Als Ursache kann hier die kritische Werkstoffkombination Aluminium-Kupfer und die hohe Temperatur, welche nicht nur die Grenzwerte in [25], Tabelle 5, und [26] sondern auch die von [4] empfohlene Grenze für Kontakte von 100 °C, überschreitet, genannt werden. Dieser Vorgang ist in den beiden nachfolgenden Diagrammen nochmals detaillierter dargestellt.

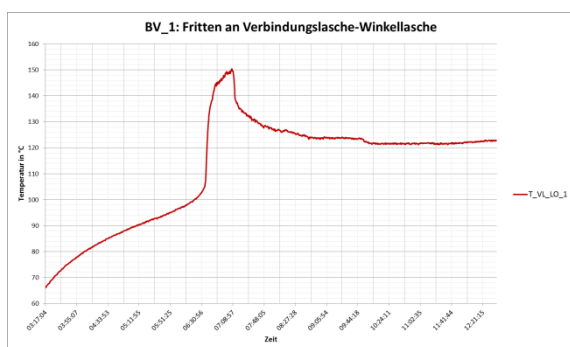


Diagramm 3-8 – B – BV 1: Frittens bei Verbindungs-lasche

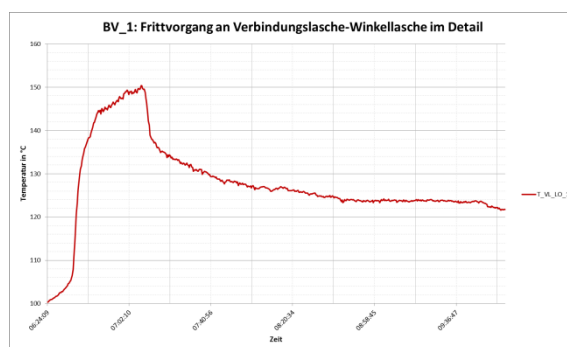


Diagramm 3-9 – BV 1: Detaillierter Frittvorgang

Folgendes Diagramm zeigt die Temperatur der linken Verbindungs-laschen der P2/A - Seite.

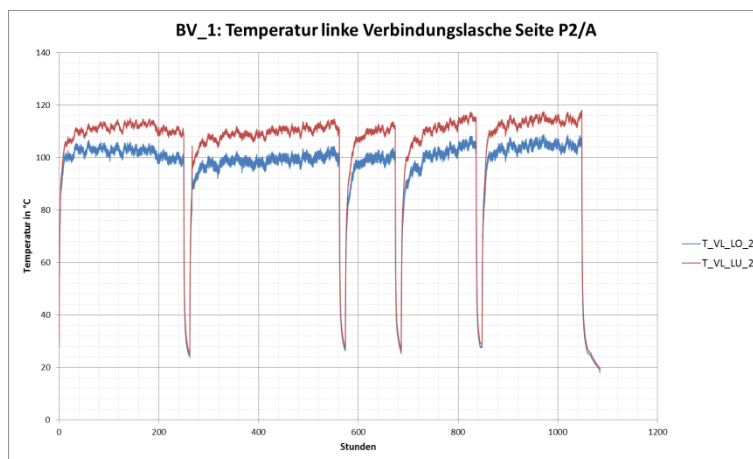


Diagramm 3-10 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungs-lasche links auf Seite P2/A

Auch hier, siehe Diagramm 3-10, konnte während des Belastungsversuches unter erhöhter Umgebungstemperatur eine geringfügige aber längerfristige Grenzwertüberschreitung am unteren Messpunkt detektiert werden. Interessant ist hier, dass, im Gegensatz zu den restlichen 3 Verbindungsflaschen, das untere Thermoelement die höhere Temperatur erreicht hat.

### Mineralöl und Dichtungen

Die Öltemperatur wurde indirekt über ein Thermoelement an der Berstscheibe gemessen und ist in Diagramm 3-11 dargestellt. Die Öltemperatur blieb über alle Zyklen hinweg bei etwa 65 °C und fiel nie unter 30 °C.

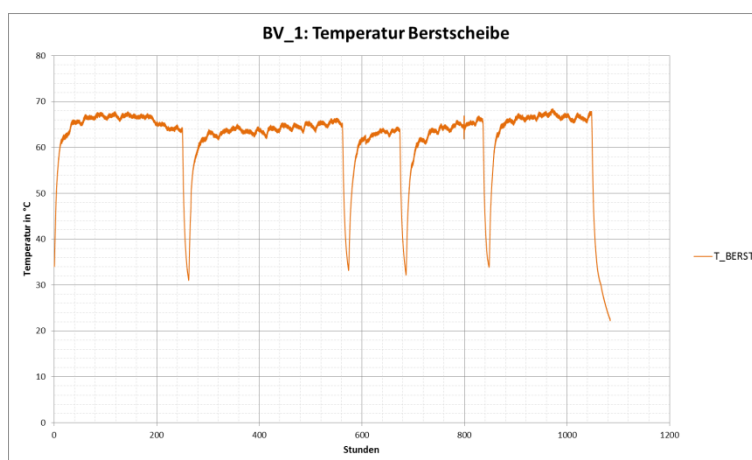


Diagramm 3-11 – BV 1: Temperaturverlauf des Mineralöls

Abschließend sind in Diagramm 3-12 die Temperaturverläufe an den Primärleiterdichtungen abgebildet. Das Thermoelement war dabei mittig auf der Dichtung platziert. Hier ist lediglich festzustellen, dass die Dichtung an der Seite P2/A immer etwa sieben Grad wärmer ist, als die Dichtung an der gegenüberliegenden Seite.

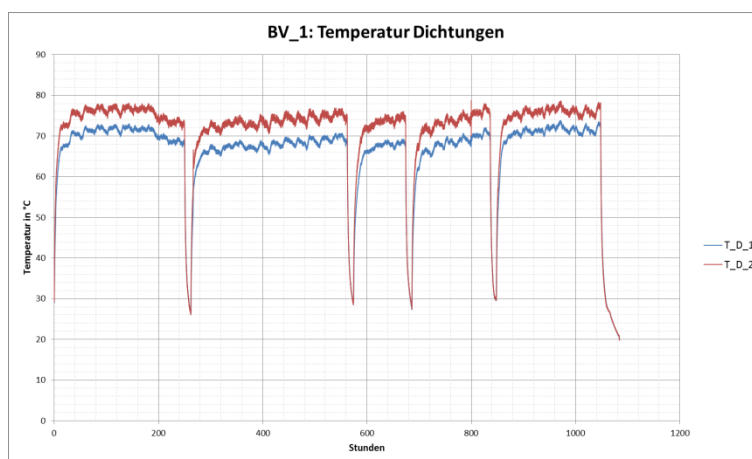


Diagramm 3-12 – BV 1: Temperaturverlauf der Dichtungen



## Zusammenfassung

Entsprechend den Werten in Tabelle 3-4, weist der Versuch an mehreren Komponenten der Hauptstrombahn, bei Belastung mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom, Grenzwertüberschreitungen der Übertemperaturen nach. Betroffen sind hierbei besonders die Winkel- und Verbindungsflaschen, siehe Tabelle 3-5. Die Auswirkungen dieser Übertemperaturen weisen eine deutlich beschleunigte Degradierung der Kontaktstellen auf, was zum Beispiel durch Frittvorgänge beobachtet werden konnte. Zudem existieren ungünstige Kupfer-Aluminium, beziehungsweise Kupfer-Aluminium-Edelstahl-Material-Kombinationen im Bereich der Verbindungs- beziehungsweise Umschaltflaschenkontaktstellen, welche durch die unterschiedlichen Eigenschaften, der in Kontakt stehenden Materialien, siehe Kapitel 2.1.4, eine besondere Anfälligkeit aufweisen.

Tabelle 3-5 – Übertemperaturaufkommen während Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur

| Komponente | Übertemperatur-<br>aufkommen |          |          |          |          |
|------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|            | 100<br>h                     | 150<br>h | 200<br>h | 250<br>h | 300<br>h |
| WL_1       | Red                          | Red      | Red      | Red      | Red      |
| WL_2       | Red                          | Red      | Red      | Red      | Red      |
| VL_RO_1    | Yellow                       | Yellow   | Yellow   | Yellow   | Yellow   |
| VL_RO_2    | Red                          | Red      | Red      | Red      | Red      |
| VL_RU_1    | Yellow                       | Yellow   | Yellow   | Yellow   | Yellow   |
| VL_RU_2    | Yellow                       | Yellow   | Yellow   | Yellow   | Yellow   |
| VL_LO_1    | Red                          | Red      | Red      | Red      | Red      |
| VL_LO_2    | Yellow                       | Yellow   | Orange   | Yellow   | Yellow   |
| VL_LU_1    | Red                          | Red      | Red      | Red      | Red      |
| VL_LU_2    | Orange                       | Orange   | Orange   | Orange   | Orange   |



Des Weiteren sei angemerkt, dass die Seilklemmen, an welchen ebenso eine Grenzwertüberschreitung festgestellt werden konnte, ebenfalls keine unproblematischen Komponenten darstellen. Hier trat neben dem thermo-mechanisch bedingten Kontaktkraftverlust, welcher sich in einer deutlichen Lockerung der Schrauben manifestierte, so dass diese nach dem Versuch teilweise ohne Zuhilfenahme von Werkzeugen nur mit bloßen Händen geöffnet werden konnten, unter anderem auch eine ausgeprägte Fremdschichtbildung auf.

Diagramm 3-13 zeigt die Verteilung der mittleren Temperaturen der Hauptstrombahnkomponenten des Kombiwandlers über die fünf unterschiedlichen Zyklen. Die Isothermen für die relevanten Übertemperaturgrenzwerte sind darin farblich wie folgt hervorgehoben

- Grün: Übertemperatur von 50 K
- Orange: Übertemperatur von 65 K
- Rot: Übertemperatur von 75 K.

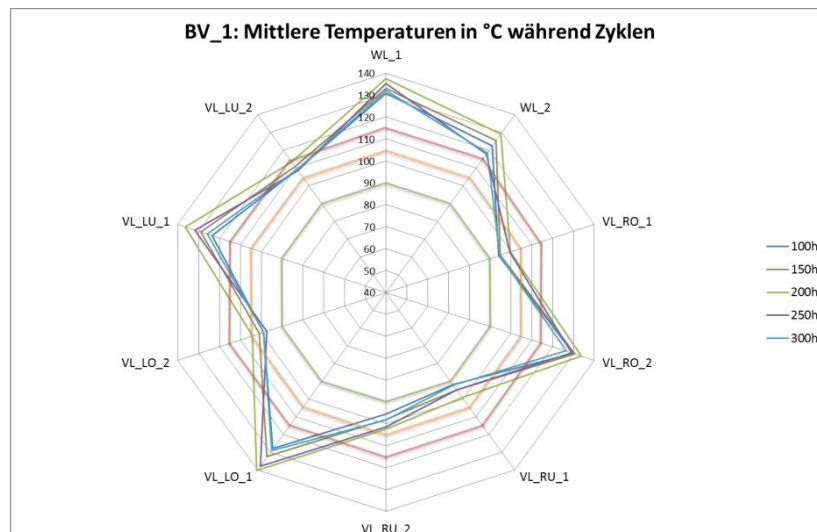


Diagramm 3-13 – BV 1: Mittlere Temperaturen der Hauptstrombahnkomponenten während Zyklen

### 3.3 Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit

Grundsätzlich handelt es sich bei Messwandlern, wie den in dieser Arbeit Untersuchten, um wartungsfreie Transformatoren, was bedeutet, dass innerhalb ihrer Einsatzzeit im Netz keine Aufbereitung oder ein Tausch des Mineralöls vorgesehen oder erforderlich ist. Während der Herstellung, werden diese mit entgastem und getrocknetem Öl gefüllt und anschließend hermetisch verschlossen. Eine wechselnde Belastung des Transformators, führt jedoch zu einem wechselhaften, thermischen Eintrag in das Öl des Transformators. Dies hat zur Folge, dass sich das Öl immer wieder, je nach Belastung, zusätzlich aufheizt oder abkühlt und dabei das Öl eine Volumenänderung erfährt. Bei Leistungstransformatoren, die für Gewöhnlich über einen Ölkonservator verfügen, nennt man dies auch das Atmen des Transformators, da während sich das Öl ausdehnt Luft aus dem Transformator hinaus gedrückt und während es sich zusammenzieht Luft in den Transformator hinein gesogen wird. Bei Messwandlern gibt es einen solchen Ölkonservator im Allgemeinen nicht. Hier werden zwischen Öl und Luft Stickstoffpolster oder Öldehndosen mit metallischen Membranen in den Wandler integriert. Jedoch enthalten die Gehäuse, beispielsweise aus bautechnischen Gründen, zumal mehrere Dichtungen, die eine Wechselwirkung zwischen Isolationssystem und der den Wandler



umgebenden Luft verhindern sollen. Dennoch lassen sich Gehäuse nie komplett Abdichten, da zum Beispiel die Dichtungen Alterungserscheinungen unterliegen, spröde und rissig werden und Undichtigkeitsstellen entwickeln. Bei den untersuchten Wandlern gab es, das Entnahmeseptrum nicht mitgezählt, sechs Dichtungen und es handelte sich um Wandler mit metallischen Dehdosen, die im Kopf verbaut waren. Um den Wandler auf seine Dichtigkeit gegen Luftfeuchtigkeit zu testen, wurde dieser unter ständig erhöhter Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft zyklisch aufgeheizt und wieder abgekühlt. Zudem stellt die erhöhte Luftfeuchtigkeit eine unterschiedliche thermische Belastung für den Wandler dar, da die Luftfeuchtigkeit Einfluss auf die thermischen Wärmetransportprozesse nimmt. Während diesen Zyklen wurden wieder regelmäßig Ölproben entnommen.

### 3.3.1 Prüfungsdurchführung

Im Unterschied zum Belastungsversuch 1, siehe 3.2, war bei diesem Versuch die Änderung des Ölvolumens ausschlaggebend für die Belastungsart, da hier eine Undichtigkeit durch etwaiges Atmen des Wandlers untersucht werden sollte. Aus diesem Grund wurden die Heizphasen im Vergleich zum ersten Belastungsversuch verkürzt, während die Kühlphasen verlängert wurden. Daraus ergab sich eine zyklische Belastung, deren Einzelzyklen, wie in folgender Tabelle angeführt, aufgeteilt waren.

Tabelle 3-6 - Stromzyklen bei erhöhter Umgebungsluftfeuchtigkeit

| Zyklus | Dauer in Stunden |
|--------|------------------|
| Heizen | 48               |
| Kühlen | 48               |

Insgesamt wurden dabei 13 solcher Zyklen durchgeführt, was einer erneuten thermischen Belastung von über 600 Stunden entspricht. Diagramm 3-14 zeigt den Stromverlauf über den gesamten Versuch hinweg. Die Erfassung der Messgrößen sowie die Platzierung der Thermoelemente unterschied sich dabei nicht von jener, welche bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, weshalb hier auch auf eine erneute Beschreibung dieser verzichtet und auf das entsprechende Kapitel verwiesen wird.

Wie schon beim Belastungsversuch 1, wurden auch hier in regelmäßigen Abständen, nämlich jeweils am Ende einer Heiz- und Kühlphase, Ölproben von 10 ml entnommen und mittels Karl-Fischer-Titration, direkt am Institut für Hochspannungstechnik, auf deren Wassergehalt untersucht. Auf eine DGA wurde für diesen Versuch aufgrund der großen Anzahl an Ölmesspunkten bewusst verzichtet.

Diagramm 3-14 zeigt den Stromverlauf während dieses zyklischen Belastungsversuchs.

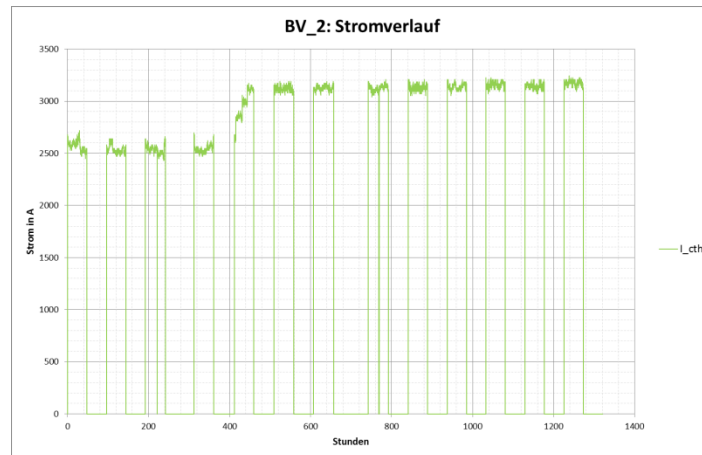


Diagramm 3-14 – BV 2: Stromverlauf

### 3.3.2 Auswertung

Wie bereits in Kapitel 3.3.1, Diagramm 3-14 ersichtlich ist, wurden die ersten 4 Zyklen nicht mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom von 3150 A durchgeführt. Die Ursache hierfür lag an den deutlichen erhöhten Übertemperaturen, die an einigen Komponenten des Wandlers während des Versuches auftraten und daher erst währenddessen beseitigt werden konnten. Weiters sei an dieser Stelle erwähnt, dass es während des achten und neunten Zyklus durch einen Defekt des Luftbefeuchters im Laufe der Nacht zum kurzzeitigen Ausfall desselben kam, wodurch jeweils für ein paar Stunden dessen Kühlleistung entfiel. Dies führte zu einer erhöhten Umgebungslufttemperatur und damit an allen Messpunkten ebenfalls zu kurzzeitigen Temperaturhüben. Diese sind in allen Diagrammen dieses Kapitels gut erkennbar, bedürfen jedoch keiner weiteren Aufmerksamkeit. Auch während des vierten Zyklus mussten die Prüfkabinneninnenluftkonditionen verändert werden, da die Temperaturen der Seilklemme an der Seite P1 stark zunahm. Darum wurde für wenige Stunden gegen Ende des vierten Zyklus ein Ventilator für zusätzliche Kühlung installiert. Diese erzwungene Konvektion führte an einigen Messstellen zu einem kurzzeitigen Absinken der Temperaturen. Während des fünften Zyklus wurde nach den erfolgreichen Umbauarbeiten der Strom schließlich etappenweise wieder bis zum thermischen Bemessungsgrenzstrom von 3150 A erhöht. In der weiteren Diskussion wird auf ein wiederholtes Eingehen auf diese Phänomene zu jedem Messergebnis verzichtet.

#### Leiterseil

Während der ersten Zyklen stiegen die Temperaturen am Leiterseil stetig an. Dabei erreichte das Seil in unmittelbarer Nähe der Seilklemmen Temperaturen über 180 °C, wie in Diagramm 3-15 gut erkennbar ist.

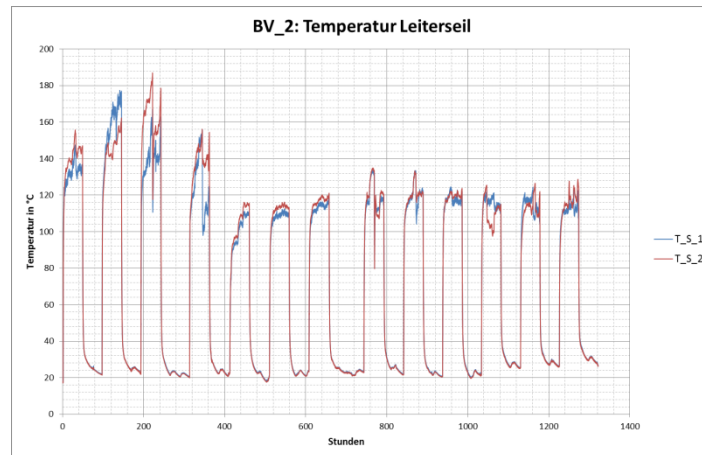


Diagramm 3-15 – BV 2: Temperaturverlauf an den Leiterseilenden

Die Ursache für diesen Temperaturanstieg lag jedoch nicht am Leiterseil selbst, sondern an einem Kontaktproblem zur Seilklemmen. Die Temperaturabnahme während des vierten Zyklus ist dem zusätzlich angebrachten Ventilator zu schulden. Nach dem vierten Zyklus wurde dieses behoben und die Temperaturen an den Leiterseilenden sanken auf durchschnittlich unter 120 °C während die Leiterseiltemperatur im Durchgangsbereich, wie in Bild 3-28 ersichtlich ist, bei etwa 70 °C lag.

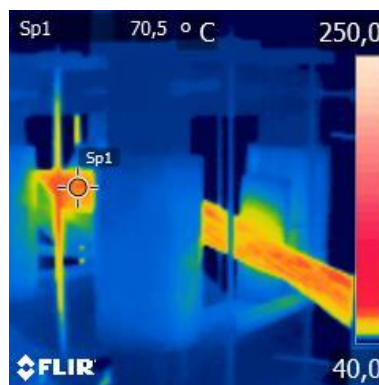


Bild 3-28 – BV 2: Thermographie Stromtransformator und Leiterseil

## Seilklemmen

Diagramm 3-16 zeigt den Temperaturverlauf an der Seilklemme auf Seite P1 des Kombiwandlers. Hier ist über die Zyklen 2,3 und 4 ein deutlicher Temperaturhub festzustellen. Dieser führte dazu, dass die Seilklemme im vierten Zyklus Temperaturen von über 200 °C erreichte, was die Installation zweier Ventilatoren erforderlich machte. Wie in nachfolgenden Diagramm zu sehen ist, konnte damit die Temperatur der Seilklemme auf etwa 130 °C vermindert werden, wodurch es möglich wurde, den Zyklus noch zu beenden.

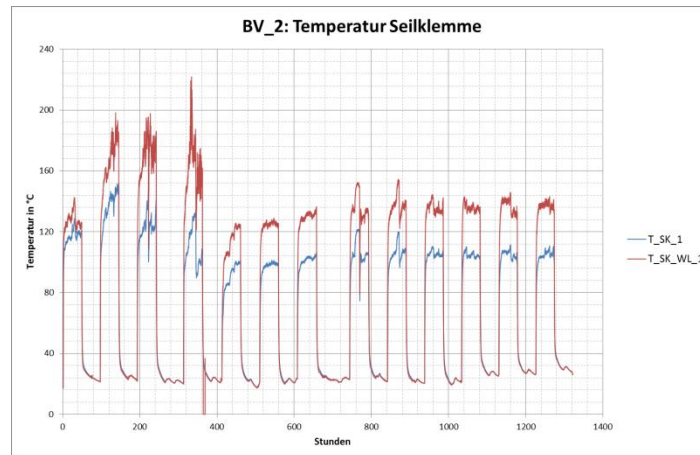


Diagramm 3-16 – BV 2: Temperaturverlauf an der Seilklemme

Mit Beendigung des vierten Zyklus wurden daher die Seilklemmen demontiert und auf Fehler untersucht. Vor der Demontage wurden mit einer Thermokamera der Firma FLIR einige Aufnahmen gemacht um die Messwerte der Thermoelemente zu prüfen. Zwei dieser Aufnahmen sind in den Bildern Bild 3-29 und Bild 3-30 zu sehen.

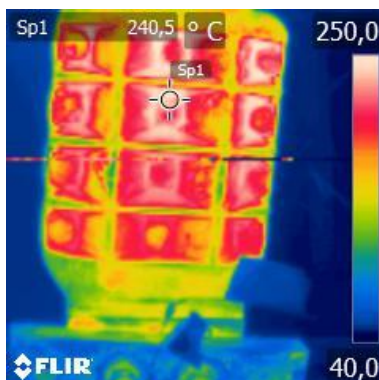


Bild 3-29 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (unten) vor Umbau

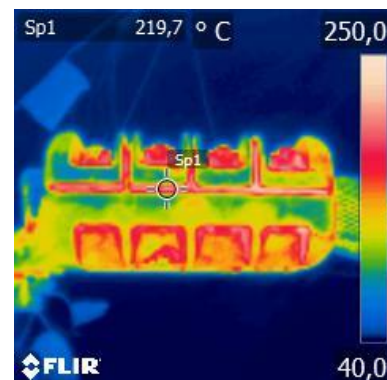


Bild 3-30 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (seitlich) vor Umbau

Wie schon bei der Verbindungsflasche wiesen auch die Seilklemmen deutlich ausgebildete Fremdschichten auf, die ebenfalls mit einer Drahtbürste und Isopropanol entfernt wurden. Die stärkste Fremdschichtbildung war dabei an der Unterseite der Seilklemme feststellbar. Die oberen Seilklemmenschellen wiesen ein deutliches Leiterprofil und erneute punktuelle Verschweißungen auf, so dass auch hier das Leiterseil durch externe Krafteinwirkung aus der bereits geöffneten Seilklemme gelöst werden musste. Die Bilder Bild 3-31 bis Bild 3-36 zeigen den Zustand der Seilklemmenkomponenten vor und nach dem Umbau.



Bild 3-31 – BV 2: Seilklemme (oben) vor Umbau



Bild 3-32 – BV 2: Seilklemme (oben) nach Umbau



Bild 3-33 – BV 2: Seilklemme (Detail) vor Umbau



Bild 3-34 – BV 2: Seilklemme (Detail) nach Umbau

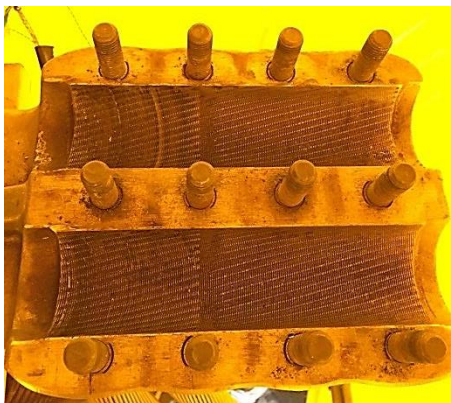


Bild 3-35 – BV 2: Seilklemme (unten) vor Umbau

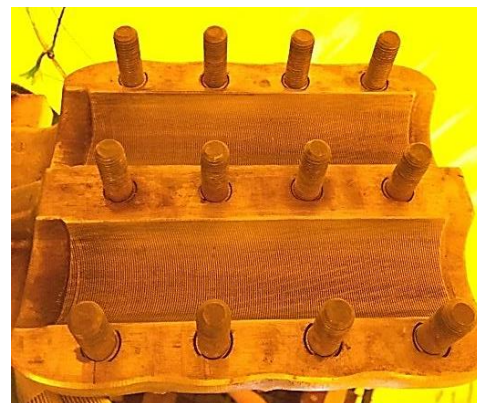


Bild 3-36 – BV 2: Seilklemme (unten) nach Umbau

Nach der erneuten Montage der Seilklemmen wurden die Zyklen fortgesetzt. Wie der Vergleich der Thermographieaufnahmen in den Bildern Bild 3-29 und Bild 3-30 zu den Bildern Bild 3-37 und Bild 3-38 deutlich zeigt, konnte dadurch die Temperatur der Seilklemme um mehr als 120 °C gesenkt werden.



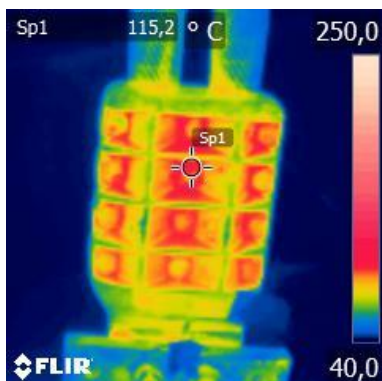


Bild 3-37 – BV 2: Thermographie<sup>4</sup> der Seilklemme (unten) nach Umbau

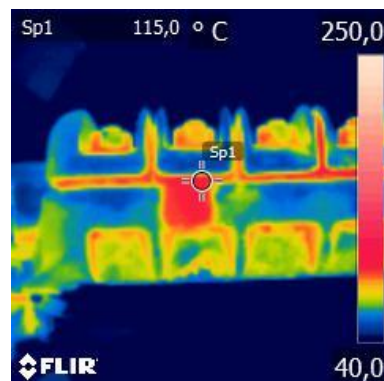


Bild 3-38 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (seitlich) nach Umbau

Auf der Seilklemme blieb die Temperatur für den restlichen Versuch im Toleranzbereich, während die Verbindungsstelle, Seilklemme auf Winkellasche, mit über 130 °C die Grenzwerte für die Übertemperatur nach [25] und [26] durchgehend überschritt.

### Winkellaschen und Kontakttringe

Zu Beginn des zyklischen Belastungsversuches traten auch an den Winkellaschen nicht unerhebliche Übertemperaturen auf. Die Ursache war jedoch das Kontaktproblem der Seilklemme, was in Diagramm 3-17 auch gut daran erkennbar ist, da die Temperaturen nach dem vierten Zyklus, in welchem die Seilklemme umgebaut wurde, wieder stark abnahmen.

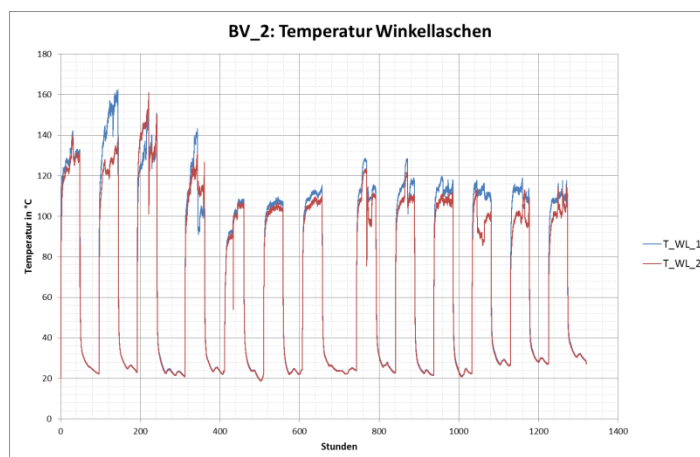


Diagramm 3-17 – BV 2: Temperaturverlauf an den Winkellaschen

Ersichtlich ist auch der Temperatureinbruch im letzten Drittel des vierten Zyklus, bedingt durch den installierten Ventilator. Im weiteren Verlauf zeigt sich, dass die Winkellasche an der Seite P1 eine geringere Erwärmung erfährt, als die Winkellasche auf der Seite P2/A. Dies konnte bereits beim ersten Belastungsversuch beobachtet werden, siehe Kapitel 3.2.3,

<sup>4</sup> Für eine bessere Differenzierbarkeit der Aufnahmen, wurden alle Thermographiebilder mit derselben Temperaturbereichsskala von 40 °C bis 250 °C versehen.

Diagramm 3-4. Thermoaufnahmen während der Zyklen, wie in den nachfolgenden 2 Bildern, zeigten das gleiche Bild.

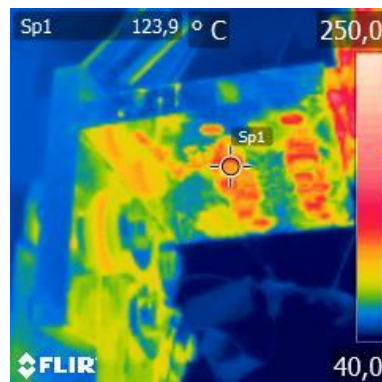


Bild 3-39 – BV 2: Thermographie  
Winkellasche P1

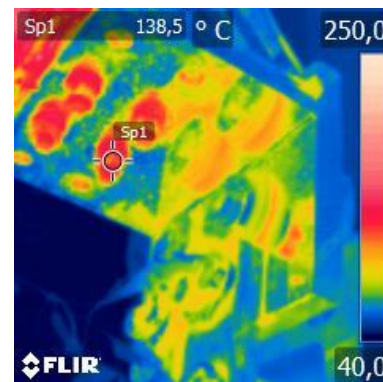


Bild 3-40 – BV 2: Thermographie  
Winkellasche P2/A

Unter der Annahme, dass die Winkellaschen aus blankem Aluminium gefertigt sind, tritt an diesen zudem eine permanente Grenzwertüberschreitung der Übertemperatur auf, welche für blankes Aluminium bei 50 K liegen.

## Verbindungslaschen

Wie bereits in Kapitel 3.3.1, Diagramm 3-14 ersichtlich ist, wurden die ersten 4 Zyklen nicht mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom von 3150 A, sondern mit einem verminderten Strom von etwa 2500 A durchgeführt. Die Ursache hierfür war das Auftreten einer hohen Übertemperatur an einer der Verbindungslaschen, wie in Diagramm 3-18 während des ersten Zyklus zu sehen ist. Dieser erste Zyklus ist zudem separat in Diagramm 3-19 dargestellt.

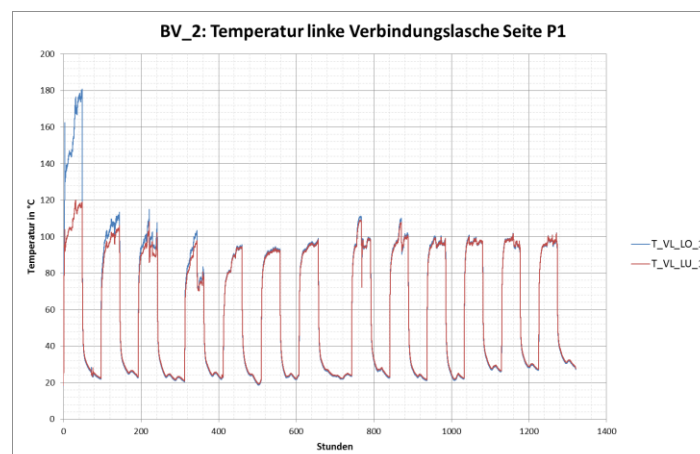
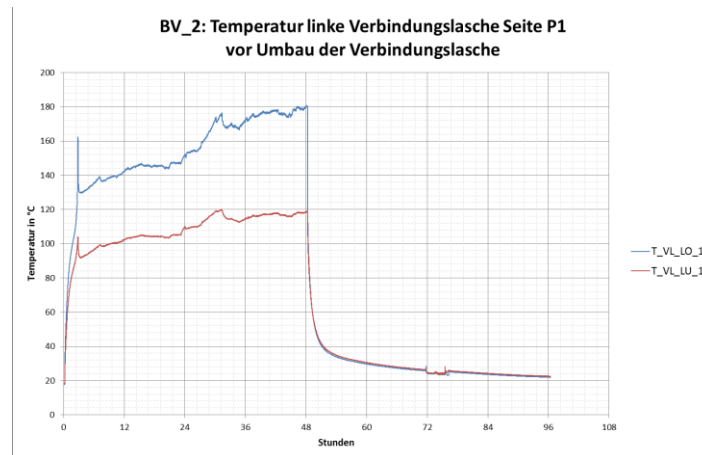


Diagramm 3-18 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungslasche links auf Seite P1

Wie im nächsten Diagramm zu erkennen ist, stieg die Temperatur an dieser Stelle auf über 180 °C. Als Ursache wurde eine starke Kontaktdegradierung vermutet, was sich später beim

Umbau der Komponenten bestätigte.



**Diagramm 3-19 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungslasche links auf Seite P1 vor dem Umbau**

Bei der Demontage der Verbindungslasche konnte keine deutliche Kraftminderung der Anzugsmomente der Schraubverbindungen festgestellt werden. Wie in Bild 3-41 und Bild 3-42 zu sehen ist, wies die Verbindungslasche jedoch praktisch an der gesamten Oberfläche, mit Ausnahme der Kontaktfläche zum Primärleiter, ausgeprägte Fremdschichten auf.



**Bild 3-41 – BV 2: Verbindungslasche (vorne) vor Umbau**



**Bild 3-42 – BV 2: Verbindungslasche (hinten) vor Umbau**

Die Kontaktstelle an der Winkellasche wies ebenfalls einen deutlichen Fremdschichtbelag auf, wie in Bild 3-43 zu sehen ist.



**Bild 3-43 – BV 2: Kontakt Winkellasche vor Umbau**



**Bild 3-44 – BV 2: Kontakt Primärleiter vor Umbau**



Nach der Demontage wurden die Fremdschichten mit Hilfe einer feinen Drahtbürste und Isopropanol entfernt. Die Bilder Bild 3-45 bis Bild 3-48 zeigen den Zustand der Kontaktwerkstücke nach dem Umbau. Nach der Reinigung konnten zwischen den Schraubenbohrungen, welche in Kontakt mit der Beilagscheibe standen, Veränderung der Materialoberflächenbeschaffenheit festgestellt werden.



**Bild 3-45 – BV 2: Verbindungsplatte (vorne) nach Umbau**



**Bild 3-46 – BV 2: Verbindungsplatte (hinten) nach Umbau**

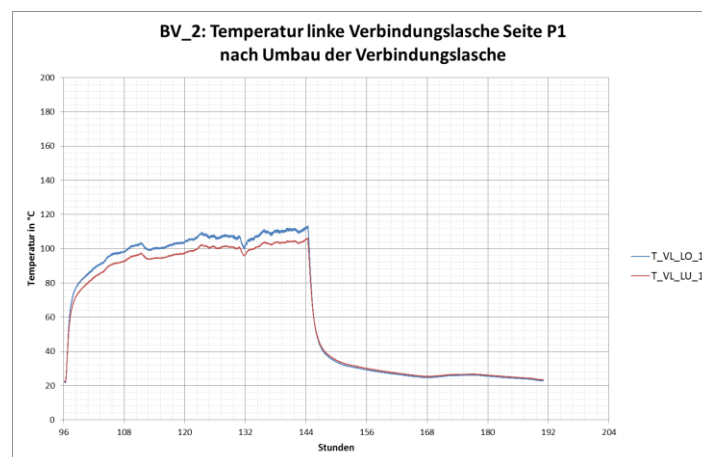


**Bild 3-47 – BV 2: Kontakt Winkelplatte nach Umbau**



**Bild 3-48 – BV 2: Kontakt Primärleiter nach Umbau**

In Diagramm 3-20 ist der Temperaturverlauf des zweiten Zyklus an der betroffenen Komponente dargestellt.



**Diagramm 3-20 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsplatte links auf Seite P1 nach dem Umbau**

Der Umbau führte zu einer deutlichen Verringerung der Temperatur an der Verbindungsflasche. Diese sank im Zuge der folgenden Zyklen weiter und unterschritt in weiterer Folge die 100 °C – Marke trotz gesteigerten Belastungsstroms.

An der rechten Verbindungsflasche sanken die Temperaturen nach dem Umbau ebenfalls unter die 100 °C – Marke und wiesen somit während des weiteren Versuches nach dem dritten Zyklus keine erneute Grenzwertüberschreitung der Übertemperatur laut [25] auf. Diagramm 3-21 zeigt den Temperaturverlauf an dieser Verbindungsflasche.

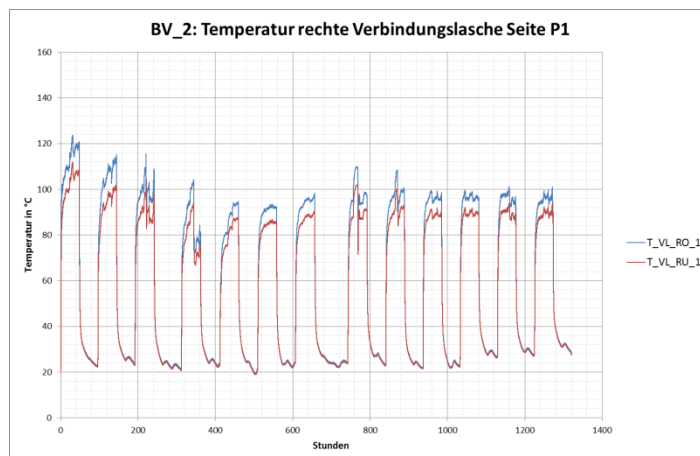


Diagramm 3-21 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P1

Auf der Seite P2/A wies dieselbe Verbindungsflasche, abgesehen vom ersten Zyklus, einen weitgehend ähnlichen Temperaturverlauf, siehe Diagramm 3-22. Hier lässt sich lediglich, wie bereits während des ersten Versuches, ein etwas deutlicherer Temperaturunterschied zwischen den beiden Thermoelementen feststellen, als bei den übrigen Verbindungsflaschen.

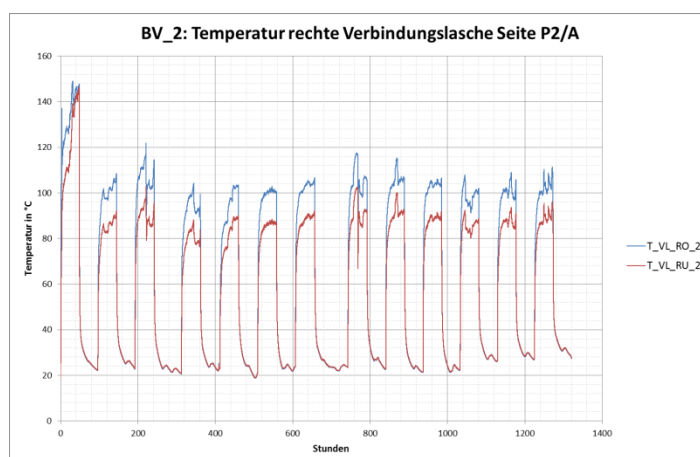


Diagramm 3-22 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P2/A

Abschließend zeigt Diagramm 3-23 den Temperaturverlauf an der linken Verbindungsflasche an der Seite P2/A. Auch hier kam es nach dem dritten Zyklus zu keiner deutlichen Überschreitung der Übertemperatur mehr.

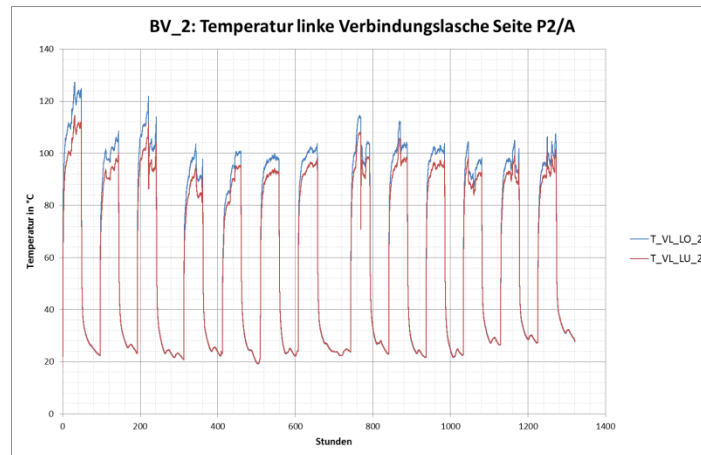


Diagramm 3-23 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsglasche links auf Seite P2/A

### Mineralöl, Dichtungen und Gehäuse

Prämisse für den Versuch war eine stetige Ölvolumentänderung. Anhand von Diagramm 3-24 ist gut ersichtlich, dass dies bei 48 Stunden für etwa  $3 \tau$ , entsprechend einer Exponentialfunktion, gegeben war.

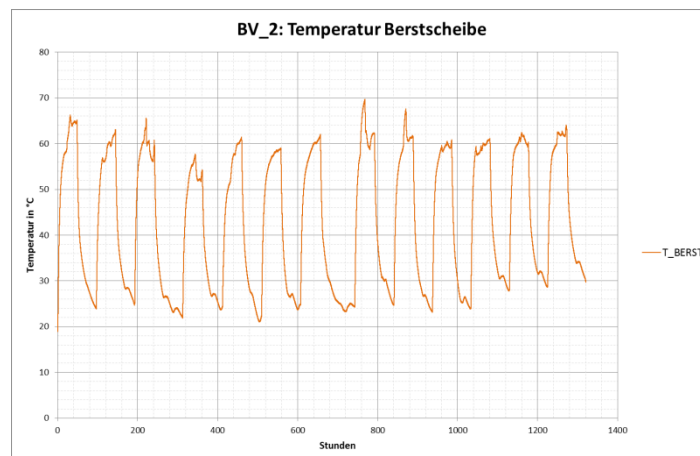


Diagramm 3-24 – BV 2: Temperaturverlauf des Mineralöls

Wie eingangs zu diesem Kapitel bereits erwähnt, kam es während des achten und neunten Zyklus zu einem Ausfall des Luftbefeuchters und damit zu einem Verlust an Kühlleistung. Dies ist auch an der erhöhten Temperatur des Mineralöls während diesen Zyklen zu erkennen. Während des vierten Zyklus wurde aufgrund der hohen Seilklemmentemperatur kurzzeitig ein Ventilator in der Prüfkabine installiert, um ein weiteres Ansteigen der Temperatur zu verhindern. Dies führte aber durch die zusätzliche, erzwungene Konvektion zu einer verstärkten Kühlung des Wandlergehäuses und damit auch zu einer Reduzierung der Öltemperatur.

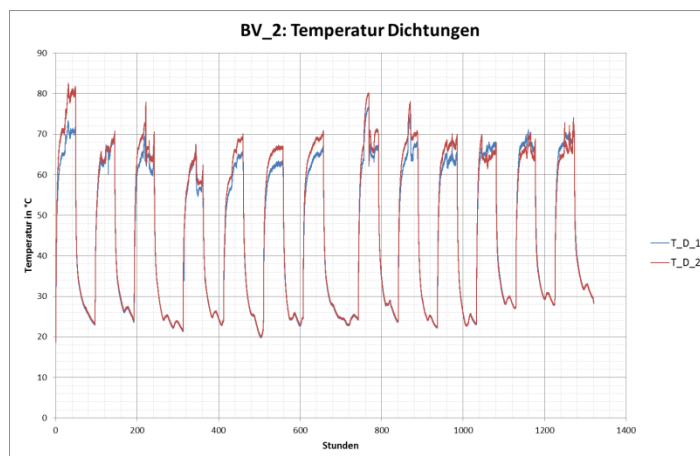


Diagramm 3-25 – BV 2: Temperaturverlauf der Dichtungen

Am Wandlergehäuse befanden sich keine Thermoelemente, dennoch wurde die Oberflächentemperatur regelmäßig mit Hilfe eines Infrarotthermometers oder mittels Thermokamera, siehe Bild 3-49 und Bild 3-50, bestimmt, um etwaige Übertemperaturen festzustellen. Dies war jedoch für den gesamten Versuchszeitraum nicht gegeben.

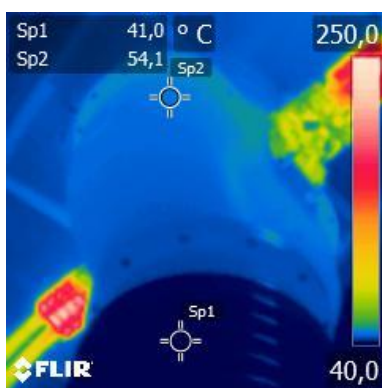


Bild 3-49 – BV 2: Thermographie Wandlerkopf

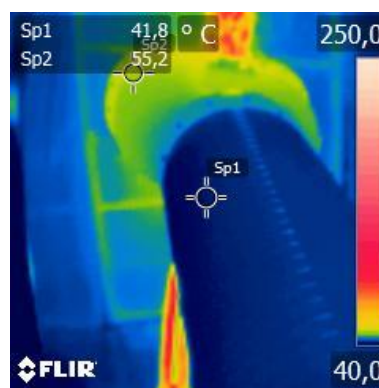


Bild 3-50 – BV 2: Thermographie Isolator und Kopf

## Zusammenfassung

Während des Belastungsversuchs unter erhöhter Luftfeuchtigkeit traten zwei Kontaktprobleme im Bereich der Winkel- beziehungsweise Verbindungslaschen und der Seilklemme auf. Erneut ergab sich hier ein Fehler im Bereich der Kupfer-Aluminium-Kontaktstellen. Es zeigt sich, dass ein Fehler an einer Komponente nicht unerhebliche Rückwirkungen auf die anderen Komponenten haben kann.

Die Komponenten der Hauptstrombahn wiesen zu Beginn bedingt durch Kontaktprobleme sehr hohe Temperaturen auf, die im Laufe der Zyklen wieder sanken. Dennoch konnte an einigen Stellen der Hauptstrombahn eine Grenzwertüberschreitung der Übertemperatur festgestellt werden. Diese sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7 – Übertemperaturaufkommen bei den Stromzyklen unter erhöhter Luftfeuchtigkeit

| Komponente | Übertemperaturaufkommen während Zyklen |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | 1                                      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     |
| WL_1       | Red                                    | Red    | Red    | Red    | Yellow | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange |
| WL_2       | Red                                    | Red    | Red    | Red    | Yellow | Yellow | Yellow | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange |
| VL_RO_1    | Red                                    | Yellow | Yellow | Yellow | Green  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| VL_RO_2    | Red                                    | Yellow | Orange | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| VL_RU_1    | Orange                                 | Yellow | Yellow | Yellow | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| VL_RU_2    | Red                                    | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| VL_LO_1    | Red                                    | Yellow | Yellow | Yellow | Green  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| VL_LO_2    | Red                                    | Yellow | Orange | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| VL_LU_1    | Red                                    | Yellow | Yellow | Yellow | Green  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| VL_LU_2    | Orange                                 | Green  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |

|   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black;"></span> $\Delta T < 50 \text{ K}$ | <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #FFFF00; border: 1px solid black;"></span> $50 \text{ K} < \Delta T < 65 \text{ K}$ | <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #FFA500; border: 1px solid black;"></span> $65 \text{ K} < \Delta T < 75 \text{ K}$ | <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black;"></span> $\Delta T > 75 \text{ K}$ |
|---|--|--|---|

Diagramm 3-26 zeigt die gemittelten Temperaturen der Komponenten der Hauptstrombahn während der unterschiedlichen Zyklen. Auch hier lassen sich deutlich die Temperaturüberschreitungen der beiden Winkellaschen sowie die verhältnismäßig niederen Temperaturen der Verbindungsfaschen VL\_RU\_1 und VL\_RU\_2 erkennen.

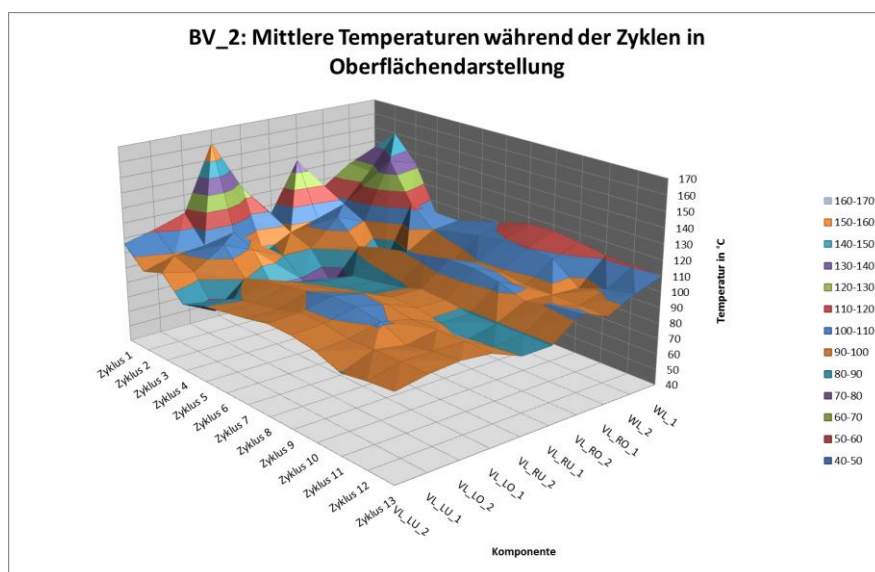


Diagramm 3-26 – BV 2: Mittlere Temperaturen der Hauptstrombahnkomponenten während Zyklen

## 3.4 Vergleichsuntersuchungen

Um die Auswirkungen der Belastungsversuche auf das Isolationssystem zu untersuchen, wurden begleitend zu den Belastungsversuchen Vergleichsmessungen zwischen dem thermisch belasteten Kombiwandler, in diesem Kapitel als Testobjekt bezeichnet, und einem unbelasteten baugleichen Kombiwandler, in diesem Kapitel als Referenzobjekt bezeichnet, in Form von Teilentladungs- und Verlustfaktormessungen, durchgeführt. Der Aufbau, die Durchführung und die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in diesem Kapitel behandelt. Auf eine detaillierte Erläuterung der Messmethoden wird hier jedoch nicht eingegangen, sondern auf die Literatur, im Speziellen [17], verwiesen.

### 3.4.1 Prüfaufbau

Für die Konditionierung und die Vergleichsmessungen mussten entsprechende Prüfungsaufbauten gemacht werden, die hier kurz beschrieben werden.

#### Teilentladungs- und Verlustfaktormessung

Die Prüfungen, welche im Zuge der Vergleichsuntersuchungen durchgeführt wurden, mit Ausnahme der Konditionierung des Referenzobjektes, erfolgten im Nikola Tesla Labor des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement. Der Prüfaufbau für die Teilentladungsmessung ist als Prinzipschaltbild in Bild 3-51 und als Realaufbau in Bild 3-52 dargestellt.

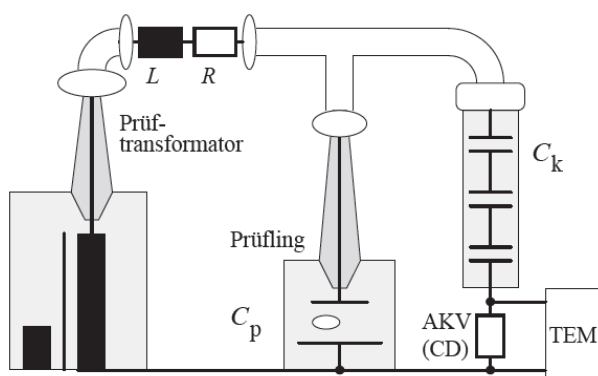


Bild 3-51 - Teilentladungsmessaufbau Prinzipschaltbild [17]

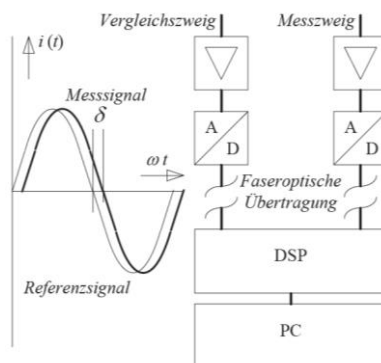


Bild 3-52 – Realer Messaufbau mit Koppelkondensator(links), Prüfling und Prüftrenntransformator (rechts)

Neben dem Prüftrenntransformator und dem Koppelkondensator wurde ein TE-Messsystem der Firma Power Diagnostix Systems vom Typ ICMsystem, inklusive Ankoppelvierpol CIL4, und Vorverstärker HST1B verwendet. Die Aufzeichnung erfolgte mittels zugehöriger Software.



Für die Verlustfaktormessung wurde der Teilentladungsmessaufbau abgeändert. Es wurde ein computerbasierendes Messsystem verwendet, welches die Phasenverschiebung der Ströme aus einem Vergleichszweig, mit dem Vergleichskondensator und einem Messzweig, mit dem Kombiwandler, bestimmt und daraus den Verlustfaktor ermittelt. Das Prinzipschaltbild ist im folgenden Bild dargestellt.



**Bild 3-53 – Verwendetes Verlustfaktormessprinzip [17]**

Als Messsystem wurden ein MCU, zwei MPD 600 sowie zwei MPP 600 vom Hersteller Omicron, sowie dessen MPD-Software verwendet. Der Prüfaufbau für die Verlustfaktormessung sowie der Gesamtaufbau sind in den Bildern Bild 3-54 und Bild 3-55 gezeigt.



**Bild 3-54 – Verlustfaktormessaufbau**



**Bild 3-55 – Gesamtaufbau mit beiden Wandlern**

## Konditionierung

Da es sich bei dem Referenzobjekt um einen Wandler, welcher im Netz als Reserve diente, handelte, wurde dieser nach der ersten Vergleichsmessung mit Nennspannung konditioniert. Die Konditionierung des Referenzobjekts, welches in Bild 3-58 zu sehen ist, erfolgte über

einen Hochspannungsprüftransformator in Mantelbauweise, dargestellt in Bild 3-56. Der Wandler wurde hierbei für 1000 Stunden mit der Nennspannung beaufschlagt.



Bild 3-56 – 400 kV  
Prüftransformator



Bild 3-57 – Verbindungsisolator



Bild 3-58 – Kombiwandler mit  
Schirmelektroden

### 3.4.2 Prüfungsdurchführung

Die Vergleichsuntersuchungen erfolgten in zwei Teilen. Die erste Untersuchung wurde nach Abschluss des Belastungsversuches BV\_1: Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur, siehe Kapitel 3.2, und vor der Konditionierung des Referenzobjekts durchgeführt. Die zweite Untersuchung folgte nach dem Belastungsversuch BV\_2: Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit, siehe Kapitel 3.3, und stellte den letzten Untersuchungsschritt dar.

Eingangs seien in folgender Tabelle einige charakteristische Spannungswerte laut [25] für den Prüfling angeführt.

Tabelle 3-8 – Spannungswerte für 220 kV Kombiwandler

| Spannungsart                        | Kurzzeichen | Spannungswert in kV |
|-------------------------------------|-------------|---------------------|
| Nennspannung                        | $U_n$       | 220                 |
| Höchste Spannung für Betriebsmittel | $U_m$       | 245                 |
| Bemessungs-Stehwechselspannung      | $U_p$       | 395 / 460           |

Für die Durchführung der Teilentladungsmessung bei Messwandlern gibt es grundsätzlich unterschiedliche Empfehlungen beziehungsweise Vorgaben. Hier seien 2, nämlich die Teilentladungsmessung nach DIN EN 61869, sowie nach Wandlerrausschuss, angeführt.



### Teilentladungsmessung nach DIN EN 61869

Die Prüfspannungen und Teilentladungsgrenzwerte für die Prüfobjekte, welche die Norm DIN EN 61869 vorschreibt, sind, angelehnt an [25], Tabelle 3, in folgender Tabelle angeführt.

Tabelle 3-9 – Teilentladungsprüfspannung und Grenzwerte angelehnt an DIN EN 61869

| Teilentladungsprüfspannung | Teilentladungsgrenzwert in pC |
|----------------------------|-------------------------------|
| $U_m$                      | 10                            |
| $1,2 U_m / \sqrt{3}$       | 5                             |

Laut Norm sind diese Spannungsstufen, nach einer 60 sekundigen Formierung mit der Bemessungs-Stehwechselfspannung, oder bei wiederholter Prüfung mit 80 Prozent der Bemessungs-Stehwechselfspannung, für jeweils 30 Sekunden an den Prüfling zwischen Leiter und Erde zu legen und die Teilentladungspegel zu messen.

### Teilentladungsmessung nach Empfehlung des Wandlerrausschusses

Neben der Teilentladungsmessung nach Norm, gibt es auch ein Teilentladungsprüfverfahren nach Empfehlung des Wandlerrausschusses. Dieses ist sowohl von den Prüfspannungen, als auch von der Prüfdauer wesentlich umfangreicher und anspruchsvoller für den Prüfling. Die Werte sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-10 – Teilentladungsmessverfahren nach Wandlerrausschuss

| Prüfspannung | Teilentladungsgrenzwert in pC | Beanspruchungsdauer in min |
|--------------|-------------------------------|----------------------------|
| $U_m$        | Grundstörpegel                | -                          |
| $1,2 U_m$    | 10                            | 3                          |
| $0,8 U_p$    | 20                            | 1                          |
| $U_p$        | 30                            | 1                          |
| $0,8 U_p$    | 20                            | 1                          |
| $1,2 U_m$    | 10                            | 3                          |

### Erste Teilentladungsmessung

Für die erste Teilentladungsmessung wurde zu Beginn der Untersuchungen eine Prüfung nach [25] angestrebt. Erst im Verlauf der Prüfungen und Versuche kam vom Auftraggeber eine Anfrage nach der Möglichkeit einer verschärften Wandlerprüfung. Da das Testobjekt zum Zeitpunkt der ersten Vergleichsuntersuchung bereits mit einer Vielzahl von thermischen

Belastungsstunden beaufschlagt wurde und der Zustand des Isolationssystems nicht eindeutig bekannt war, wurde zu Beginn eine Teilentladungsmessung bei reduzierten Spannungspegeln durchgeführt. Dabei wurden die Spannungen aus Tabelle 3-8 um den Faktor  $1/\sqrt{3}$  vermindert.

Zu Beginn wurden diese Spannungswerte für die laut [25] empfohlene Dauer an den Prüfling gelegt. Dabei konnte aber keine nennenswerte Teilentladungsaktivität festgestellt werden. Darum wurde die Prüfungsdauer, im Speziellen die Formierungsphase, aufgrund der reduzierten Spannungspegel auf 30 Minuten angehoben, gefolgt von den beiden Teilentladungsprüfspannungsstufen zu je 60 Sekunden.

### **Erste und zweite Verlustfaktormessung**

Für die Verlustfaktormessungen wurde die Spannung am Prüfling von 0 kV bis 150 kV in 10 kV-Schritten erhöht, wobei der Prüfling mit jeder Spannungsstufe für 30 Sekunden beaufschlagt wurde. In dieser Zeit erfolgte die Messung und Aufzeichnung des Verlustfaktors. Aus den gemessenen Werten wurde später für jede Spannungsstufe der Mittelwert gebildet und anschließend über der Spannung aufgetragen.

### **Zweite Teilentladungsmessung**

Bei der zweiten Teilentladungsmessung wurde zu Beginn gleich vorgegangen wie bereits bei der ersten Messung. Da dies jedoch die abschließende Untersuchung darstellte, wurde daraufhin die Teilentladungsmessung mit Normspannungspegeln wiederholt. Die dabei aufgetretene Spannungsverzerrung durch den induktiven Prüfling führte jedoch zu einer starken Beeinträchtigung der Spannungsregelungsgeschwindigkeit der Hochspannungswechselstromkaskade, weshalb die Spannungspegel nur sehr langsam erreicht werden konnten. Desweiteren verhinderte dies auch das Erreichen der Bemessungs-Stehwechselfspannung. Im Normalfall wird diese Art von Prüfling bei erhöhter Frequenz geprüft, da die Wechselfspannungskaskade des Instituts für Hochspannungstechnik zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung jedoch nicht frequenzvariabel war, musste vom regulären Normprüfungsablauf abgewichen werden.

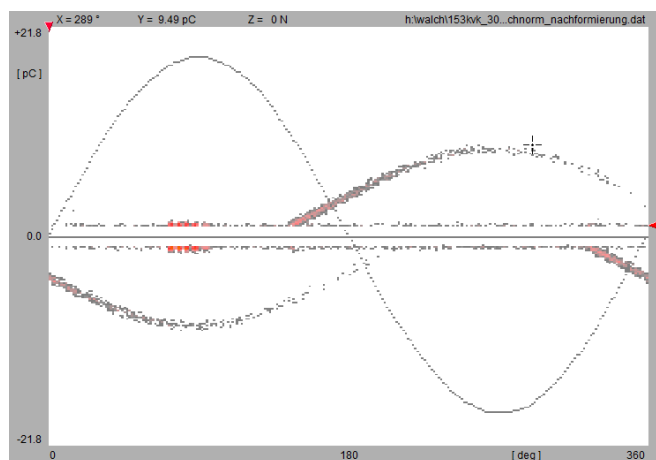
### **3.4.3 Auswertung**

Trotz eingangs reduzierter Spannung konnten Grenzwertüberschreitungen der Teilentladungspegel am Prüfling nachgewiesen werden. Diese sollen hier diskutiert werden.

### **Erste Teilentladungs- und Verlustfaktormessung**

Bild 3-59 zeigt das phasenaufgelöste Teilentladungsmuster des Referenzobjektes. Man

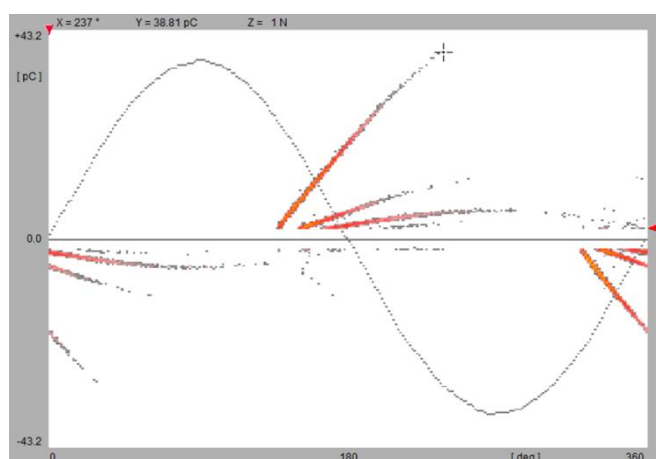
erkennt den deutlichen, sichelförmigen Verlauf der Teilentladung. Dieser ist typisch für Hohlräume, beziehungsweise Löcher im Isolationssystem, was bei einer Öl-Papierisolierung nicht ungewöhnlich ist.



**Bild 3-59 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts vor der Konditionierung**

Diese Form der Teilentladung kann im Allgemeinen als wenig kritisch eingestuft werden. Der Teilentladungspegel liegt im Bereich des Spannungsnulldurchganges bei etwa 5 pC. Wirft man einen Blick auf die Grenzwerte in Tabelle 3-9 sieht man, dass diese eingehalten werden, jedoch muss bedacht werden, dass die angelegten Spannungswerte wesentlich unter jenen, welche die Norm vorgibt, liegen. Der Wandler kann in diesem Fall dennoch als unkritisch betrachtet werden.

Das nächste Bild, Bild 3-60, zeigt das Teilentladungsmuster des Testobjektes nach demselben Teilentladungsmessverfahren welches bereits beim Referenzobjekt angewendet wurde.



**Bild 3-60 – PRPD-Pattern des Testobjekts vor Belastungsversuch 2**

Hier ist ein mehrfaches, sichelförmiges Muster erkennbar, welches auf ein Grenzschichtproblem, zum Beispiel durch Delamination der Papierlagen, hinweist. Diese sind für ein Isolationssystem als kritisch zu betrachten. Zudem überschreiten die

Teilentladungspegel mit über 30 pC nicht nur die Grenzwerte aus Tabelle 3-9, sondern auch aus Tabelle 3-10 und dies, obwohl die angelegten Spannungen deutlich geringer sind, als in beiden Tabellen vorgegeben. Auch das Ergebnis der Verlustfaktormessung weist beim Testobjekt, in Diagramm 3-27 in rot dargestellt, einen, im Verhältnis zum Referenzobjekt, deutlich schlechteren Zustand des Isolationssystems auf.

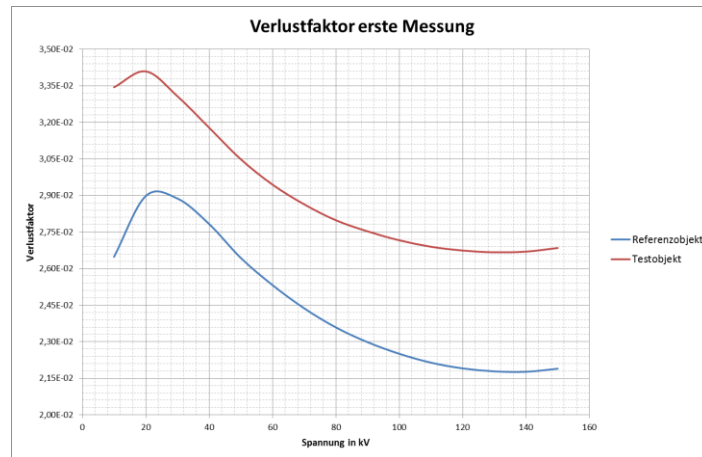


Diagramm 3-27 – Ergebnisse der ersten Verlustfaktormessung

Der Verlustfaktor des Testobjektes liegt hierbei um rund 20 Prozent höher, als jener des Referenzobjektes.

### Zweite Teilentladungs- und Verlustfaktormessung

Nach dem Belastungsversuch 2 wies das Testobjekt zunächst das in Bild 3-61 dargestellte Teilentladungsmuster auf. Wie in diesem Bild ersichtlich ist, kam es erneut zu Grenzwertüberschreitungen, vor allem in Anbetracht der Tatsache der wesentlich verminderten Spannung.

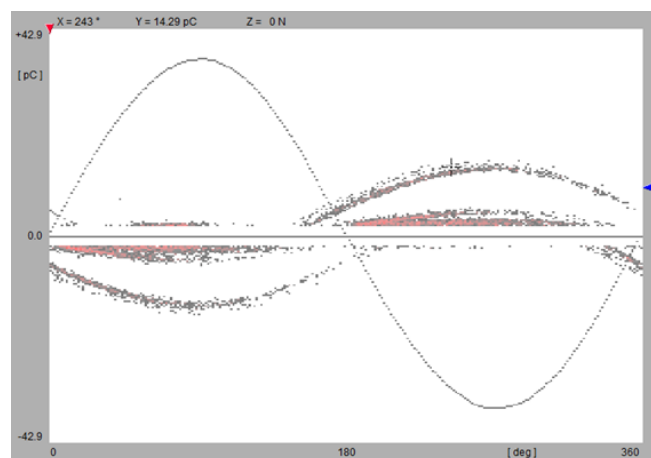
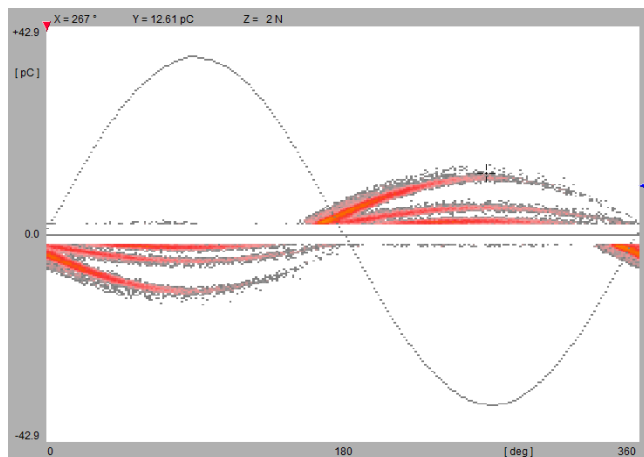


Bild 3-61 – PRPD-Pattern des Testobjekts nach Belastungsversuch 2

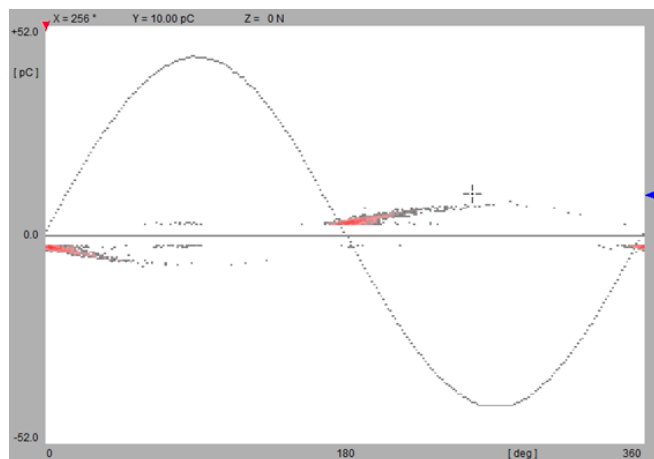
Die Messung wurde daraufhin wiederholt. Nach einer 30 minütigen Formierung ergab sich schließlich folgendes Bild.



**Bild 3-62 – PRPD-Pattern des Testobjekts nach Belastungsversuch 2**

Die Pegel sind grundlegend ident mit jenen aus Bild 3-61, jedoch lässt sich die mehrfache Sichelform besser erkennen, die sich über den verlängerten Spannungsbeaufschlagungszeitraum ausbilden konnte.

Das Referenzobjekt wies nach der Konditionierung ähnliche hohe Teilentladungspegel wie bei der ersten Vergleichsuntersuchung auf, jedoch weniger stark ausgeprägt, was der Vergleich zwischen Bild 3-59 und Bild 3-63 zeigt.



**Bild 3-63 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts nach der Konditionierung**

Nach Abschluss der Messung bei reduzierten Spannungspegeln wurde die Spannung konsequent erhöht, mit dem Ziel die Spannungswerte aus Tabelle 3-9 beziehungsweise Tabelle 3-10 zu erreichen. Eine Formierung mit der Bemessungs-Stehwechselfspannung war aufgrund der zunehmenden Spannungsverzerrung und der damit einhergehenden Regelungsschwierigkeiten des Prüftransformators nicht möglich, weshalb die Messung mit der höchsten erreichbaren Prüfspannung von 285 kV begonnen wurde.

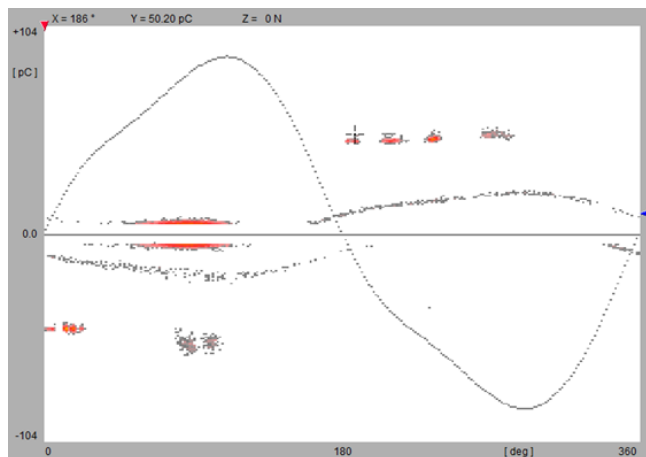


Bild 3-64 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts bei 285 kV

Bild 3-64 zeigt das Teilentladungsmuster des Referenzwandlers bei dieser Spannung. Die Teilentladungen weisen Höchstpegel von etwa 50 pC auf, was einer Grenzwertüberschreitung entsprechen würde, jedoch ist das Muster nicht eindeutig. Gut erkennbar ist jedoch die Spannungsverzerrung durch die induktive Last, welche der Wandler darstellt.

Bei der höchsten Spannung für das Betriebsmittel, siehe Bild 3-65, bleiben die Teilentladungspegel praktisch gleich, nur deren Häufigkeit nimmt ab.

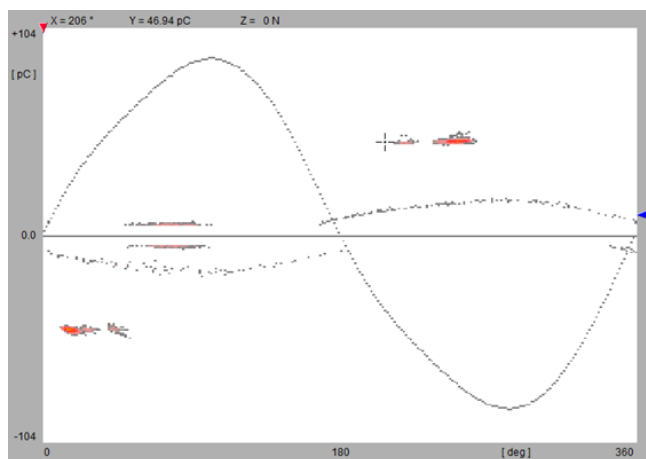


Bild 3-65 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts bei  $U_m$

Das Referenzobjekt wies bei erhöhten Spannungspegeln zusätzlich zum Teilentladungsmuster aus den vorhergegangenen Versuchen mit verminderter Spannung, Teilentladungen mit höherem Pegel und unterschiedlichen Muster auf.

Nach demselben Schema wurde anschließend beim Testobjekt vorgegangen. Dieses wies zuerst keine Auffälligkeiten beim Teilentladungsverhalten auf. Erst beim Überschreiten von 260 kV bildeten sich starke Teilentladungen im Bereich mehrerer hundert pC aus. Bild 3-66 zeigt das Teilentladungsmuster bei 285 kV.

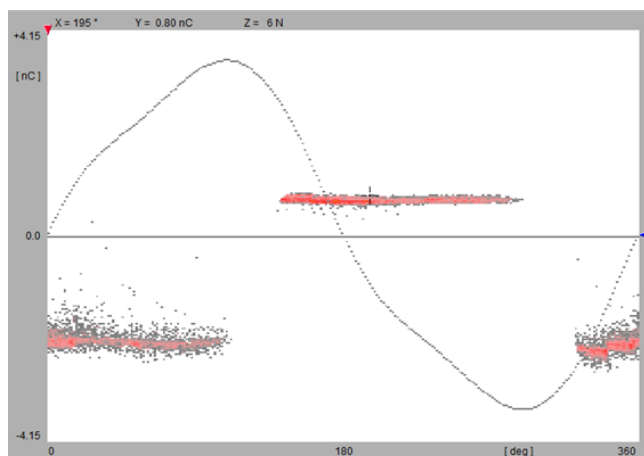


Bild 3-66 – PRPD-Pattern des Testobjekts bei 285 kV

Darin sind die Teilentladungen, welche auf einer annähernd waagerechten Linie angeordnet sind, mit Pegeln im Bereich von 800 pC gut erkennbar. Diese setzen reproduzierbar beim Überschreiten von etwa 260 kV ein und beim Unterschreiten vom selben Spannungswert auch wieder aus. Diese Muster weisen für Gewöhnlich auf Funken- beziehungsweise Kriechwegbildung oder schwebendes Potential (floating potential) hin und sind nicht unkritisch für das Isolationssystem.

Bei der höchsten Spannung für das Betriebsmittel traten beim Testobjekt hingegen nur geringfügige Teilentladungen auf, welche allesamt unter den von [25] und [26] geforderten Grenzwerten lagen, siehe hierfür Bild 3-67.

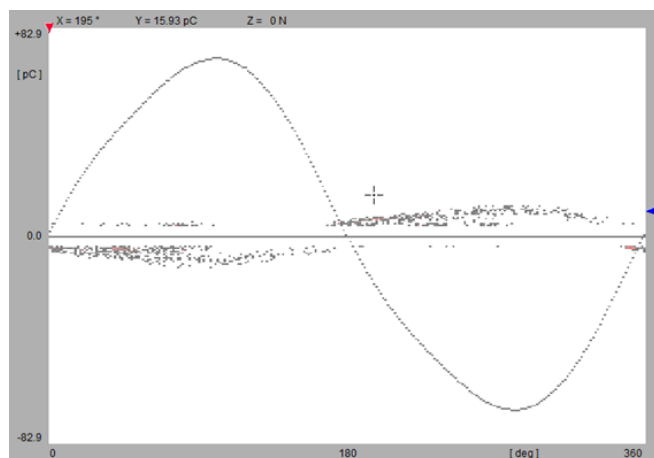


Bild 3-67 – PRPD-Pattern des Testobjekts bei  $U_m$

Auch die Ergebnisse der zweiten Verlustfaktormessung, welche in Diagramm 3-28 dargestellt sind, lieferten im Vergleich zur ersten Verlustfaktormessung keine neuen Erkenntnisse, da diese praktisch unverändert blieben.

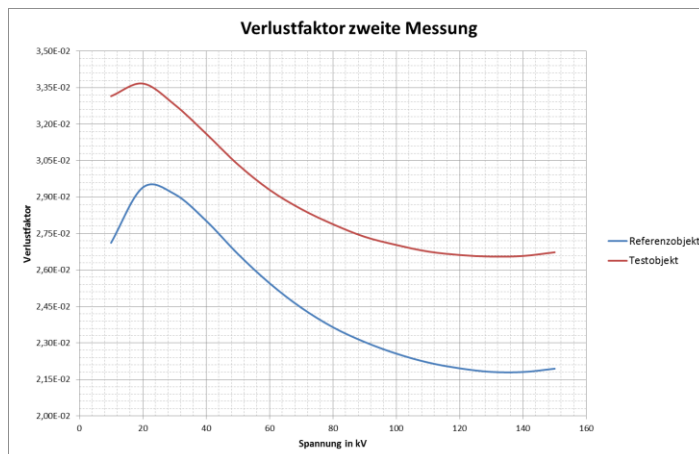


Diagramm 3-28 – Ergebnisse der zweiten Verlustfaktormessung

## Zusammenfassung

Während der ersten Vergleichsuntersuchung wurden die Wandler nur mit verminderter Spannung geprüft. Dabei ließen sich beim Referenzobjekt keine nennenswerten Teilentladungen feststellen, beim Testobjekt jedoch sehr wohl. Die Muster wiesen damals auf ein Grenzschichtproblem, zum Beispiel verursacht durch die Delamination von Papierlagen infolge des thermischen Belastungsversuches, hin.

Die zweite Vergleichsuntersuchung zeigte beim Testobjekt starke Anzeichen für die Ausbildung einer Kriechstrecke, während das Referenzobjekt einen ähnlichen aber wesentlich weniger stark ausgeprägten Verlauf aufwies.

Die Verlustfaktormessung ergab einen um etwa 20 Prozent erhöhten Verlustfaktor beim Testobjekt im Vergleich zum Referenzobjekt, welcher über den Zeitraum der Vergleichsuntersuchungen praktisch unverändert blieb.

Angemerkt sei an dieser Stelle noch, dass die Prüfzeiten, welche die Norm DIN EN 61869 vorgibt, bei den durchgeführten Untersuchungen unzureichend kurz gewesen wären, da sich einige der Teilentladungsaktivitäten erst nach ein paar Minuten nachweisen ließen.

## 3.5 Untersuchung des Mineralöls

Um eine Aussage über den Zustand des Isolationssystems machen zu können, ist es nötig das Öl des Wandlers in regelmäßigen Abständen, beziehungsweise zu kritischen Zeitpunkten zu entnehmen und auf seinen Zustand zu analysieren. Der kritischste Faktor ist hierbei der Feuchtigkeitsgehalt des Mineralöls.



### 3.5.1 Bestimmung der Ölfeuchtigkeit

Während des Belastungsversuchs unter erhöhter Umgebungstemperatur wurden regelmäßig Ölproben zu je 10 ml vom Wandler entnommen und deren Wassergehalt beziehungsweise Feuchtigkeit mittels coulometrischer Karl-Fischer- Titration festgestellt. Verwendet wurde hierfür das System Titrando 851 des Herstellers Metrohm. Die Ergebnisse dieser Feuchtigkeitsmessung für den Belastungsversuch 1 sind in Diagramm 3-29 dargestellt, wobei die Ölfeuchte in blau und die Öltemperatur in rot zu sehen ist.

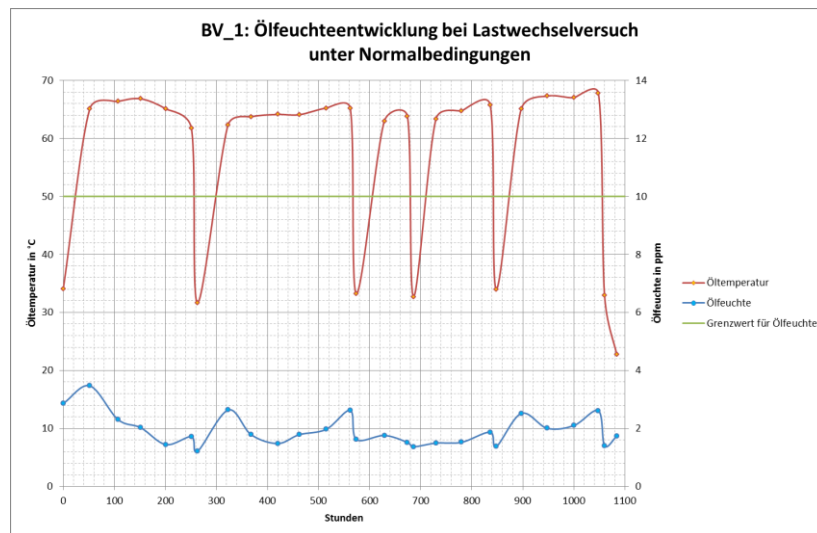


Diagramm 3-29 – BV 1: Zeitliche Entwicklung der Ölfeuchtigkeit

Diagramm 3-30 zeigt die Entwicklung der Ölfeuchte während des Belastungsversuchs 2 bei wechselnden Zyklen unter erhöhter Luftfeuchtigkeit.

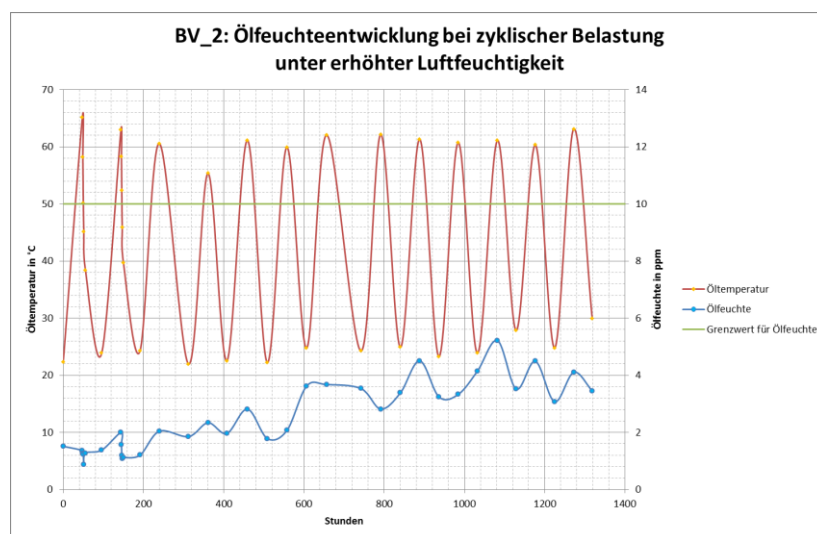


Diagramm 3-30 – BV 2: Zeitliche Entwicklung der Ölfeuchtigkeit

In beiden Ölfeuchtediagrammen wurde zudem in Grün der Grenzwert für die Ölfeuchte nach IEC 61181:2007 mit 10 ppm eingezeichnet. Die Ölfeuchte wurde mittels Karl-Fischer-Titration bestimmt, welche allerdings einer gewissen Ungenauigkeit unterliegt. [28] zählt dabei folgende Faktoren auf

- Bei der Probenentnahme dringt immer Feuchtigkeit aus der Atmosphäre ein
- Unbekannter Einfluss der Öladditiven auf das Ergebnis
- Zellulose bindet Wasser mit unterschiedlicher Stärke, was bedeutet, dass selbst bei hohen Temperaturen nicht sicher ist, dass alles Wasser ausgeheizt wurde.

Dem kommt noch hinzu, dass das Karl-Fischer System nicht beliebig kleine Wasserkonzentrationen messen kann. Die meisten Hersteller geben dabei eine untere Grenze von 0,001 % an, was bei einer Probe von einem mg 10 ppm entspricht, wobei man aus Erfahrung weiß, dass Werte ab etwa 5 ppm ebenfalls gemessen werden können, wenn auf einen adäquat niedrigen und stabilen Drift des Systems geachtet wird. Mit entsprechender Probengröße lassen sich, zumindest theoretisch, sogar Werte bis zu 1 ppm bestimmen.

### 3.5.2 Bestimmung der Papierfeuchtigkeit

Da keine Papierprobe vom Prüfling entnommen werden konnte, wurde die Papierfeuchtigkeit mit Hilfe der drei in den Grundlagen vorgestellten, gängigen Methoden bestimmt. Deren Ergebnisse sollen in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert werden.

#### Unter Anwendung der Gleichgewichtskurven

Für die Anwendung der Gleichgewichtskurven genügt es den Feuchtegehalt des Öls und dessen Temperatur zu messen und damit die Feuchte im Papier zu ermitteln. Für die Bestimmung wurde jeweils das Maximum aus dem Belastungsversuch 1 und 2 ausgewählt. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Kurven sind in folgender Tabelle angeführt.

Tabelle 3-11 - Ergebnisse der Papierfeuchte unter Anwendung der Gleichgewichtskurven

| Kurve        | BV_1: 3,47 ppm; 65 °C | BV_2: 5,2 ppm; 61 °C |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| Oommen       | 0,6 %                 | 0,9 %                |
| Fabre-Pichon | 0,6 %                 | 1 %                  |
| Griffin      | 0,6 %                 | 0,9 %                |

Die Ergebnisse in Tabelle 3-11 weisen auf eine trockene Isolierung hin und scheinen für alle drei Kurven praktisch ident zu sein. Jedoch muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die

Gleichgewichtskurven für solch niedrige Ölfeuchtigkeitswerte praktisch nicht anwendbar oder nur mit einer gewissen Abweichung anwendbar sind. So werden Werte unter 4 ppm auf den Fabre-Pichon-Kurven beispielsweise gar nicht mehr dargestellt. Das Ergebnis für den Belastungsversuch 1 wurde hierbei durch Interpolation der bestehenden Temperaturkurven für 60 und 70 °C durch den Nullpunkt ermittelt.

Das Problem bei der Anwendung von Gleichgewichtsdiagrammen ist des Weiteren, dass diese einer Reihe von Unsicherheiten unterliegen. [28] listet diese wie folgt auf

- Probenentnahme verursacht nicht einschätzbare Streuung
- Diagramme gelten nur unter Gleichgewichtsbedingungen, welche in der Praxis nie erreicht werden
- Niedrige Feuchtigkeitswerte machen ein genaues Ablesen der Kurven unmöglich
- Temperatur und Feuchteverteilung im Transformator ist ungleichmäßig. Ergebnis ist im besten Fall ein Mittelwert
- Diagramme sind nur für jene Öl-Papier-Kombination gültig, für die sie erstellt wurden

Dennoch haben sich besonders die Oommen-Kurven über die Jahre als Indikator häufig bewehrt.

### Durch Bestimmung der relativen Sättigung

Für den Belastungsversuch 1 lässt sich aus Diagramm 3-30 der maximale Ölfeuchtegehalt mit 3,5 ppm ablesen. Die Ölentnahmetemperatur zu diesem Zeitpunkt betrug 65 °C. Unter Anwendung von Formel ( 37 ) bestimmt sich die Sättigung des Öls somit zu

$$S_0 = 10^{-\frac{1567}{273,15+65}+7,0895} = 285,4 \text{ ppm}$$

Setzt man diesen Sättigungswert und den Feuchtegehalt des Öls in Formel ( 38 ) ein, erhält man die relative Sättigung des Öls

$$RS = \frac{3,5}{285,4} \cdot 100\% = 1,23 \%$$

Da die relative Sättigung jedoch nicht nur von der Feuchte des Öls sondern ebenso von der Temperatur abhängig ist, bedeutet dies, dass der Messpunkte der höchsten Feuchte nicht auch der höchsten relativen Sättigung entspricht. Die bestimmten relativen Sättigungen für den Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur sind in nachfolgendem Diagramm dargestellt.

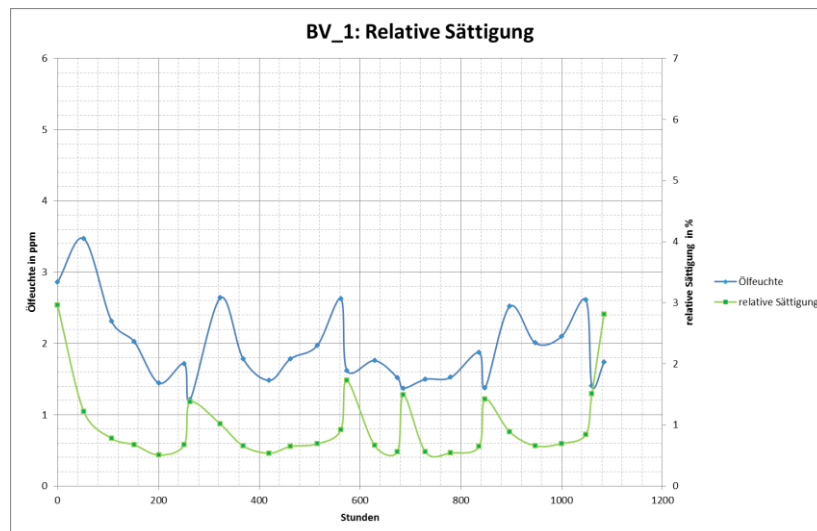


Diagramm 3-31 – BV 1: Bestimmte relative Sättigung

Während der Heizphasen ergibt sich entsprechend den Erwartungen eine niedrige relative Sättigung im Öl. Ihre Maxima erreicht sie in den Kühlphasen zwischen den unterschiedlich langen Zyklen. Die Skalierung des Diagramms wurde dabei großzügig gewählt, um einen direkten, anschaulichen Vergleich zu den Ergebnissen der bestimmten relativen Sättigung für den Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit, welche in Diagramm 3-32 mit derselben Skalierung dargestellt sind, zu ermöglichen.

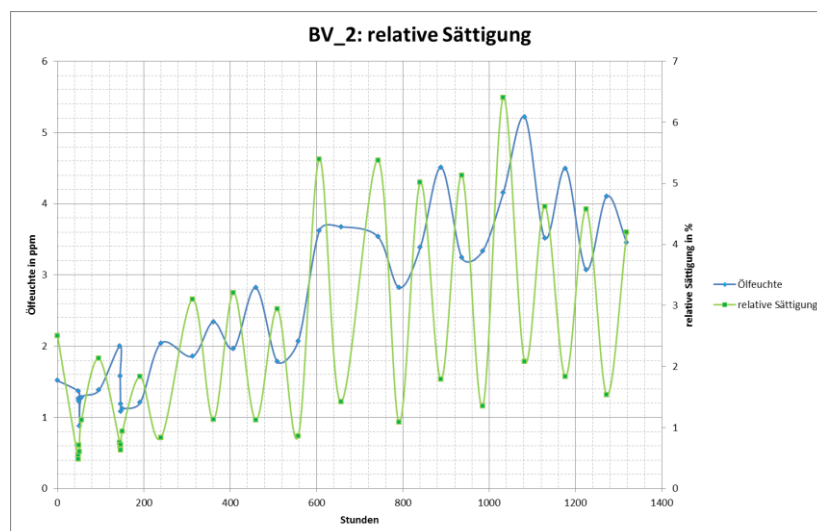


Diagramm 3-32 – BV 2: Bestimmte relative Sättigung

Wie auch beim Belastungsversuch 1 ergeben sich die Sättigungsminima während der Heizphasen der Zyklen und die Maxima während den Kühlphasen. Die relative Sättigung steigt dabei mit der Ölfeuchte bis zum 11. Zyklus an und nimmt in den letzten beiden Zyklen wieder etwas ab.

Entsprechend der Grenzwerte der IEC 60422, siehe Kapitel 2.3.2, sind die Zellulosekomponenten der Isolierung, abgesehen von einem Messwert während des Belastungsversuchs 2 bei etwa 1040 Stunden, daher ebenfalls als trocken anzusehen.

### Durch Berechnung mittels Formeln

Neben der relativen Sättigung als Indikator, lässt sich die Papierfeuchte, wie Kapitel 2.3.2 beschrieben, auch ohne Gleichgewichtskurven mit Hilfe der ABB- und Serena-Formeln berechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen für den Belastungsversuch 1 sind im folgenden Diagramm dargestellt.

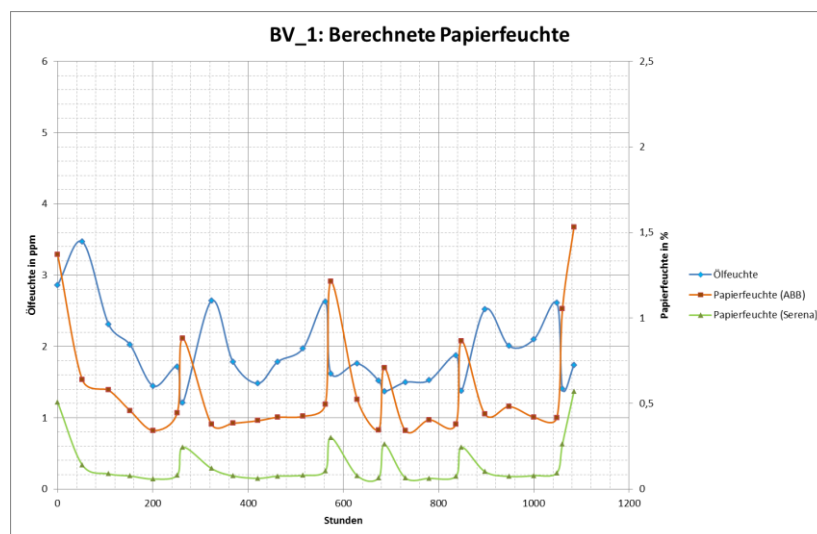


Diagramm 3-33 – BV 1: Berechnete Papierfeuchte

Wie Diagramm 3-34 zeigt sind die Ergebnisse der beiden Berechnungsformeln recht unterschiedlich.

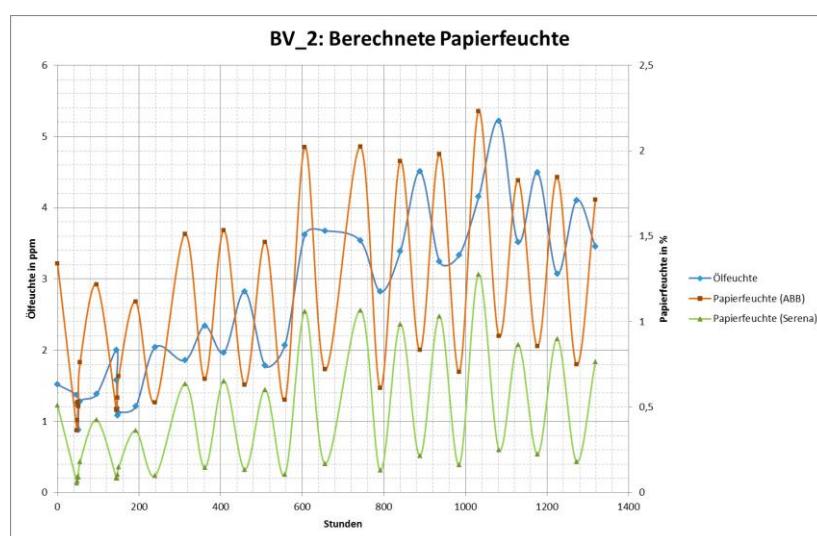


Diagramm 3-34 – BV 2: Berechnete Papierfeuchte

Dennoch sind alle Werte abgesehen vom Messwert bei etwa 1040 Stunden während des Belastungsversuchs 2 unter 2 %, weshalb auch die berechneten Werte auf eine trockenen Isolierung deuten lassen.

## Zusammenfassung

Die indirekten Bestimmungsmethoden zur Ermittlung der Papierfeuchte weisen allesamt, abgesehen von einem einzelnen Messpunkt, auf eine trockene Papierisolierung hin. Dennoch muss beachtet werden, dass diese Aussagen auf Modellen beruhen, die Großteils auf empirischen Daten einiger weniger Leistungstransformatoren und meist einer bestimmten Kombination von Öl und Papier beruhen. Aus diesem Grund können diese Werte als Indikator, aber nicht als Basis für eine fundierte Aussage herangezogen werden.

### 3.5.3 Bestimmung des Gasgehalts

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, unterliegt das Mineralöl einem Alterungs- und durch thermische und elektrische Belastung verstärkten Degradierungsprozess, welcher diverse Spaltprodukte in Form von Gasen aufweist. Die unterschiedlichen Gaskomponenten im Mineralöl, beziehungsweise deren Konzentration wird durch die Analyse der gelösten Gase, häufig auch DGA für „Dissolved Gas Analysis“, bestimmt. Diese erfolgte dabei nicht an der Technischen Universität Graz, sondern bei der Verbund-Umwelttechnik GmbH. Eingangs seien hier die Bereiche der typischen 90%-Konzentrationen für Messwandler nach [29] angeführt.

Tabelle 3-12 - typische 90%-Konzentrationswerte für Messwandler nach DIN EN 60599, Tabelle A.6

| Typ | H <sub>2</sub><br>in ppm | CO<br>in ppm | CO <sub>2</sub><br>in ppm | CH <sub>4</sub><br>in ppm | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub><br>in ppm | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub><br>in ppm | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub><br>in ppm |
|-----|--------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|---|---|---|
| CT  | 6 - 300                  | 250 - 1100   | 800 - 4000                | 11 - 120                  | 7 - 130                                 | 3 - 40                                  | 1 - 5                                   |
| VT  | 70 - 1000                | -            | -                         | -                         | -                                       | 20 - 30                                 | 4 - 16                                  |

Weiterst gibt [29] eine Reihe von Basis-Gasquotienten mit Grenzwertbereichen und entsprechender Fehlerzuweisung an, siehe Tabelle 3-13. Die Norm DIN EN 60599 schreibt zu deren Anwendung jedoch unter Punkt 9 a), wobei mit „Tabelle 2“ in dieser Arbeit Tabelle 3-13 gemeint ist:

*„Falls alle Gase unterhalb der typischen Gaskonzentrationswerte und typischen Gasbildungsrate sind, dann bezeichne sie als „normale DGA-Analyse/gesunde Geräte“. Falls mindestens ein Gas oberhalb des typischen Gaskonzentrationswertes und der typischen Gasbildungsrate ist, dann berechne die Gasquotienten und identifiziere den Fehler nach Tabelle 2.“*

Tabelle 3-13 - Basis-Gasquotienten nach DIN EN 60599, Tabelle 2

| Fehlertyp                              | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ |
|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| Teilentladung                          | Nicht signifikant       | < 0,1              | < 0,2                   |
| Entladung niedriger Energie            | > 1                     | 0,1 bis 0,5        | > 1                     |
| Entladung hoher Energie                | 0,6 bis 2,5             | 0,1 bis 1          | > 2                     |
| Thermischer Fehler T < 300 °C          | Nicht signifikant       | > 1                | < 1                     |
| Thermischer Fehler 300 °C < T < 700 °C | < 0,1                   | > 1                | 1 bis 4                 |
| Thermischer Fehler T > 700 °C          | < 0,2                   | > 1                | > 4                     |

Die Ergebnisse Analyse der gelösten Gase für den Prüfling sind in folgender Tabelle angeführt. Die DGA beschränkte sich dabei aufgrund des verhältnismäßig großen Probenumfangs, der während des Belastungsversuchs unter erhöhter Luftfeuchtigkeit auftrat, auf den Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur.

Tabelle 3-14- Ergebnisse der DGA

| Entnahme-Zeit in Std. | H <sub>2</sub> ppm | CO ppm | CO <sub>2</sub> ppm | CH <sub>4</sub> ppm | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ppm | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ppm | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ppm |
|-----------------------|--------------------|--------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| -250                  | 41                 | 135    | 1149                | 6                   | 0                                 | 1                                 | 0                                 |
| -12                   | 38                 | 132    | 1181                | 6                   | 0                                 | 1                                 | 0                                 |
| 0                     | 37                 | 133    | 1209                | 6                   | 0                                 | 1                                 | 1                                 |
| 250                   | 30                 | 109    | 908                 | 6                   | 0                                 | 1                                 | 0                                 |
| 262                   | 29                 | 111    | 918                 | 6                   | 0                                 | 1                                 | 1                                 |
| 562                   | 36                 | 119    | 996                 | 7                   | 0                                 | 1                                 | 1                                 |
| 574                   | 32                 | 122    | 1003                | 6                   | 0                                 | 0                                 | 0                                 |
| 674                   | 30                 | 110    | 972                 | 6                   | 0                                 | 0                                 | 1                                 |
| 686                   | 30                 | 115    | 953                 | 6                   | 0                                 | 0                                 | 1                                 |
| 836                   | 34                 | 117    | 992                 | 6                   | 0                                 | 0                                 | 1                                 |
| 848                   | 30                 | 112    | 994                 | 6                   | 0                                 | 1                                 | 1                                 |
| 1048                  | 26                 | 122    | 1227                | 7                   | 0                                 | 1                                 | 1                                 |
| 1060                  | 27                 | 121    | 1265                | 7                   | 0                                 | 1                                 | 0                                 |
| 1072                  | 25                 | 122    | 1243                | 6                   | 0                                 | 0                                 | 0                                 |

Die Werte der Konzentrationen alleine geben dabei kaum bis keine Informationen über den Zustand der Transformatoren. Etabliert haben sich dabei oben genannte

Basis-Gasquotienten oder die sogenannten Schlüsselgasquotienten und Schlüsselgase. Die CIGRE Task Force 15.01.01 (CI) gibt dabei folgende Schlüsselgasquotienten und Schwellwerte sowie entsprechende Fehlerursachen, aufgelistet in nachfolgender Tabelle an.

Tabelle 3-15 - Schlüsselgas und Schlüsselgasquotienten nach CIGRE Task Force 15.01.01 (CI) mit Fehlerzuweisung

| Schlüsselgas/<br>Schlüsselgasquotient | Schwellwert in ppm | Fehlerart             |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| $\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$               | >1                 | Entladung             |
| $\frac{H_2}{CH_4}$                    | >10                | Teilentladung         |
| $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$               | >1                 | Überhitzung           |
| $\frac{CO_2}{CO}$                     | <3 oder >10        | Zellulosedegradierung |
| $C_2H_2$                              | >20                | Entladung             |
| $H_2$                                 | >100               | Teilentladung         |
| $\sum_{x=1,2,3} C_xH_y$               | >1000              | Überhitzung           |
| $\sum_{x=1,2} C_xH_y$                 | >500               | Überhitzung           |
| $\sum_{x=1,2} CO_x$                   | >10000             | Zellulosedegradierung |

Für die DGA-Messwerte aus Tabelle 3-14 traten lediglich für die letzten drei Messpunkte mit Werten von 10,05; 10,45 und 10,18 geringfügige Überschreitungen des Schwellwertes für den Kohlendioxid-Kohlenmonoxid Schlüsselgasquotienten auf, die eine Zellulosedegradierung indizieren. Alle anderen Werte sind unauffällig und zumeist weit unter den Schwellwerten, weshalb entsprechend [29] der Wandler als „*gesundes Gerät*“ bezeichnet werden kann.

Die zeitliche Entwicklung der unterschiedlichen Gasgehalte ist in den Diagrammen Diagramm 3-35 bis Diagramm 3-41 dargestellt.

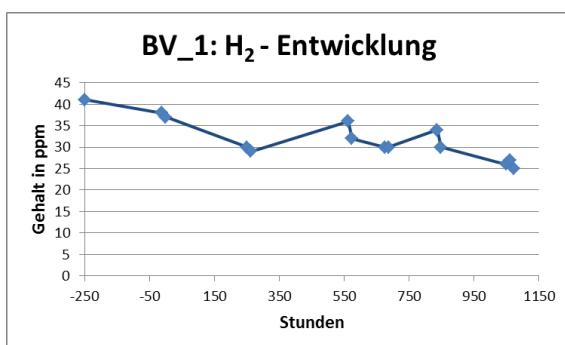


Diagramm 3-35 – Wasserstoffgehaltentwicklung in ppm

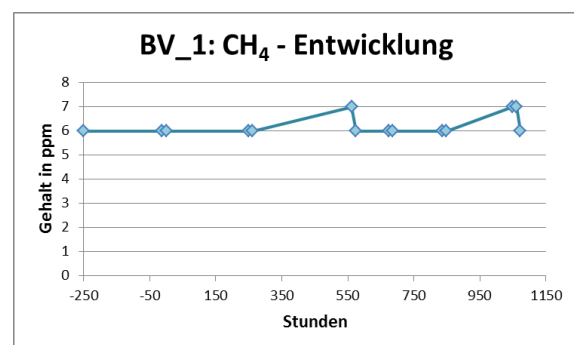


Diagramm 3-36 – Methangehaltentwicklung in ppm



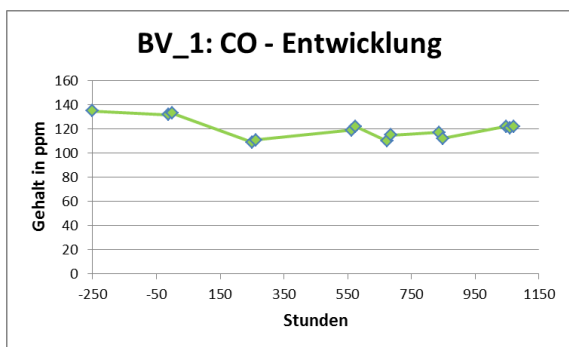


Diagramm 3-37 – Kohlenmonoxidgehaltentwicklung in ppm

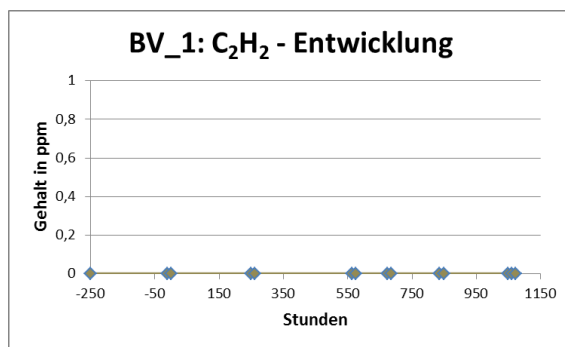


Diagramm 3-38 - Ethingehaltentwicklung in ppm

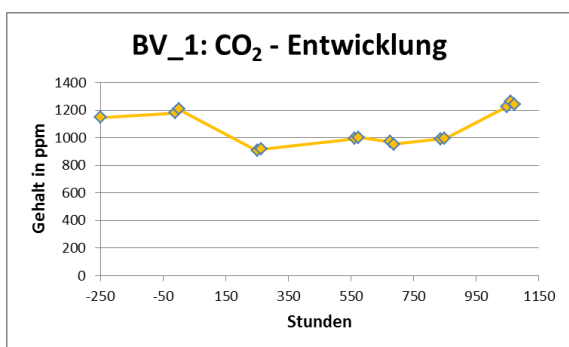


Diagramm 3-39 – Kohlendioxidgehaltentwicklung in ppm

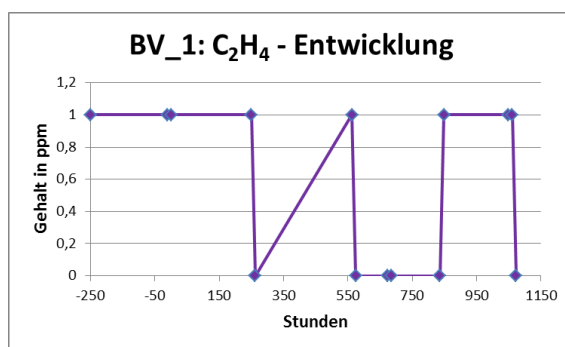


Diagramm 3-40 – Ethengehaltentwicklung in ppm

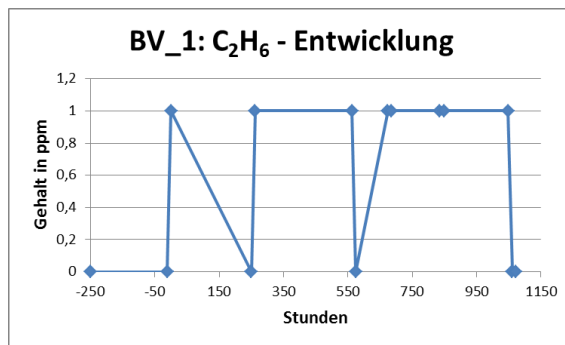


Diagramm 3-41 – Ethangehaltentwicklung in ppm

## 4 Modellierung und Simulation

Nach Abschluss der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Versuche stellten sich weiterhin zwei Fragen. Wie groß ist der Gesamteinfluss der Kontaktwiderstände auf die Erwärmung des Wandlers und wie aussagekräftig sind die Ölproben, welche am Sockel des Wandlers entnommen werden, in Bezug auf die Vorgänge, welche sich zum größten Teil im Kopf des Wandlers abspielen. Begleitend zu den durchgeführten Untersuchungen wurde daher zuerst ein CAD-Modell des Wandlers erstellt, aus welchem dann weitere Simulationsmodelle abgeleitet wurden, um mit Hilfe des Simulationssoftwarepakets ANSYS Mechanical 16.1 weiterführende Untersuchungen anstellen zu können. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Erwärmung der Hauptstrombahn sowie der Ölbewegung im Inneren des Wandlers. Die hierfür verwendeten Modelle und Simulationen sowie deren Ergebnisse sollen in diesem Kapitel diskutiert werden.



Bild 4-1 – CAD-Modell des Wandlers geschlossen

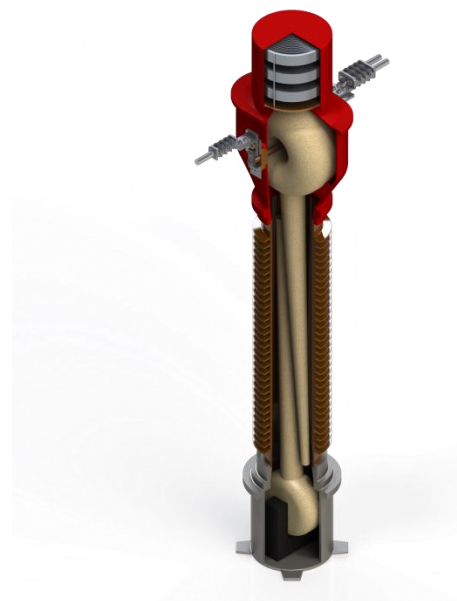


Bild 4-2 – CAD-Schnittmodell des Wandlers

### 4.1 Materialdaten

Bevor die Simulation durchgeführt werden konnte, waren neben den geometrischen Daten des Versuchsobjekts auch die Materialdaten desselben notwendig. Da allen Simulationen das Gesamtmodell, siehe Bild 4-1, zugrunde lag und für die jeweiligen Teilsimulationen Auszüge aus diesem verwendet wurden, sollen die Materialdaten in diesem Kapitel zusammengefasst angeführt werden.

### **Leiterseil**

Beim verwendeten Leiterseil handelte es sich um ein Aluminiumleiterseil vom Typ 626 AL 1 oder AL 3. Da sich die beiden Typen von den Kenndaten her sehr stark ähneln, wurden die Werte vom Leiterseil Typ 626 Al 3 für die Simulation herangezogen. Diese sind [27] entnommen und in nachfolgender Tabelle zusammen gefasst.

**Tabelle 4-1 - Materialdaten 626 Al 3**

| <b>Größe</b>                 | <b>626 Al 3</b> | <b>Einheit</b>      |
|------------------------------|-----------------|---------------------|
| Querschnitt                  | 626,2           | mm <sup>2</sup>     |
| Gewicht                      | 1737,7          | kg km <sup>-1</sup> |
| Bruchkraft                   | 184,73          | kN                  |
| Gleichstrom-widerstand       | 0,0534          | Ω km <sup>-1</sup>  |
| E-Modul                      | 55000           | N mm <sup>-2</sup>  |
| Längsausdehnungs-koeffizient | 2,3 e-05        | K <sup>-1</sup>     |

### **Seilklemme**

Da Freileitungsseile praktisch immer aus Aluminium gefertigt werden, bestehen auch Seilklemmen praktisch nur aus Aluminium. Darum wurde für die Seilklemme als Werkstoff ebenfalls Aluminium angenommen.

### **Winkellasche**

Da die Komponenten der Hauptstrombahn (Kontaktringe, Winkellasche, Verbindungsflasche, Primärleiterstäbe) durchwegs speziell legiert sein können, wurden diese mit Hilfe energiedispersiver Röntgenspektroskopie, kurz EDX, untersucht und somit die Materialien bestimmt. Bild 4-3 zeigt beispielhaft ein solches EDX-Spektrum für die Verbindungsflaschen.

Aus diesem ist klar ersichtlich, dass das Material der Winkellasche Aluminium ist.

### **Verbindungsflasche**

Auch für die Verbindungsflaschen wurde die Materialbestimmung mit Hilfe der EDX durchgeführt.

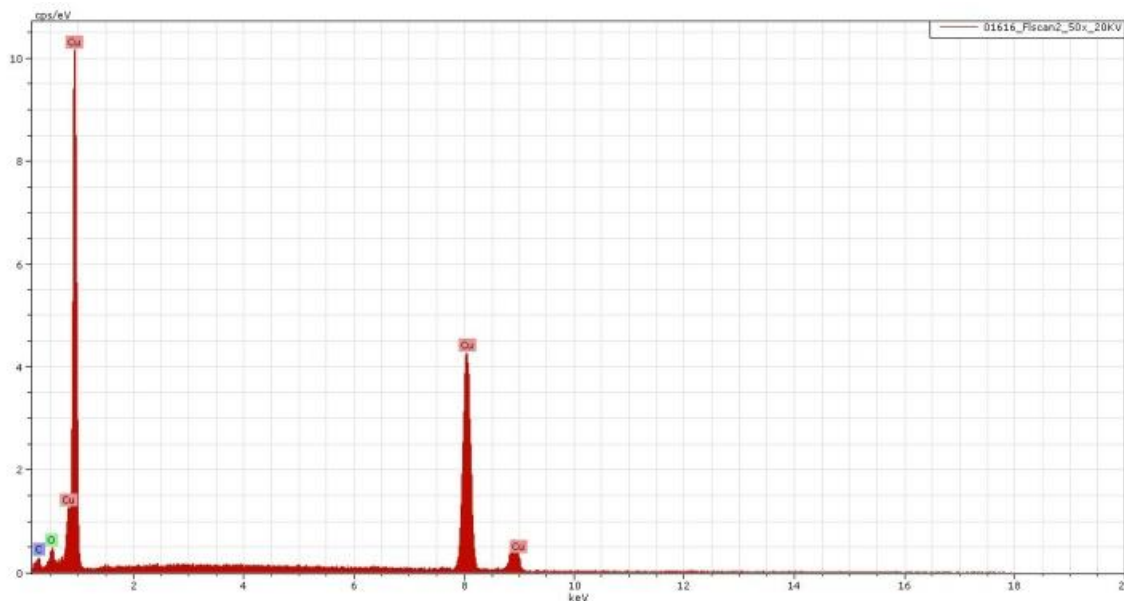


Bild 4-3 – EDX-Spektrum Verbindungsflasche

In Bild 4-3 kann man gut die Ausschläge bei den Teillinien von Kupfer im Spektrum erkennen. Basierend auf diesem Ergebnis wurde für die Verbindungsflaschen das Material mit Kupfer oder Kupferlegierung angenommen.

### ***Gehäuseanschlussplatte***

Im Zuge der EDX wurde auch das Material der Anschlussplatten, welche am Wandlergehäuse befestigt sind und die Verschraubungspunkte für die Verbindungs- und Winkellasche tragen, als Aluminium bestimmt.

### ***Wandlergehäuse***

Grundsätzlich werden Wandlergehäuse wegen ihrer speziellen Form gegossen. Hierfür kommt entweder Grauguss (Eisen, Stahl) oder Aluminium in Frage. Da das Wandlergehäuse lackiert war, musste auch hier zur Sicherheit eine EDX durchgeführt werden. Wie sich herausgestellt hat, besteht auch das Wandlergehäuse aus Aluminium.

### ***Serienlasche***

Der Verbindungsbügel wies ein ähnliches Erscheinungsbild wie die Verbindungsflaschen auf. Dennoch wurde auch diesem eine Probe entnommen und einer EDX unterzogen, aus welcher hervorging, dass es sich beim Material ebenfalls um Aluminium oder einer Aluminiumlegierung handelt.

### **Primärleiterstäbe**

Das Material der Primärleiterstäbe wurde vom Auftraggeber im Vorfeld als legiertes Kupfer identifiziert. Insofern wurde für die Simulation auch von Kupfer beziehungsweise einer Kupferlegierung ausgegangen.

### **Mineralöl**

Einen groben Überblick über die Eigenschaften von Mineralöl bietet Tabelle 4-2. Die enthaltenen Werte wurden dabei aus [30] und [31] entnommen und in dieser Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-2 - Eigenschaften von Mineralöl

| <b>Eigenschaft</b>                        | <b>Einheit</b>                     | <b>Wert</b> |
|---|------------------------------------|-------------|
| Durchschlagfeldstärke $E_d$               | $\text{kV mm}^{-1}$                | 25          |
| Durchgangswiderstand $\rho_R$             | $\Omega \text{ cm}$                | $10^{14}$   |
| Relative Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$ | -                                  | 2,2         |
| Verlustfaktor bei 1 MHz $\tan\delta$      | -                                  | $10^{-3}$   |
| Dichte $\rho$ (20 °C)                     | $\text{g cm}^{-3}$                 | 0,891       |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda$              | $\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$   | 0,13        |
| Wärmeausdehnungskoeffizient               | $\text{ml ml}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | 0,00078     |
| Spezifische Wärmekapazität $c_p$          | $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  | 1880        |

Die verwendete Art von Mineralöl, war Nynas Nytro 4000 X, was dem Typenschild der Prüflinge, siehe Bild 3-4, entnommen werden konnte.

### **Isolator**

Beim Isolator handelte es sich um einen Stützisolator aus Keramik.

## **4.2 Mechanische Simulation**

Einen entscheidenden Einflussfaktor auf die Temperaturverteilung der Hauptstrombahn stellt der elektrische Strom, genauer gesagt dessen Stromdichteverteilung, im Material dar, welche im Bereich der Kontaktstellen abhängig vom Kontaktdruck ist. Ein Bereich höheren Kontaktdruckes und somit geringeren Kontaktwiderstandes stellt dem Strom einen geringeren Widerstand entgegen und trägt somit eine höhere Stromdichte. Da die

Erwärmung sich mit dem Widerstand zwar linear, mit dem Strom jedoch quadratisch ändert, können sich somit Hot-Spots bilden, die eine Verschiebung der Temperaturverteilung zur Folge haben können. Wie Bild 3-8 zeigt, wurde für die Versuche ein Freileitungsseil in einer schleifenförmigen Anordnung am Kombiwandler montiert. Dies stellt bezüglich der Anschlüsse und Hauptstrombahn eine, im Gegensatz zum normalen Montagefall innerhalb eines Umspannwerkes, abweichende mechanische Belastung dar. Um eine etwaige Änderung der Kontaktdrücke in Qualität und Quantität, verursacht durch den Prüfaufbau zu untersuchen, wurde hierzu eine mechanische Simulation der betroffenen Komponenten durchgeführt. Dieses Unterkapitel geht auf die gewählten Simulationsparameter sowie die resultierenden Ergebnisse ein.

#### 4.2.1 Das Modell

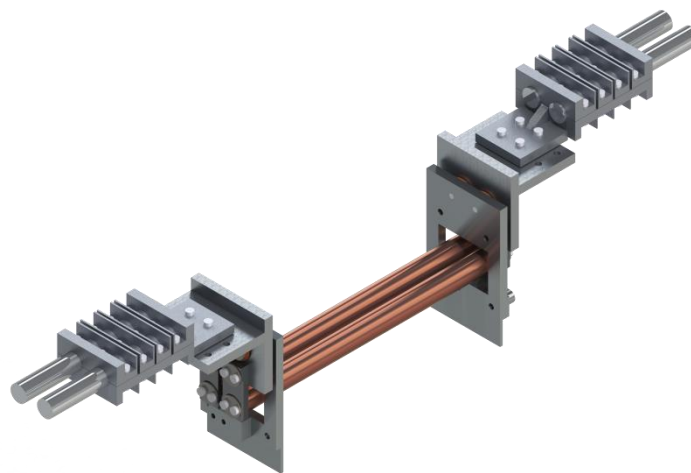


Bild 4-4 – CAD-Modell der Hauptstrombahn

Bild 4-4 zeigt das verwendete Modell der Hauptstrombahn des Kombiwandlers. Da zum einen nur die Komponenten und Kontakte der, beziehungsweise zur Hauptstrombahn von Interesse waren und zum anderen die Gehäuseanschlussplatten, also jene Komponenten an welchen die Winkellaschen an dem Wandlergehäuse befestigt werden, durch entsprechend gewählte Randbedingungen gelagert werden können, war es nicht notwendig, das gesamte Wandlermodell, siehe Bild 4-1, für die Simulation zu verwenden. Durch die Ungleichheit der beiden Seiten der Hauptstrombahn, bedingt durch die nur auf der Seite P2/A vorhandene Serienlasche, konnte jedoch keine Symmetriebedingung angewandt werden um das Modell weiter zu vereinfachen. Bild 4-5 zeigt das Modell mit dem erstellten Rechennetz, also jenen repräsentativen Knoten und Elemente, für welche anschließend die zugrunde liegenden mechanischen Gleichungen berechnet und gelöst werden. In Fachkreisen wird dieses häufig einfach als Mesh bezeichnet. Dessen Größe, beziehungsweise die Größe der Elemente die es enthält, sowie die Form dieser Elemente sind dabei entscheidend für die Konvergenz und die resultierende Qualität der berechneten Ergebnisse.

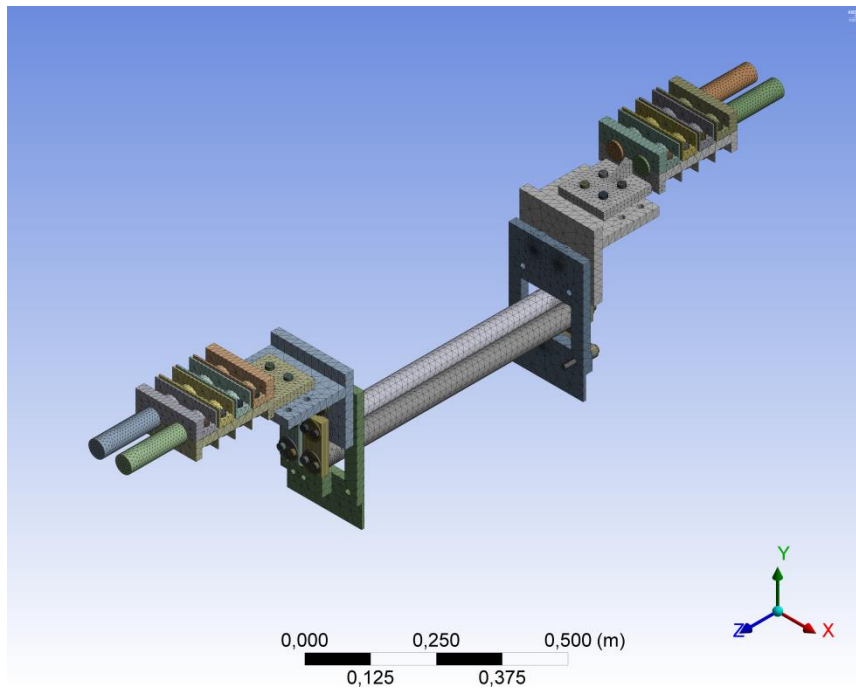


Bild 4-5 – Vernetztes Modell der Hauptstrombahn

#### 4.2.2 Kontakte und Modellklassen

Einen entscheidenden und kritischen Punkt der mechanischen Simulation stellen die Kontaktstellen, also die Verbindungen zweier Körper, dar. Besonders Schraubverbindungen repräsentieren hierbei einen komplexen Simulationsbereich mit mehreren Kontaktstellen und einem ausgeprägten nicht linearen Verhalten. [32] Blatt 2 unterscheidet dabei, entsprechend der qualitativen Nachbildung, also dem Detaillierungsgrad, der Schraubverbindungen, vier Modellklassen.

Tabelle 4-3 - Modellklassen nach VDI 2230 Blatt 2

| Modelklasse | Merkmale   |
|-------------|--|
| I           | Keine Schrauben, keine Bohrung, nur Kontakt  |
| II          | Schraube als Balken (oder Feder)   |
| III         | Schrauben als vereinfachtes Volumen, Gewindebereich mit Kerndurchmesser, Kontaktdefinition |
| IV          | Schraube mit exakter Gewindegeometrie  |

Für die hier durchgeführten Simulationen wurden die Schrauben ohne die exakte Gewindegeometrie nachgebildet, da der Fokus auf den in Kontakt stehenden Flächen und nicht auf den Schrauben selbst lag. Nachfolgendes Bild zeigt diese Schraubverbindungen auf einer Seite der Hauptstrombahn.

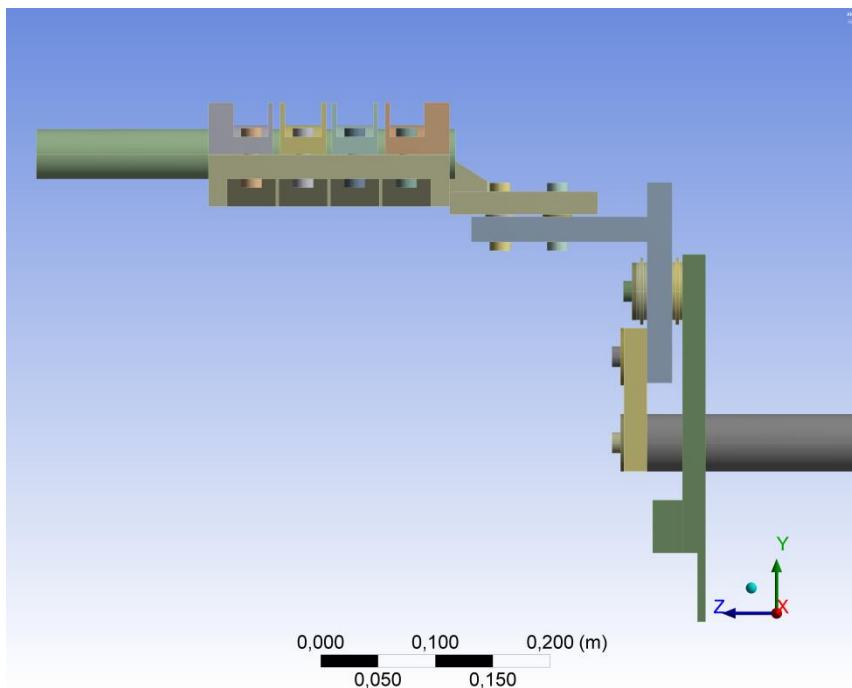


Bild 4-6 – Nachbildung der Verschrauben auf einer Seite der Hauptstrombahn

### 4.2.3 Variation

Da die Kraftwirkung des Leiterseils auf die Hauptstrombahn nicht direkt gemessen werden konnte, wurde für die Simulation eine Variation der Kraftwirkung, sowohl in Richtung als auch Betrag, durchgeführt. Die Kräfte wurden hierfür von 0 bis 400 N jeweils in z-Richtung (Seite P1) beziehungsweise ( $-z$ )-Richtung (Seite P2A) und in die negative y-Richtung in Inkrementen von 100 N variiert. Einen Überblick über die unterschiedlichen Belastungspunkte, in folgender Tabelle mit BP abgekürzt, liefert Tabelle 4-4.

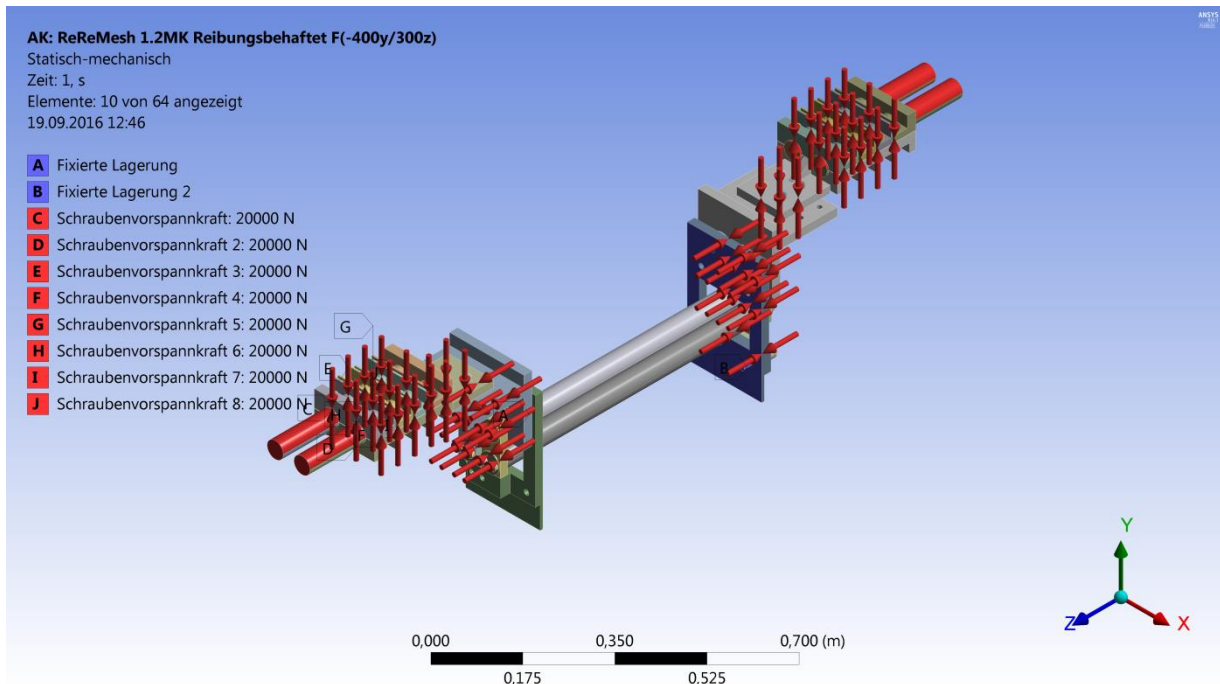
Tabelle 4-4 - Belastungspunkte (BP) der durchgeführten Kraftvariation

| $F_z \backslash F_y$ | 0 N   | -100 N | -200 N | -300 N | -400 N |
|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0 N                  | BP 1  | BP 2   | BP 3   | BP 4   | BP 5   |
| 100 N                | BP 6  | BP 7   | BP 8   | BP 9   | BP 10  |
| 200 N                | BP 11 | BP 12  | BP 13  | BP 14  | BP 15  |
| 300 N                | BP 16 | BP 17  | BP 18  | BP 19  | BP 20  |
| 400 N                | BP 21 | BP 22  | BP 23  | BP 24  | BP 25  |

Zuvor wurden an allen Schraubverbindungen Vorspannkräfte und an den Anschlussplatten zum Wandlergehäuse hin fixierten Lagerungen appliziert. Die Schraubverbindungen wurden

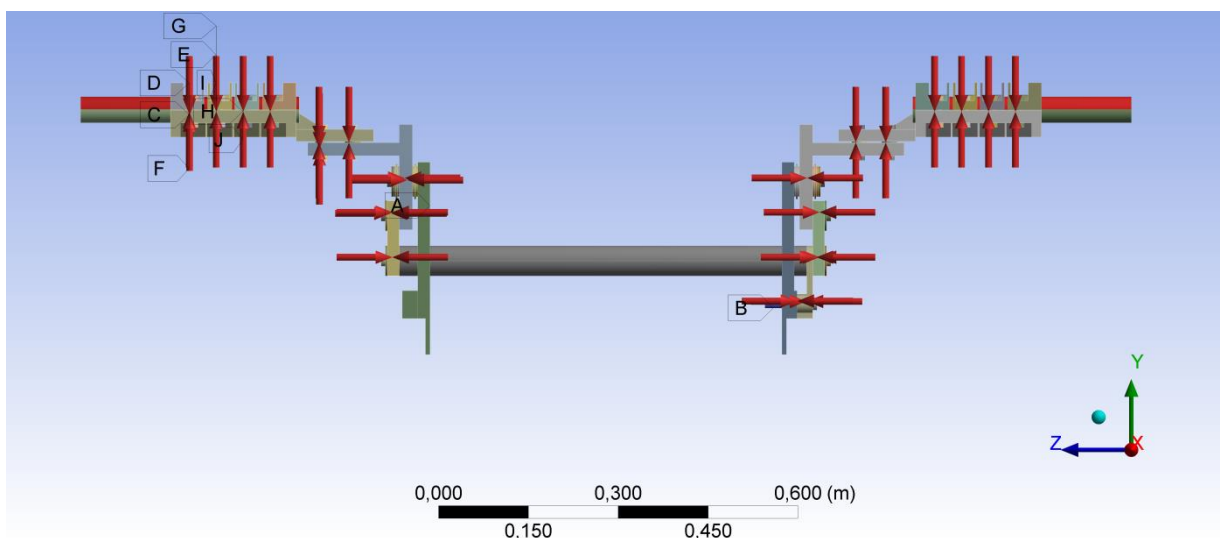


dabei entsprechend ihrer Festigkeitsklassen mit 20 kN für Schrauben des Typs M12 A-70 und 32 kN für Schrauben des Typs M12 A-80 vorgespannt. Das Modell mit seinen Randbedingungen für Belastungspunkt 20 ist in folgendem Bild zu sehen.



**Bild 4-7 – mechanisches Modell mit applizierten Kräften und Lagerungen**

Zur besseren Ansicht ist das Modell mit den aufgebrachtten Kräften und Lagerungen in Bild 4-8 nochmals in der Seitenansicht dargestellt. Die zueinander zeigenden Pfeile entsprechen dabei den aufgebrachtten Vorspannkräften der Schraubverbindungen, welche man sich bildlich wie eine Art Federkraft, welche die verschraubten Komponenten zusammenzieht, vorstellen kann. Die rot markierten Flächen an den Leiterseilen entsprechen den äußeren Kräften, welche variiert wurden.



**Bild 4-8 – mechanisches Modell mit applizierten Kräften und Lagerungen in Seitenansicht**

#### 4.2.4 Ergebnisse

Um die Rückwirkungen des Prüfaufbaus auf den Prüfling einzuschätzen wurde für die Kontaktstellen der Hauptstrombahn die relative Änderung des Kontaktdrucks in Bezug auf jenen Kontaktdruck, der ohne äußere Krafteinwirkung herrscht, bestimmt. Diagramm 4-1 zeigt die relative Druckänderung an der Seilklemme. Wie aus dem Diagramm abzulesen ist, kommt es selbst für den Punkt stärkster äußerer Krafteinwirkung zu einer absoluten Kontaktdruckänderung von höchstens 0,55 %. Daher ist die Rückwirkung des Aufbaus auf die Seilklemme als vernachlässigbar zu betrachten.

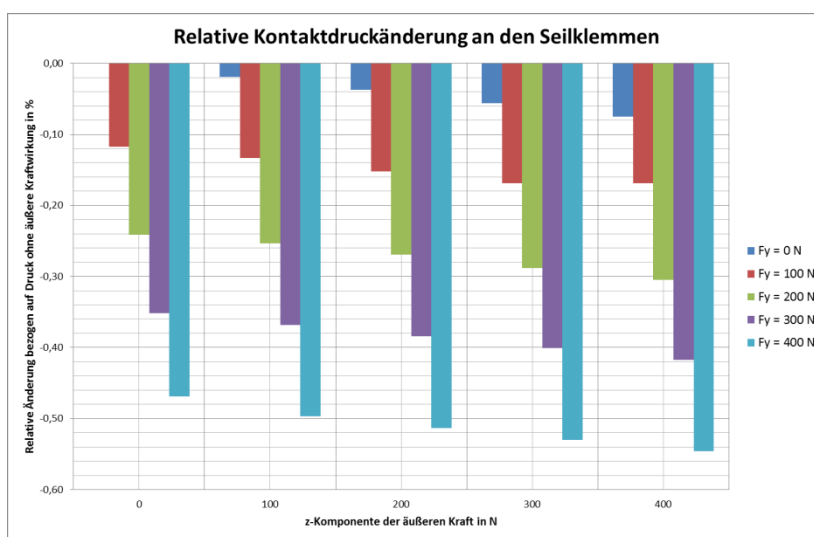


Diagramm 4-1 – Relative Kontaktdruckänderung an der Seilklemme

Nachfolgendes Bild zeigt die Kontaktdruckverteilung innerhalb einer der Seilklemmen für einen Belastungspunkt, in diesem Fall für eine Kraftkomponente in y-Richtung von -400 N und in z-Richtung von 300 N, welcher auch für die anderen Ergebnisdarstellungen verwendet wurde.

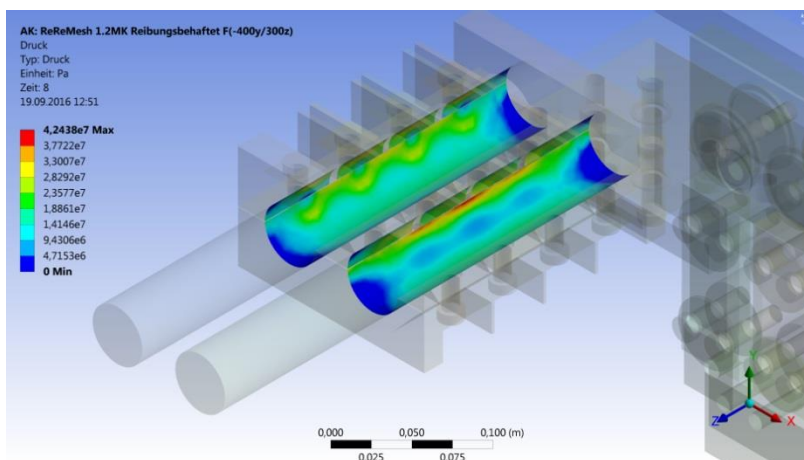


Bild 4-9 – Kontaktdruck in der Seilklemme für einen Belastungspunkt

Wesentlich größer als auf den Seilklemmenkontaktdruck ist der Einfluss auf die Kontakttringe,

welche zwischen Seilklemme und Winkellasche sitzen. Hier, siehe Diagramm 4-2, treten Druckänderungen von minimal etwa 1 % bis zu 25 % Prozent auf.

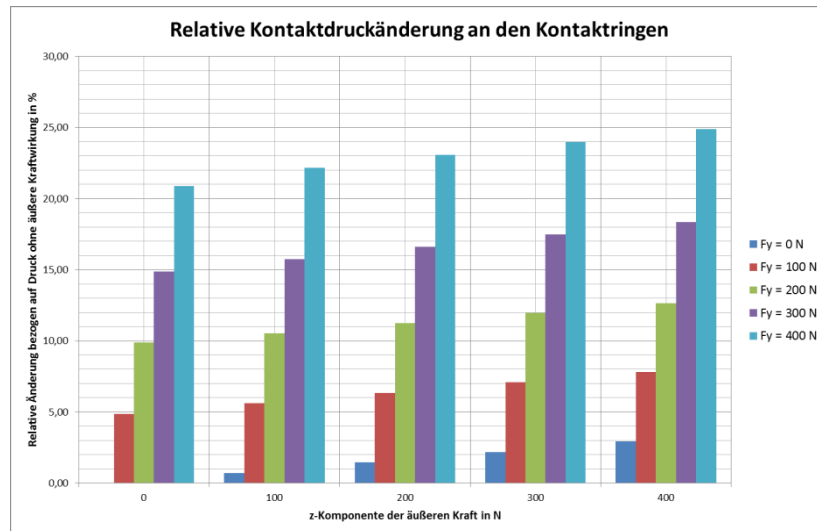


Diagramm 4-2 – Relative Kontaktdruckänderung an den Kontakttringen

Dies führt bei den Kontakttringen zu einer ungleichmäßigen Belastung der Kontakttringe, wobei besonders die leiterseilnahen Kontakttringe stärker beansprucht werden, während die leiterseilferneren Kontakttringe tendenziell entlastet werden, siehe Bild 4-10 und Bild 4-11. Diese Druckänderung führt dazu, dass die leiterseilnahen Kontakttringe durch den erhöhten Kontaktdruck einen geringeren Kontaktwiderstand aufweisen, was wiederum bedeutet, dass mehr Strom von der Seilklemme über diese Kontakttringe zur Winkellasche fließt.

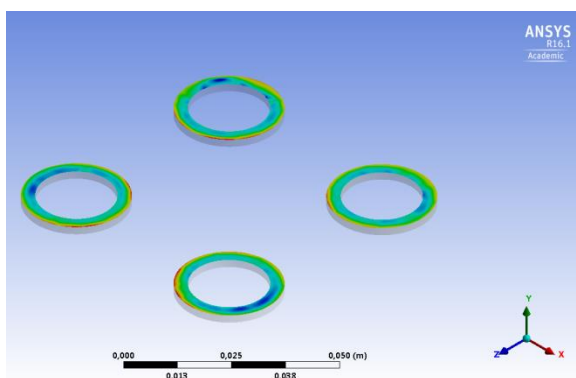


Bild 4-10 – Kontaktdruck auf Kontakttringe ohne äußere einwirkende Kraft

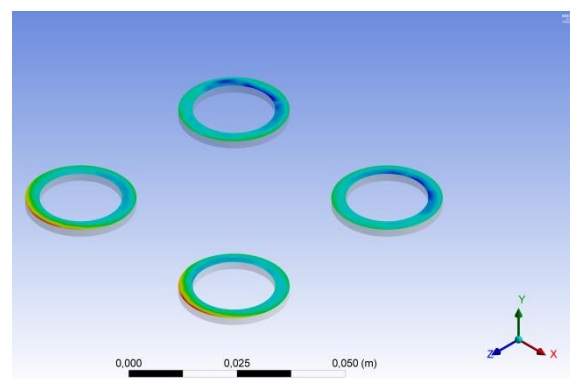


Bild 4-11 – Kontaktdruck auf Kontakttringe mit äußerer einwirkender Kraft

Das nächste Diagramm zeigt die Kontaktdruckänderung im Bereich der Verbindungsflaschenkontakte. Hier tritt eine maximale absolute Druckänderung von etwa 2,5 % auf, was aber den Belastungsfall maximaler äußerer Last darstellt. Wahrscheinlicher ist ein Belastungspunkt von etwa 100 bis 200 N äußerer Krafteinwirkung in y- und z-Richtung, was einer Gewichtskraft entspricht, welche von 10 bis 20 kg verursacht wird, für welchen die Kontaktdruckänderung im Bereich von etwa 1 % liegt. In jedem Fall kann aufgrund der

verhältnismäßig geringen Änderung auch hier die Rückwirkung des Prüfaufbaus als vernachlässigbar klein angesehen werden kann.

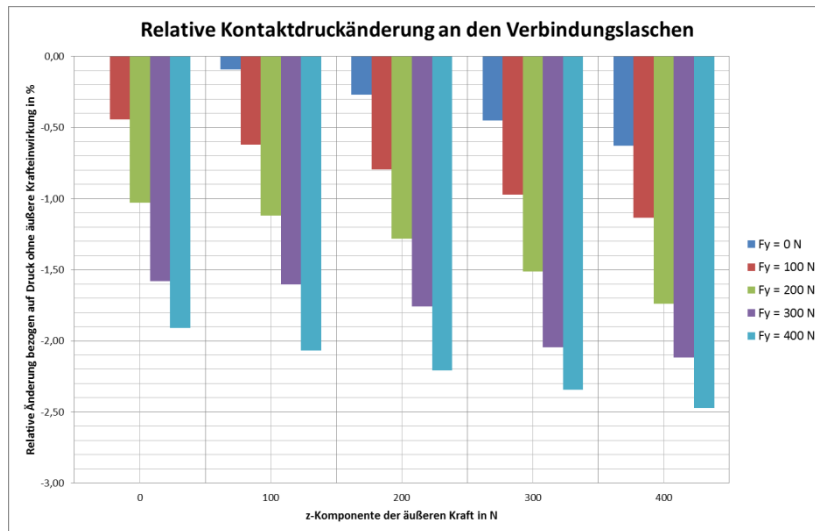


Diagramm 4-3 – Relative Kontaktdruckänderung an den Verbindungslaschen

Bild 4-12 zeigt die Kontaktdruckverteilung an den Verbindungslaschen für den bereits erwähnten Belastungspunkt von -400 N in y-Richtung und 300 N in z-Richtung. Man erkennt dabei gut, dass die größten Druckkräfte in der unmittelbaren Umgebung der Verschraubungsbohrungen der Verbindungslaschen liegen.

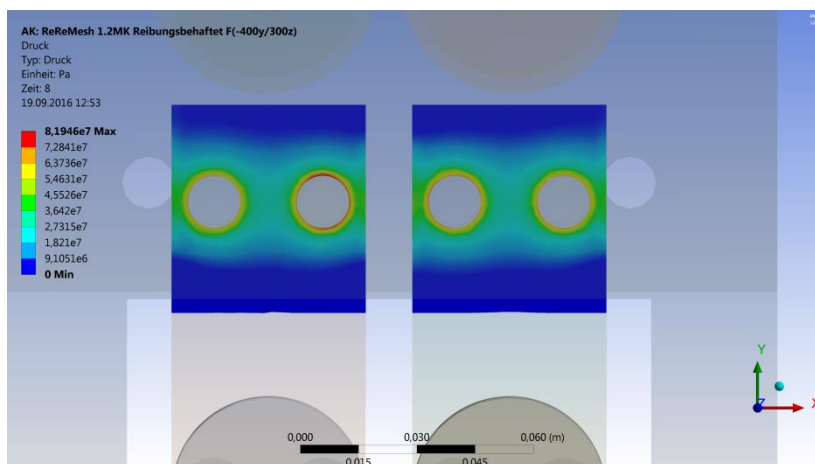


Bild 4-12 – Kontaktdruck an den Verbindungslaschen für einen Belastungspunkt

Ähnlich wie bei den Verbindungslaschen verhält sich die absolute Kontaktdruckänderung im Bereich der Serienlasche, siehe Diagramm 4-4. Auch hier ist die maximale Änderung unter 2 % beziehungsweise jene für den wahrscheinlicheren Belastungsbereich von 100 N bis 200 N unter 1 %. Hier tritt dementsprechend ebenfalls nur eine vernachlässigbare Rückwirkung auf den Prüfling auf.

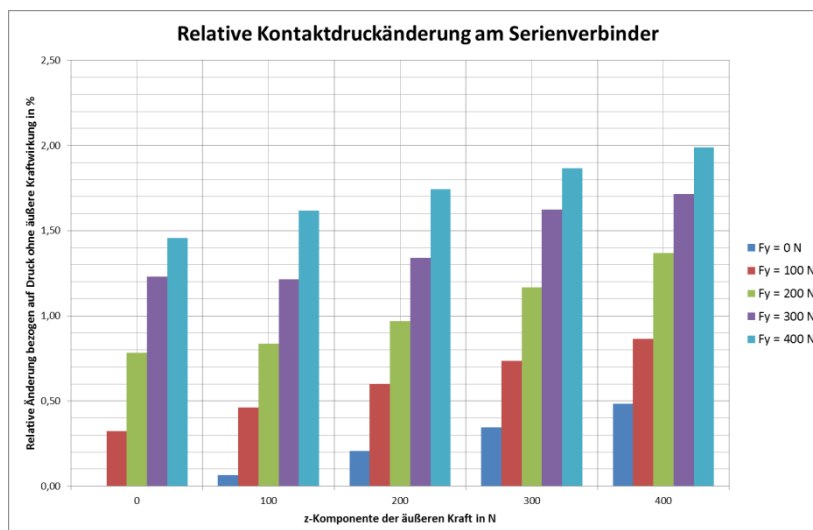


Diagramm 4-4 – Relative Kontaktdruckänderung an der Serienlasche

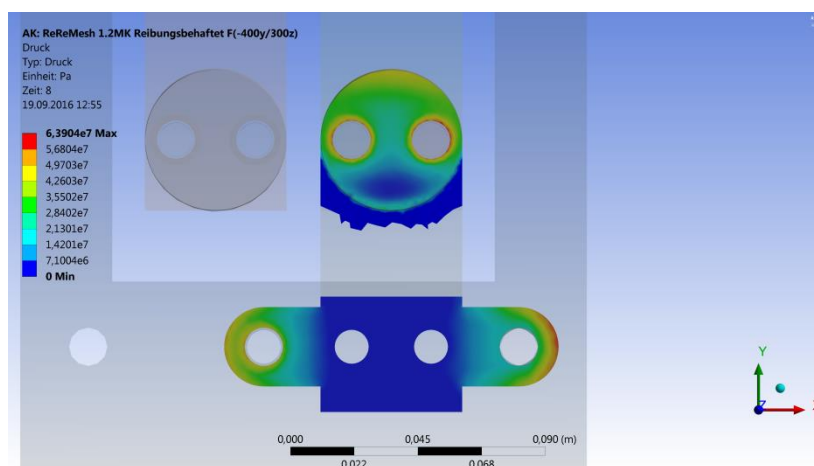


Bild 4-13 – Kontaktdruck an der Serienlasche für einen Belastungspunkt

In Bild 4-13 ist die Kontaktdruckverteilung an den Kontaktstellen der Serienlasche zu sehen. Man erkennt auch hier, dass die Orte großen Kontaktdruckes unmittelbar in der Nähe der Verschraubungsbohrungen liegen. Dabei sei noch angemerkt, dass die Serienlasche selbst nur an den äußeren beiden Bohrungen mit der Gehäuseanschlussplatte verschraubt wird, weshalb die mittleren Bohrungen keine hohen Kontaktdrücke aufweisen.

Die entscheidendsten Kontaktstellen sind jene an den Primärleitern. Hier würde eine Kontaktverschlechterung die größten Auswirkungen für das Gesamtsystem bedeuten. Die mechanischen Simulationsergebnisse für die Kontaktdrücke der Primärleiterkontaktstellen sind in Diagramm 4-5 dargestellt. Wie hier ersichtlich, belaufen sich die maximalen Kontaktdruckänderungen auf etwas über 13 %. Für den wahrscheinlicheren Belastungsbereich ergeben sich immer noch Änderungen von 4 bis 8 %. Dies ist grundsätzlich nicht mehr als vernachlässigbar zu bezeichnen. Da es sich um eine Kontaktverbesserung handelt bedeutet dies eine tendenzielle Reduzierung der Temperatur in diesem Bereich.

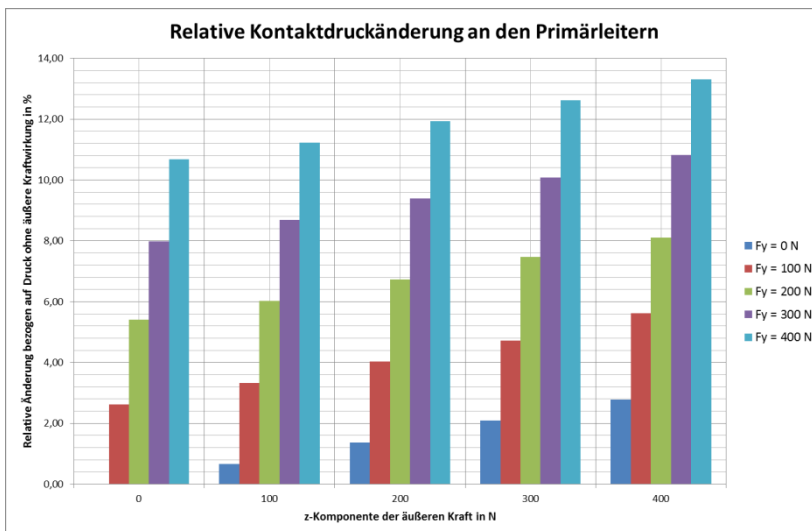


Diagramm 4-5 – Relative Kontaktdruckänderung an den Primärleitern

Das folgende Bild zeigt die Kontaktdruckverteilung an den Primärleiterkontaktflächen.

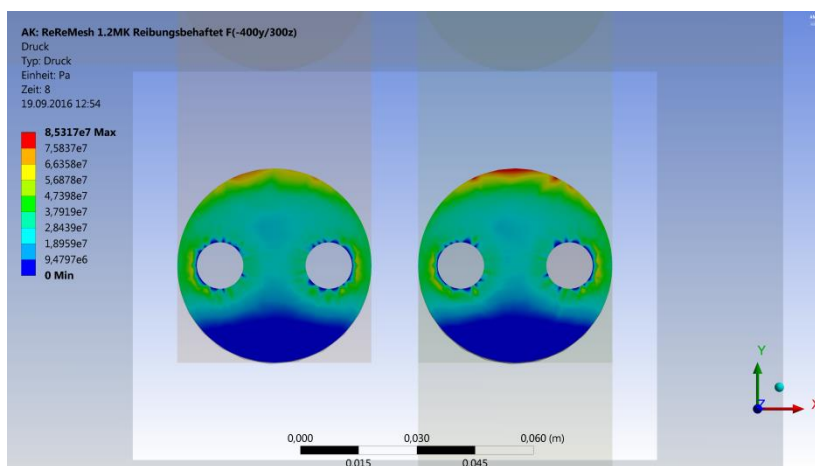


Bild 4-14 – Kontaktdruck an den Primärleitern für einen Belastungspunkt

Zu erkenne ist auch hier, dass sich der Kontaktdruck mehrheitlich im oberen Bereich der Kontaktstelle zur Verbindungsflasche hin konzentriert.

### 4.3 Thermische Simulation

Um das thermische Verhalten der Hauptstrombahn zu untersuchen, wurde begleitend zu den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchen eine thermische Simulation durchgeführt. Die Simulation bietet dabei den Vorteil, dass der Einfluss der Kontaktwiderstände für die Berechnung durch die Verwendung idealer Kontakte unterdrückt werden kann. Somit lassen sich die unbeeinflusste Temperaturverteilung an den Komponenten und durch anschließende Variation der Parameter die Größenordnung der durch die Kontaktwiderstände verursachten Verluste und somit näherungsweise die

Kontaktwiderstände selbst bestimmen. Die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse dieser Simulation sind Inhalt dieses Unterkapitels.

### 4.3.1 Das Modell

Das verwendete Modell entspricht jenem, mit welchem bereits die mechanischen Simulationen durchgeführt wurden, siehe Bild 4-4.

### 4.3.2 Elektrische Strömungsfeldsimulation

Entsprechend der Leistungsbilanzgleichung, siehe ( 11 ), ist die Systemtemperatur ebenso von der die Systemgrenzen überschreitenden Leistung abhängig. Dieser Leistungstransport in den Kombiwandler erfolgt durch die Verlustleistung bedingt durch den Strom. Alle in diesem Unterkapitel behandelten thermischen Simulationen sind daher eigentlich elektrisch-thermisch gekoppelte, multiphysikalische Simulationen. Daher wurde zuerst in einer elektrischen Strömungsfeldsimulation die Verlustleistung für 3150 A berechnet, welche dann als Eingangsrandbedingung für die thermische Simulation genutzt wurde. Nachfolgendes Bild zeigt die berechnete Verlustleistungsdichte für das thermische Modell.

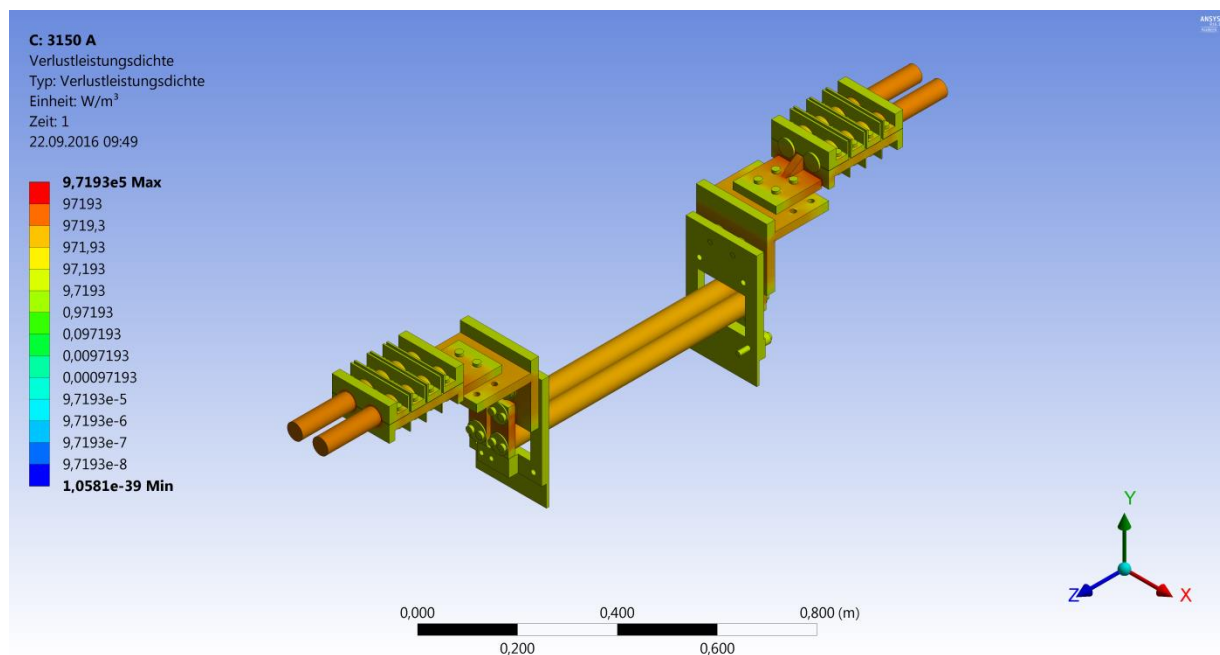
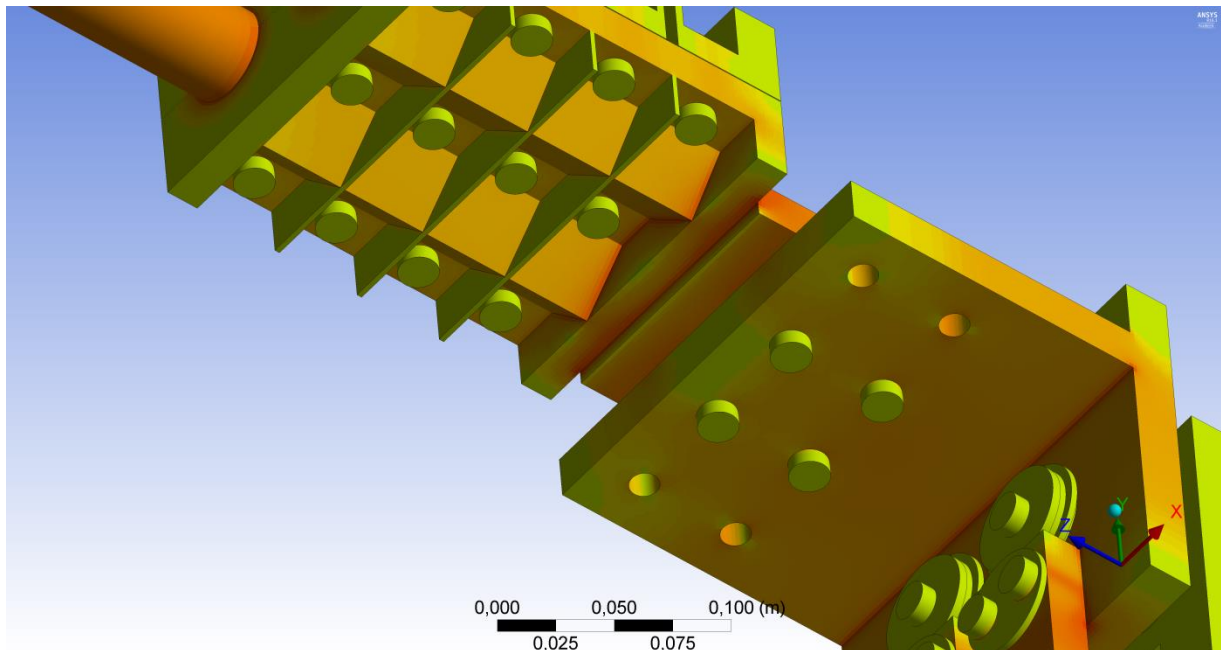


Bild 4-15 – Verlustleistungsdichte für thermische Simulation

Das Ergebnis der Verlustleistungsdichte liefert bereits einige Erkenntnisse zum thermischen Verhalten des Wandlers beziehungsweise dessen Hauptstrombahnkomponenten. In Bild 4-16 ist etwa zu erkennen, dass die Verlustleistungsdichte im Übergangsbereich von der Seilklemme auf die Verbindungsflasche, an der Unterseite der Seilklemme eine hohe Konzentration aufweist. Zudem befinden sich zwischen Seilklemme und Winkellasche mit

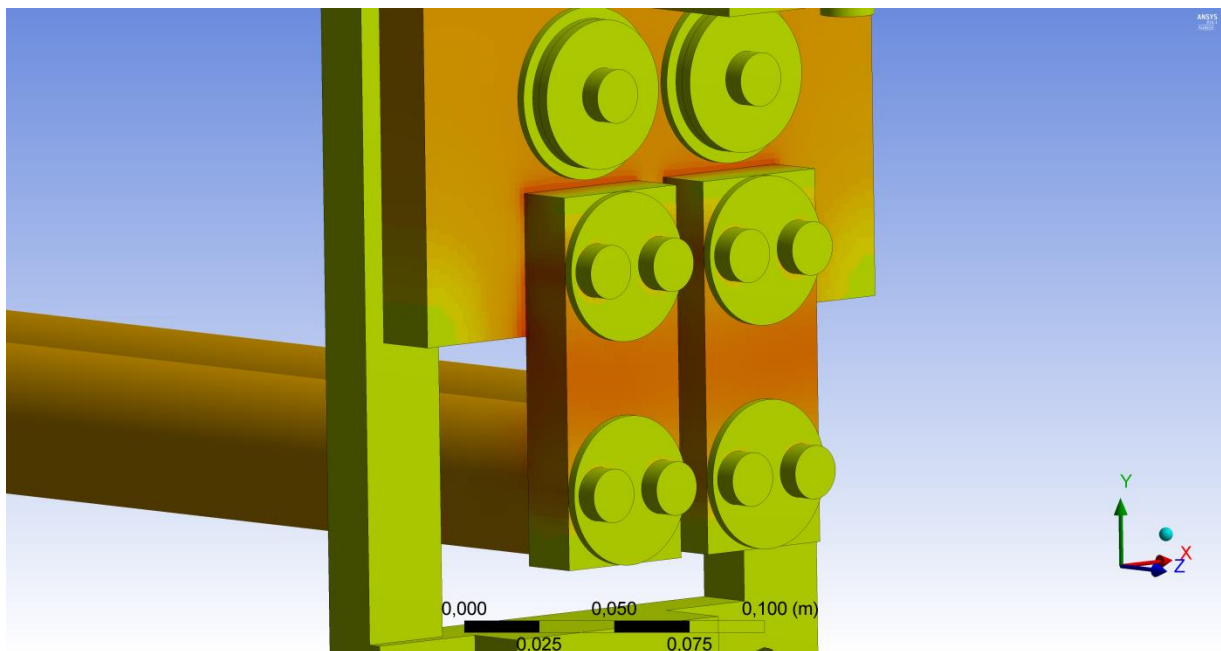


den Kontaktringen jene Komponenten maximaler Verlustleistungsdichte. Dies erklärt unter anderem die hohen Übertemperaturen, welche an dieser Stelle gemessen werden konnten.



**Bild 4-16 – Stromdichte im Übergangsbereich Seilklemme auf Winkellasche**

Ähnlich verhält es sich im Bereich der Verbindungslaschen. Hier, siehe nachfolgendes Bild, lässt sich ebenfalls eine verhältnismäßig hohe Verlustleistungsdichte an den oberen Enden der Verbindungslaschen feststellen.



**Bild 4-17 – Stromdichte im Übergangsbereich Seilklemme auf Winkellasche**

Dies korreliert mit den Messwerten aus den Versuchen, bei welchen ein Temperaturgefälle



von einigen Grad Celsius vom oberen Ende zum unteren Ende der Verbindungslasche beobachtet werden konnte.

### 4.3.3 Variation der Simulationsparameter

Da die Wärmeabgabe von den Primärleiterstäben an das sie umgebende Öl von der Ölströmung abhängig und eine CFD-Simulation für ein solch großes Modell mit einem ausreichend feinen Rechengitter jedoch sehr zeit- und hardwareintensiv ist, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Hierzu wurde der Wärmeübergangskoeffizient von den Primärleitern an das Öl im einem Bereich von 5 bis 150 W/m<sup>2</sup>K variiert, siehe Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5 - Wärmeübergangswert für Parameterstudie

| Wärmeübergangswert<br>in W/m <sup>2</sup> K | Verwendet bei Variationspunkt |
|---|-------------------------------|
| 5   | 0 bis 9                       |
| 10  | 10 bis 19                     |
| 15  | 20 bis 29                     |
| 20  | 30 bis 39                     |
| 25  | 40 bis 49                     |
| 50  | 50 bis 59                     |
| 75  | 60 bis 69                     |
| 100   | 70 bis 79                     |
| 125   | 80 bis 89                     |
| 150   | 90 bis 99                     |

Die Kontakt- bzw. Übergangswiderstände zwischen zwei in Kontakt stehenden Komponenten verursachen zusätzliche Verluste, die in Form von Wärme in Erscheinung treten. Da diese Wärme zum überwiegenden Teil zwischen den Komponenten entsteht, kann diese nur durch direkte Wärmeleitung der Kontaktpartner abtransportiert werden. Dies entspricht einem zusätzlichen Wärmestrom im System. Daher wurden als weitere Parameter vier zusätzliche Wärmeströme an den Leiterseilen als Randbedingung definiert und in ihrer Höhe ebenfalls von 5 bis 200 W variiert. Daraus ergaben sich insgesamt 100 Variationspunkte der Parameter für welche jeweils die Temperaturen berechnet wurden. Die Werte des externen Wärmestroms sowie deren Zuweisung zu den betreffenden Variationspunkten ist in Tabelle 4-6 aufgelistet.

Tabelle 4-6 - Wärmestromwert für Parameterstudie

| Wärmestromwert<br>in W | Verwendet bei Variationspunkt         |
|------------------------|---------------------------------------|
| 5                      | 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 |
| 10                     | 1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91 |
| 15                     | 2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82, 92 |
| 20                     | 3, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 73, 83, 93 |
| 25                     | 4, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74, 84, 94 |
| 50                     | 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95 |
| 75                     | 6, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 76, 86, 96 |
| 100                    | 7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87, 97 |
| 150                    | 8, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 78, 88, 98 |
| 200                    | 9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89, 99 |

Die Summe aller aufgebrachtten Randbedingungen für das thermische Modell sind im folgenden Bild am Beispiel des Variationspunktes 0 dargestellt.

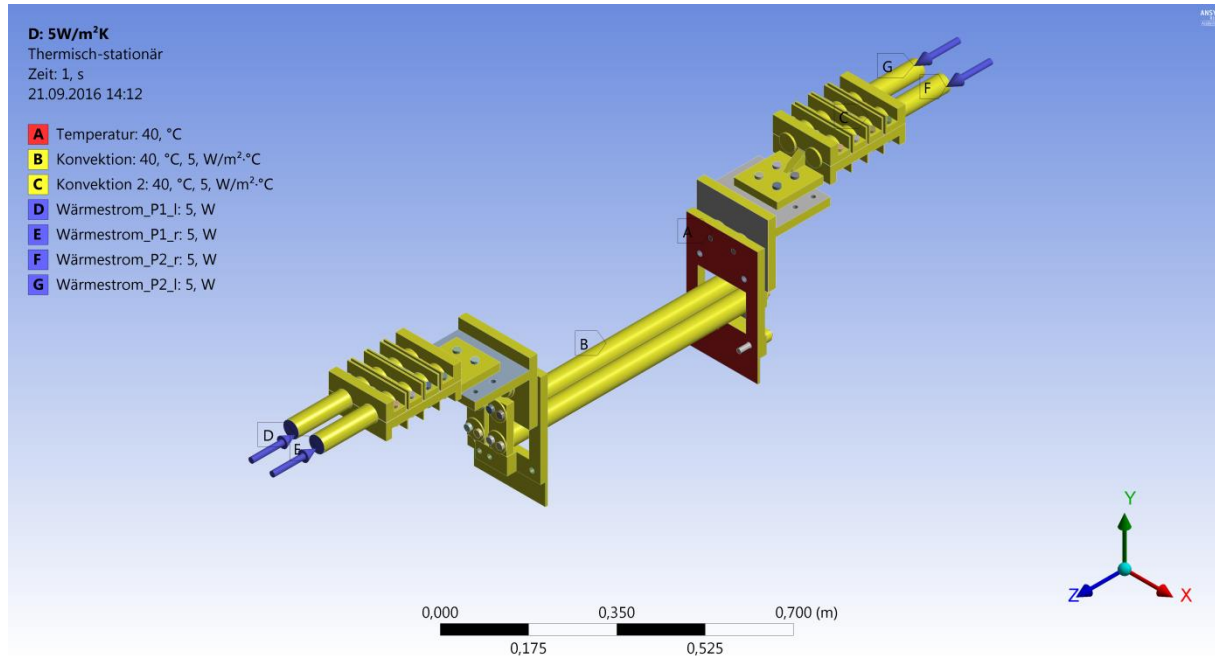


Bild 4-18 – Thermisches Modell mit applizierten Randbedingungen

Da die Berechnungen eine erste Näherung liefern sollen, wurde die Wirkung der Strahlung nicht separat berücksichtigt, sondern in der Konvektionsrandbedingung mit erfasst.

#### 4.3.4 Abgleich mit den Stützstellen

Nach Durchführung der Simulation wurden die Ergebnisse, sprich die Temperaturen der unterschiedlichen Komponenten mit den Messwerten aus den Belastungsversuchen, siehe Unterkapitel 3.2.3 und Unterkapitel 3.3.2, verglichen und die am besten korrelierenden Variationspunkte für die jeweiligen Wärmeübergangszahlen ausgewählt. Aus den jeweiligen Simulationsparametern wurde dann der externe Wärmestrom ausgelesen und mit dessen Hilfe näherungsweise die Summe der Kontaktwiderstände des gesamten Systems bestimmt.

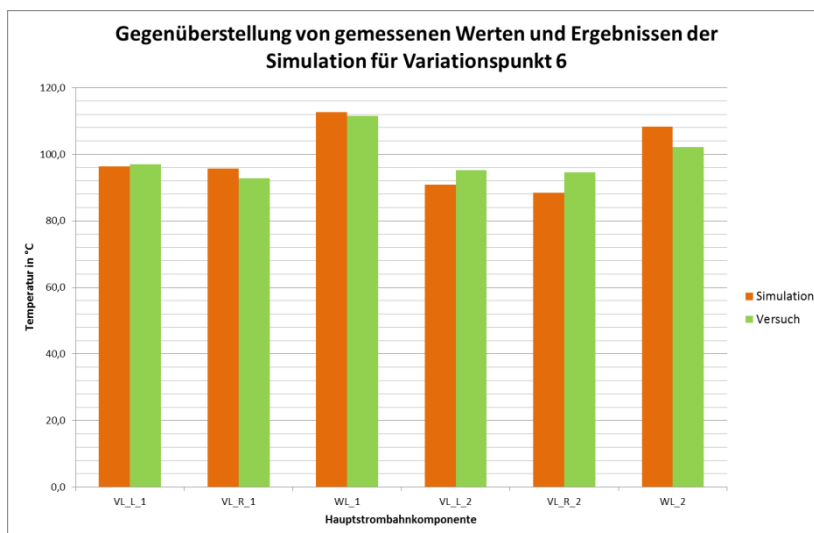


Diagramm 4-6 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 6

Die Diagramme Diagramm 4-6, Diagramm 4-7 und Diagramm 4-8 zeigen die Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen aus dem Belastungsversuch 2 und den berechneten Ergebnissen der thermischen Simulation. Daraus ist zu entnehmen, dass die Simulationsergebnisse gut mit den Messwerten übereinstimmen.

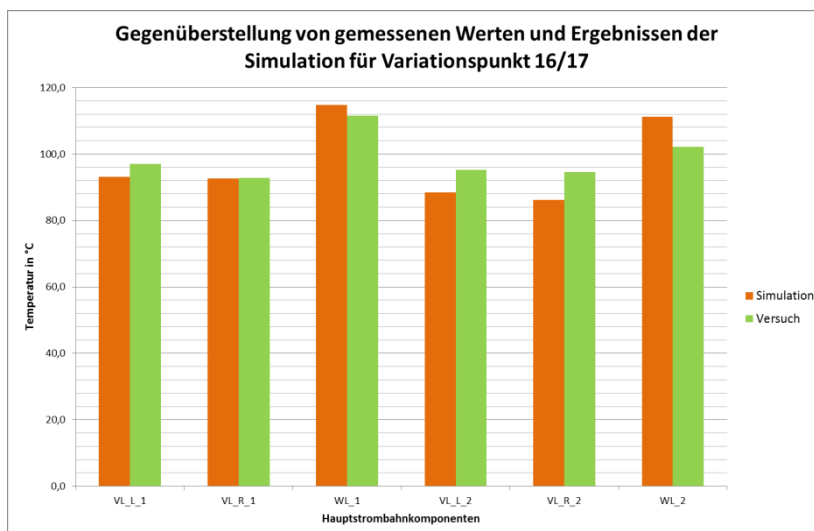


Diagramm 4-7 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 16/17

Für die Werte in Diagramm 4-7 wurde aus den Variationspunkten 16 und 17 der Mittelwert gebildet und dieser den Messwerten aus dem Versuch gegenüber gestellt.

Die maximale Abweichung von den gemessenen Temperaturen für diese drei hier vorgestellten Variationspunkte beträgt knapp 10 % und dies lediglich bei der Winkellasche im Variationspunkt 27, siehe nachfolgendes Diagramm.

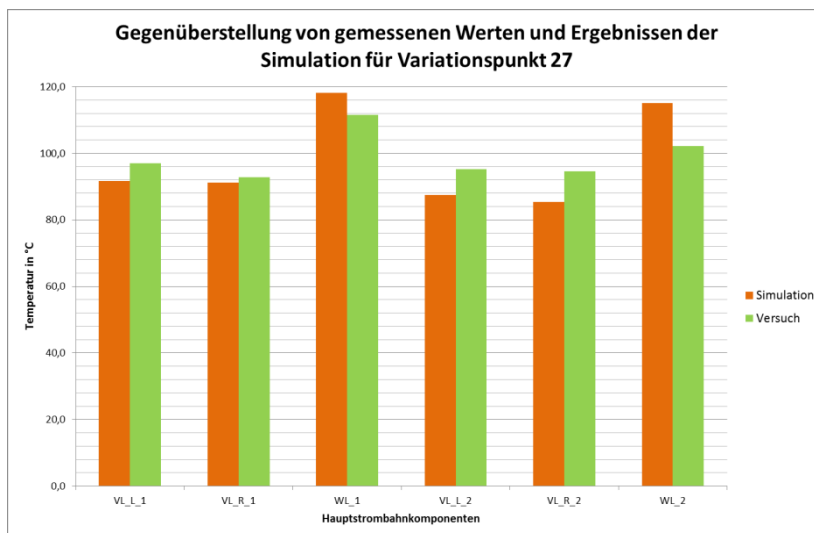


Diagramm 4-8 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 27

#### 4.3.5 Ergebnisse

Aus den zusätzlich aufgebrachtten Wärmeströmen wurden, wie bereits erwähnt, die Kontaktwiderstände berechnet. Die bestimmten Gesamtkontaktwiderstände für diese drei Variationspunkte sowie der Gesamtwiderstand der Hauptstrombahn ohne Berücksichtigung der Kontaktwiderstände sind in nachfolgender Tabelle angegeben.

Tabelle 4-7 - Berechnete Gesamtkontaktwiderstände

| Variationspunkt | Berechneter Gesamtkontaktwiderstand | Gesamtwiderstand der Hauptstrombahn |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| #               | in $\mu\Omega$                      | in $\mu\Omega$                      |
| 6               | 30,23                               | 14,46                               |
| 16/17           | 35,27                               |                                     |
| 27              | 40,31                               |                                     |

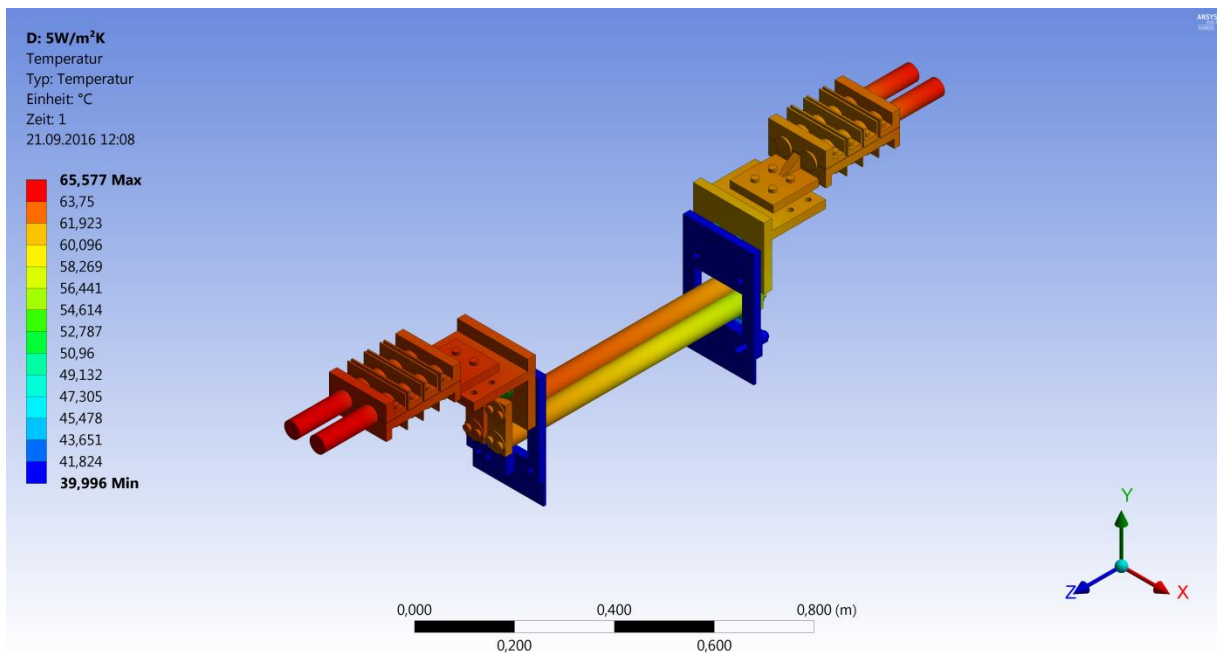
Wie anhand der Werte in Tabelle 4-7 zu erkennen ist, befinden sich die in erster Näherung berechneten Gesamtkontaktwiderstände, sprich die Summe der einzelnen Kontaktwiderstände, in der 2 bis 3-fachen Größenordnung des Hauptstrombahnwiderstands ohne Kontaktwiderstände.

Weiterst war besonders die Temperaturverteilung des Systems von Interesse. Hierfür wurden unterschiedliche Variationspunkte miteinander verglichen. Zwei dieser betrachteten Variationspunkte, sowie die angenommenen äußeren Randbedingungen für diese beiden, sind in Tabelle 4-8 aufgelistet.

**Tabelle 4-8 - Betrachtete Variationspunkte für Temperaturverteilung**

| Variationspunkt | Wärmeübergangs-Koeffizient Primärleiter<br>in $W/m^2K$ | Äußerer Wärmestrom<br>je Leiter<br>in W | Strom<br>in A |
|-----------------|--|---|---------------|
| #               |  |   |               |
| 0               | 5  | 5                                       | 3150          |
| 27              | 15   | 100                                     | 3150          |

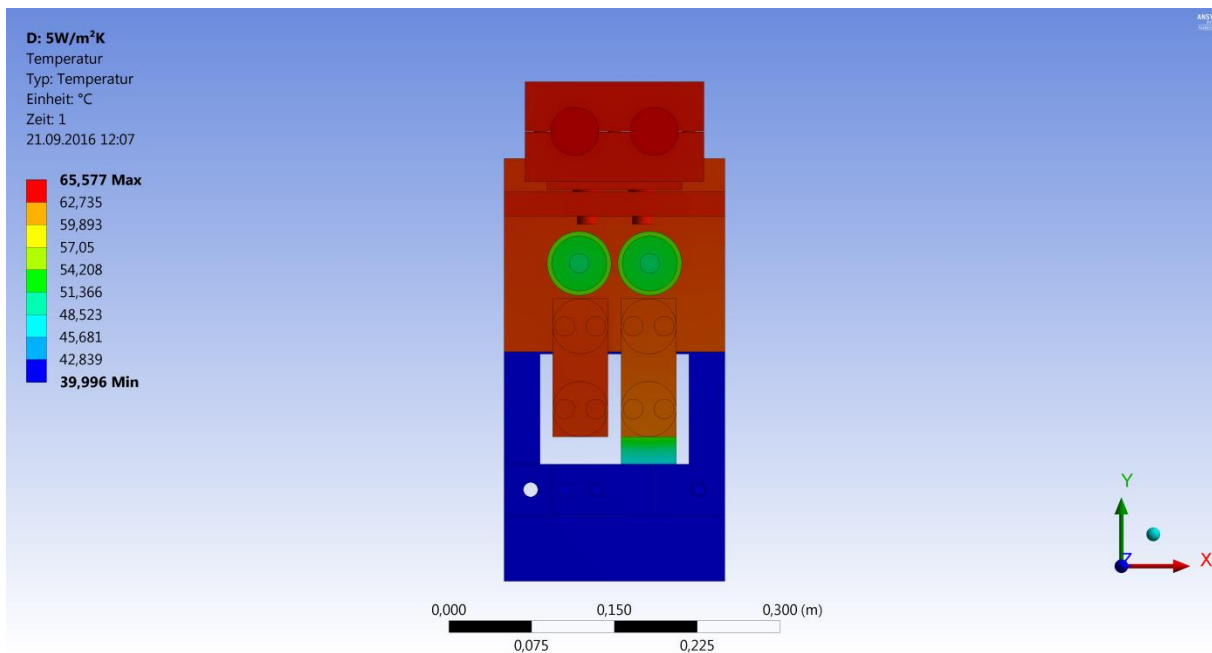
In den Bildern Bild 4-19 bis Bild 4-21 wurde zur besseren Veranschaulichung die Temperaturlegende auf die maximale auftretende Temperatur begrenzt um den Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Komponenten besser darstellen zu können.



**Bild 4-19 – Temperaturverteilung des Gesamtsystems für Variationspunkt 0**

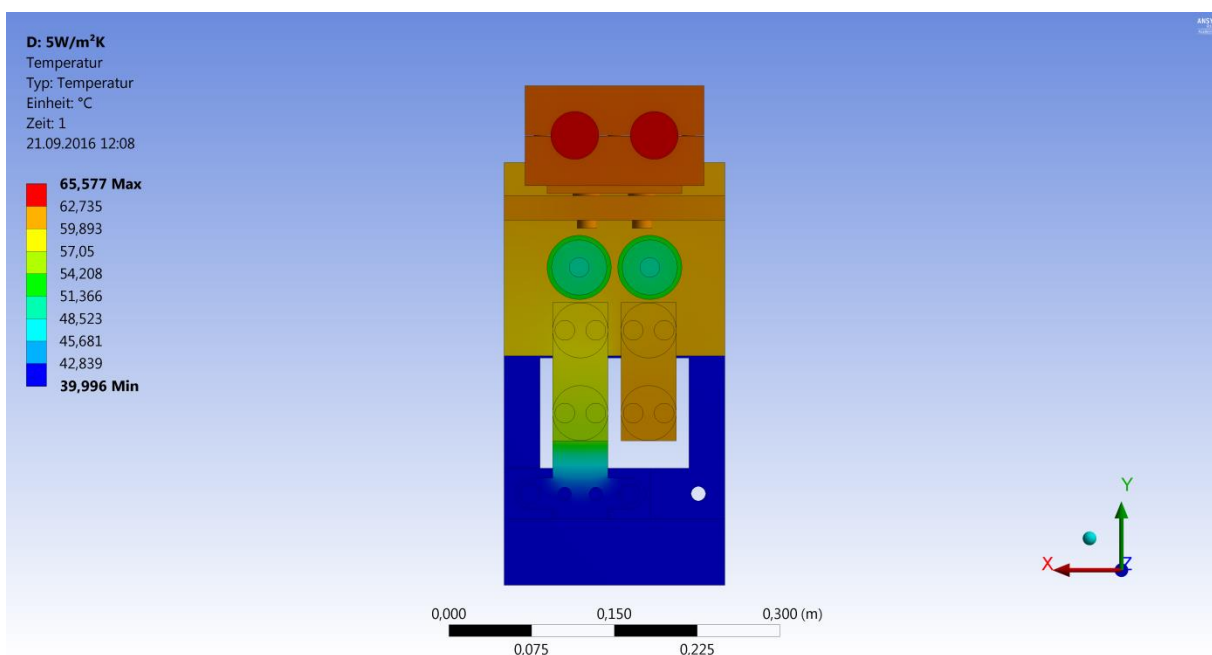
Das vorangegangene Bild zeigt hierbei die Temperaturverteilung für den Variationspunkt 0. Wie zu erkennen ist bestätigt sich die Annahme die im Unterpunkt 3.2.3 getroffen wurde. Die Serienlasche auf der Seite P2/A bietet für das System eine thermisch leitende Verbindung zum verhältnismäßig kühlen Wandlergehäuse, welches eine Wärmesenke darstellt.

Dies ist besonders beim Vergleich der Temperaturverteilungen der Seiten P1 und P2/A, siehe Bild 4-20 und Bild 4-21, zu erkennen.



**Bild 4-20 – Temperaturverteilung an der Seite P1 für Variationspunkt 0**

Die Serienlasche senkt dabei nicht nur die Temperatur des Primärleiters und der Verbindungslasche, mit welcher sie in unmittelbarem Kontakt steht, sondern auch jene der restlichen Komponenten der Hauptstrombahn auf der Seite P2/A.



**Bild 4-21 – Temperaturverteilung an der Seite P2/A für Variationspunkt 0**

Als zweiter Punkt sei hier der Variationspunkt 27 betrachtet. Die Temperaturverteilung des Gesamtsystems für diesen Punkt ist in Bild 4-22 dargestellt.

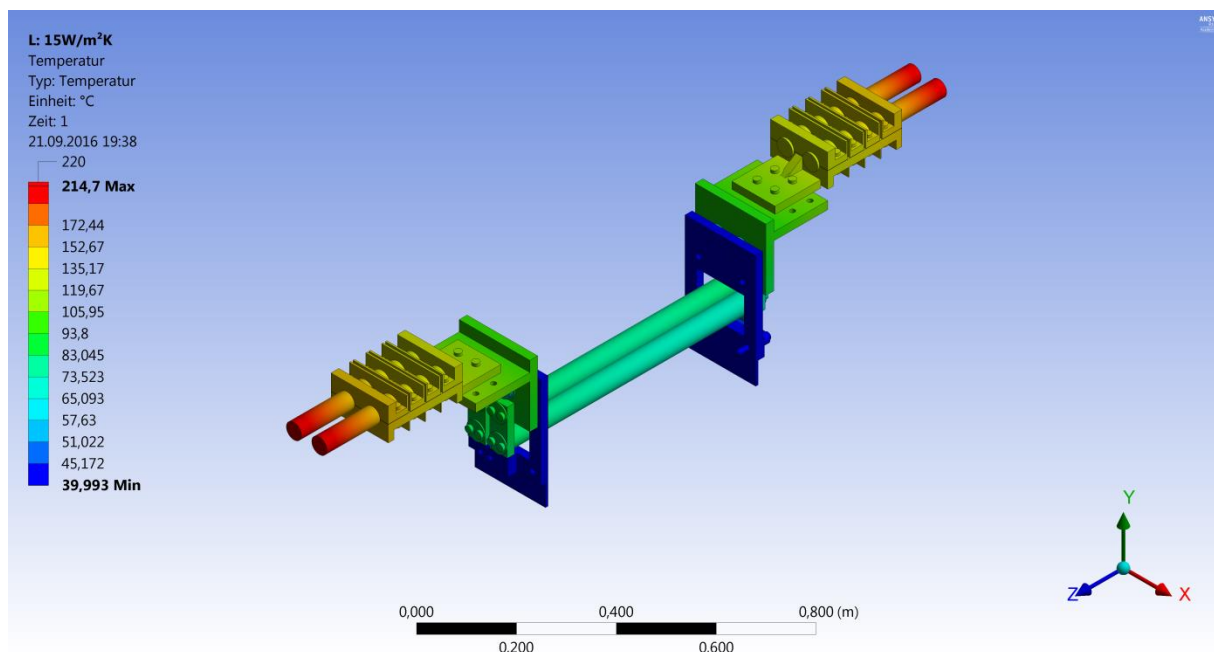


Bild 4-22 – Temperaturverteilung des Gesamtsystems für Variationspunkt 0

Aufgrund der höheren maximal auftretenden Temperatur sind hier die Temperaturdifferenzen jedoch weniger gut sichtbar als bei den Bildern des Variationspunkts 0. Zu erkennen ist, dass die Primärleiter, abgesehen von den Gehäuseanschlussplatten, die niedrigsten Temperaturen der Hauptstrombahn aufweisen.

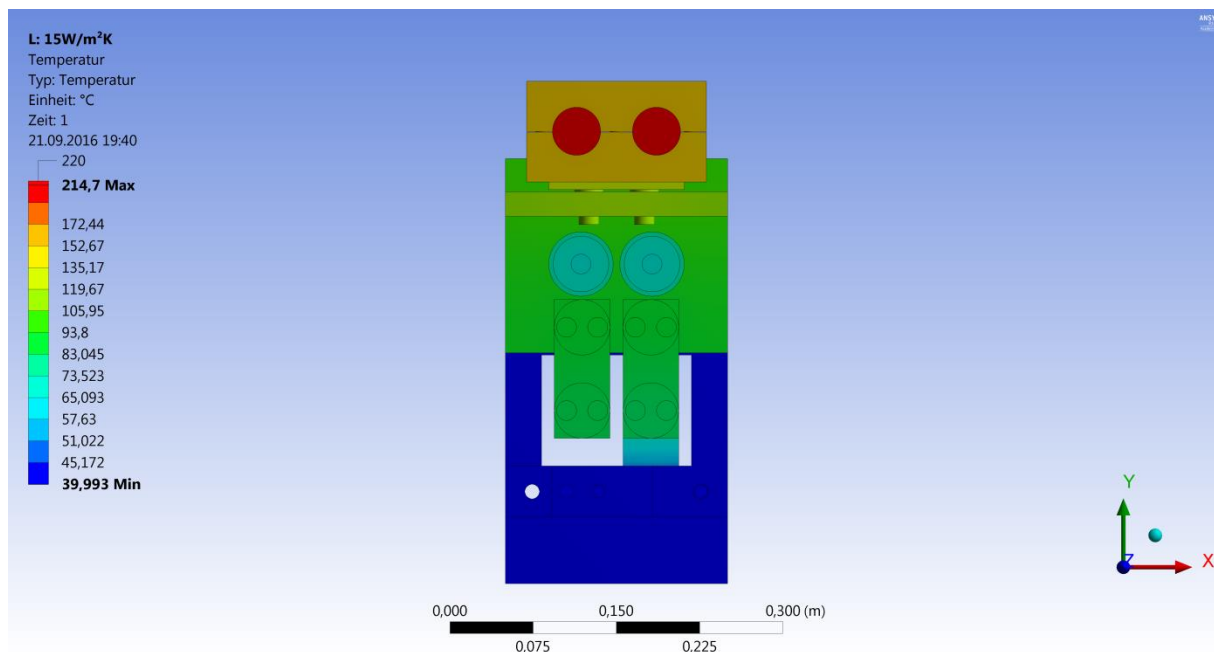


Bild 4-23 – Temperaturverteilung an der Seite P1 für Variationspunkt 0

Die Seilklemme stellt die Komponente höchster Temperatur dar, siehe Bild 4-23, da das Freileitungsseil selbst nicht Teil des Wandlers ist. Die Simulationsergebnisse indizieren zudem, dass eine zunehmende Kühlung des Primärleiters und der damit inhärente größere

externe Wärmestrom, der nötig ist um die Temperaturen aus den Versuchen zu erreichen, insgesamt zu einer Temperaturverschiebung in Richtung der Seilklemmen führt, wodurch diese zunehmend höhere Temperaturen erreichen.

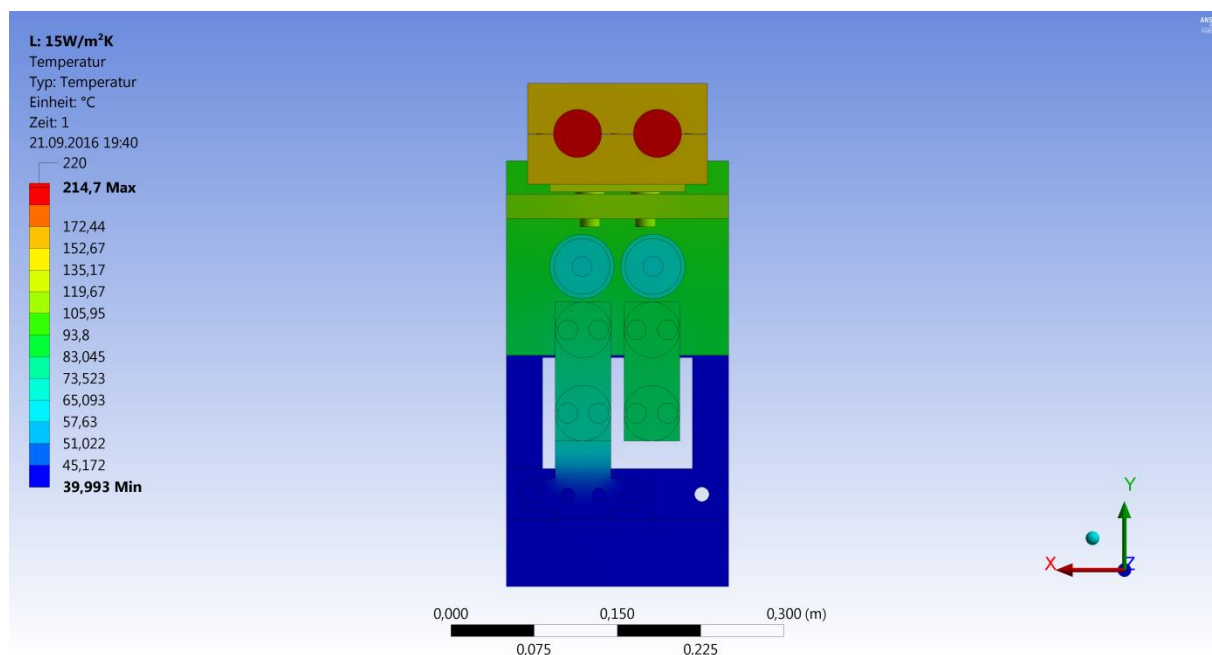


Bild 4-24 – Temperaturverteilung an der Seite P2/A für Variationspunkt 0

Das obige Bild zeigt auch hier wieder, dass die Serienlasche die Temperaturen auf der Seite P2/A im Vergleich zur Seite P1 mindert.

#### 4.4 CFD – Simulation

Im Zuge der thermischen Belastungsversuche wurden regelmäßig Ölproben entnommen und auf deren Feuchtigkeit untersucht. Dabei zeigte sich bei der Auswertung der Feuchteentwicklungen, siehe Diagramm 3-29 und Diagramm 3-30, dass hier aufgrund der Belastungsart ein unterschiedliches Verhalten vorliegt. Nachdem der Wandler während des Belastungsversuchs unter erhöhter Umgebungstemperatur, siehe Unterkapitel 3.2, mit 100 bis 300 Stunden über verhältnismäßig lange Zeitintervalle konstant mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom beaufschlagt wurde lag die Vermutung nahe, dass hier das System einen thermisch quasistationären Zustand erreicht, in welchem das Temperaturgefälle über den Wandler minimal wird. Da Messwandler für Gewöhnlich über keine Ölumwälzpumpen verfügen, erfährt das Öl den Großteil seiner Bewegung durch natürliche Konvektion. Diese ist aber an das Vorhandensein eines thermischen Ungleichgewichtes gebunden, welches in der Praxis durch die täglichen Stromschwankungen, die Einwirkung der Sonne und dem Umgebungstemperaturunterschied, welchem der Wandler ausgesetzt ist, gegeben ist. Daher sollte mit Hilfe einer CFD-Simulation die Ölbewegung im kalten Zustand und im thermisch



eingeschwungenen Zustand untersucht werden. In diesem Unterkapitel werden das verwendete Modell sowie die Ergebnisse dieser Simulationen vorgestellt und diskutiert.

#### 4.4.1 Das Modell

Im Gegensatz zu den voran gegangenen Simulationen wurde für die CFD-Simulation das vollständige Wandlermodell, welches in Bild 4-25 zu sehen ist, verwendet. Hierbei wurde auf die Implementierung der Dehndosen, welche oben auf dem Kopf des Wandlers sitzen, verzichtet, da diese für die Ölbewegung vom Kopf zum Sockel keine entscheidende Rolle spielen.

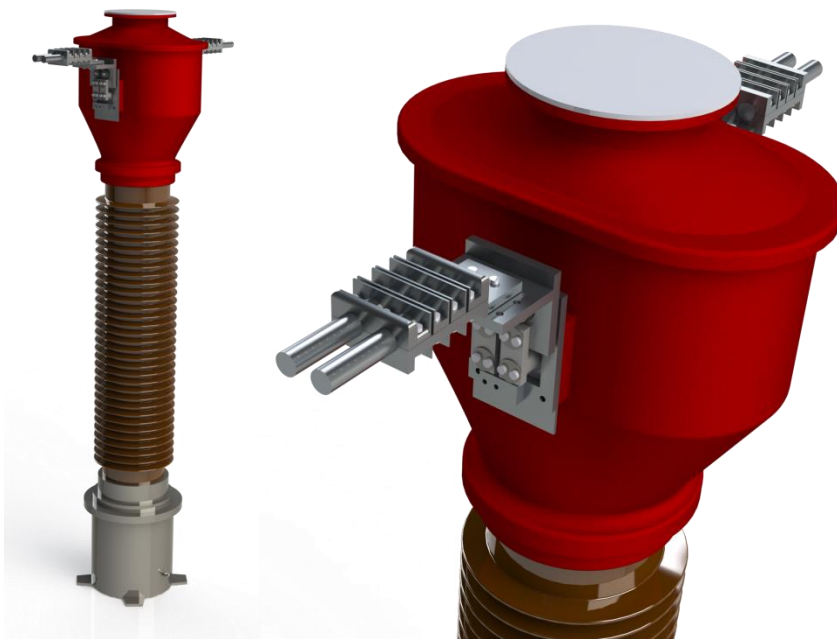
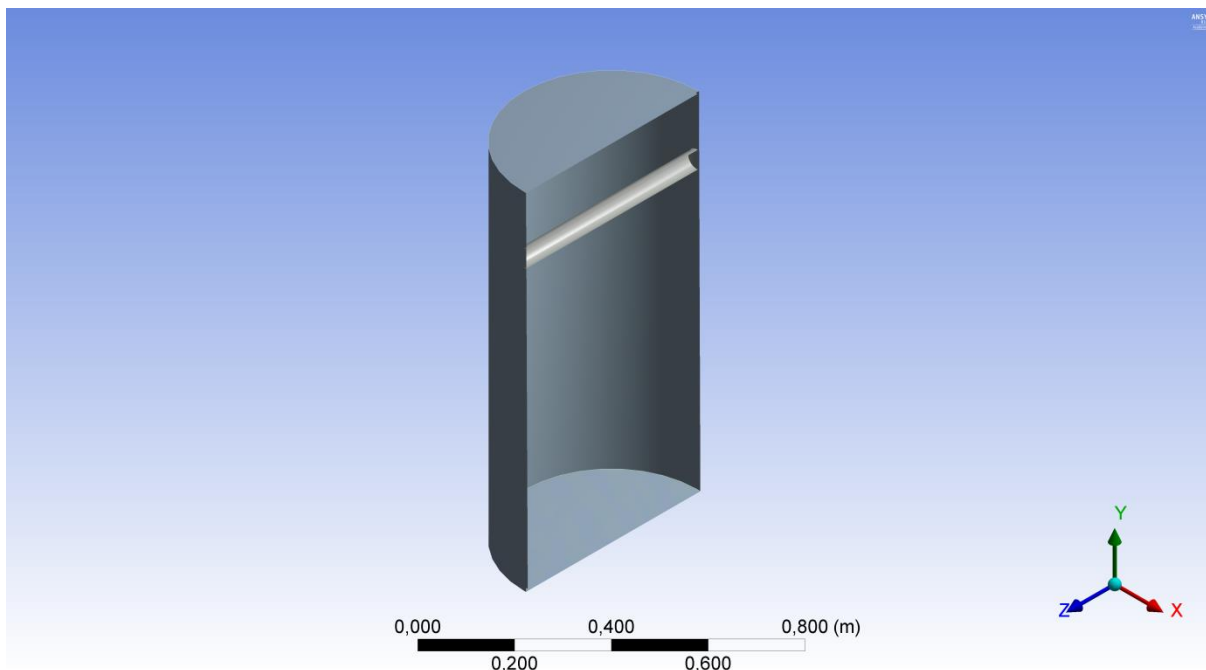


Bild 4-25 –CAD-Modell für CFD-Simulation

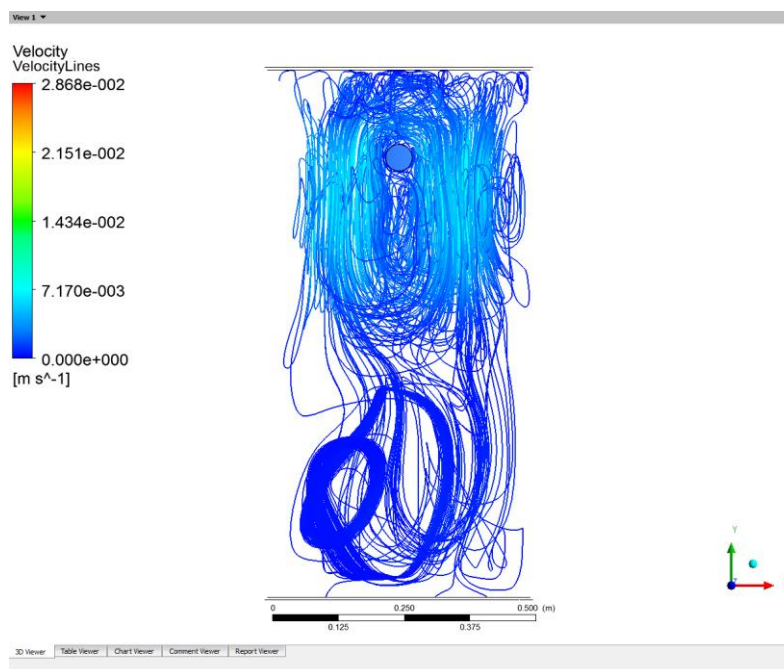
#### 4.4.2 Studie der Ölbewegung / Ergebnisse

Bevor das vollständige Modell berechnet wurde kam ein vereinfachtes Modell zum Einsatz um den grundsätzlichen Vorgang der Ölbewegung in einer ähnlichen Anordnung zu untersuchen. Dieses vereinfachte Modell, welches in Schnittdarstellung in Bild 4-26 dargestellt ist, besteht aus einem Zylinder von einem Meter Höhe und einem Durchmesser von 50 cm, in welchem ein einzelner Heizleiter angebracht ist. Als Randbedingung wurde an der Oberfläche des Zylinders ein Wärmeübergangskoeffizient von  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen und die Umgebungstemperatur mit  $40 \text{ °C}$  vorgegeben. Als Material für den Zylinder wurde Aluminium, für den Heizleiter Kupfer gewählt. Die einzige Wärmequelle stellt hierbei der Heizleiter dar, für welchen eine innere Wärmeerzeugung von  $27 \text{ kW/m}^3$ , was der Heizleistung durch den thermischen Bemessungsgrenzstrom entspricht, gewählt wurde. Anschließend wurde eine transiente Simulation über 180 Minuten erstellt.



**Bild 4-26 –vereinfachtes Modell für Ölbewegungsstudie in Querschnittsdarstellung**

Das nachfolgende Bild zeigt die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Volumen zu Beginn der Simulation. Wie darin ersichtlich ist, erstreckt sich die Ölbewegung über die gesamte Höhe des Zylinders, wobei sich bereits hier die größte Strömungsgeschwindigkeit im oberen Bereich konzentriert.



**Bild 4-27 –Ölbewegung zu Beginn des Simulationszeitraums beim vereinfachten Modell**

Nachfolgendes Diagramm zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten entlang der y-Koordinate am linken und rechten Rand, sowie in der Mitte des Zylinders. Das Koordinatensystem ist dabei mittig im Zylinder platziert.

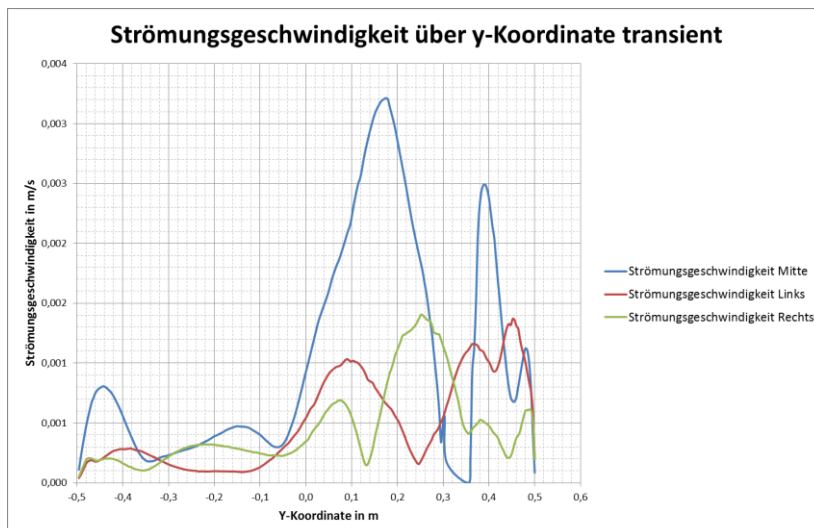


Diagramm 4-9 – Strömungsgeschwindigkeit über y-Koordinate transienter Fall

Bild 4-28 zeigt die Bewegung des Öls bei ausgebildeter Strömung gegen Ende des Simulationszeitraums. Klar ersichtlich ist hierbei, dass sich die Ölbewegung auf quasi kreisförmige Linien zur linken und rechten Seite des Heizleiters beschränkt und die Bewegung zum Boden des Zylinders abbricht.



Bild 4-28 – Ölbewegung gegen Ende des Simulationszeitraums beim vereinfachten Modell

Der Strömungsunterschied wird vor allem beim Vergleich von Diagramm 4-9 und nachfolgendem Diagramm 4-10, welches die Strömungsgeschwindigkeit über der y-Koordinate für den stationären Fall darstellt, ersichtlich. Wie darin zu sehen ist, weißt das Öl im stationären Fall lediglich eine Strömung im Kopfbereich  $y > 0,35$  m auf.

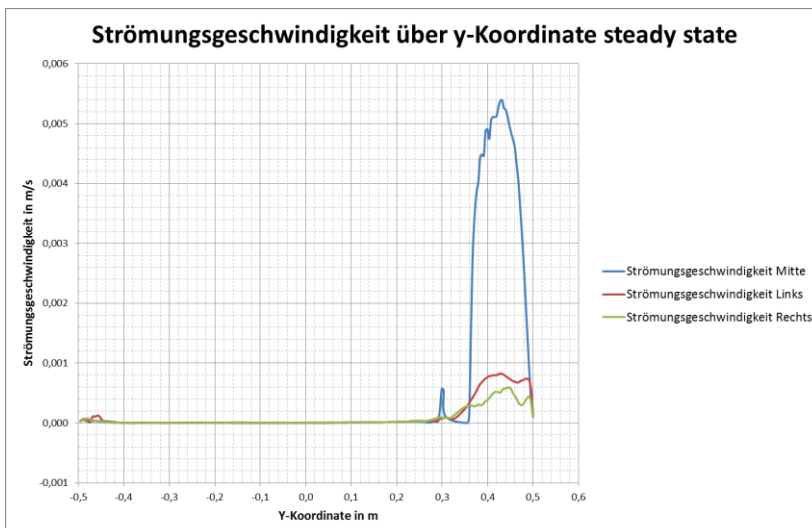


Diagramm 4-10 – Strömungsgeschwindigkeit über y-Koordinate stationärer Fall

Auf Basis dieses Vorversuches wurde schließlich die CFD-Simulation des vollständigen Wandlermodells durchgeführt. Da aber bereits 10 Minuten Erwärmungsvorgang auf einem System mit 32 Prozessoren knapp 2,5 Tage Berechnungszeit in Anspruch nahmen und Ergebnisfiles in der Größe von über 150 GB erzeugten, war eine Simulation des vollständigen transienten Erwärmungsvorgangs, welcher 12 Stunden zu berechnender Simulationszeit entspräche, nicht möglich. Stattdessen erfolgte die Simulation in drei Teilsimulationen. Zuerst wurde eine transiente Strömungssimulation des Erwärmungsvorgangs aus dem kalten Zustand berechnet. Die resultierende Strömung des Öls ist in folgendem Bild in isometrischer Ansicht des Modells dargestellt.

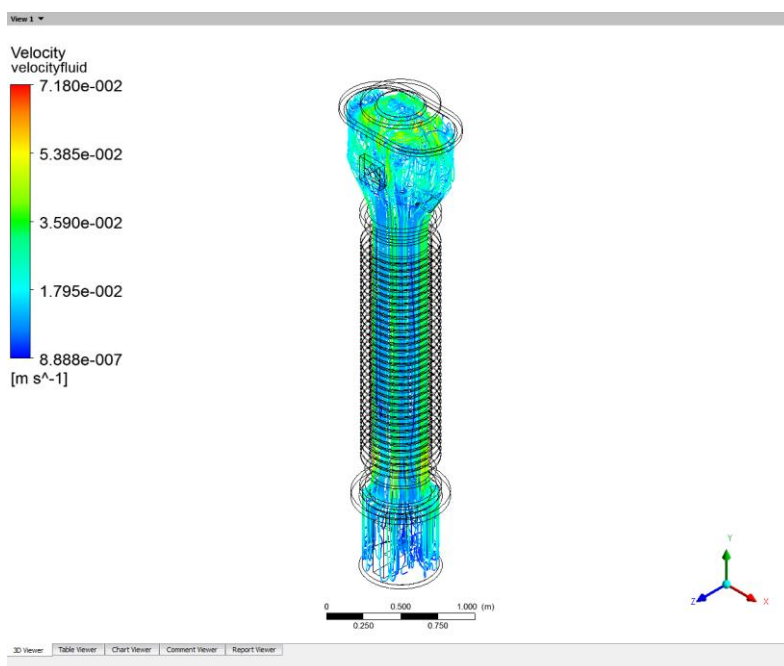
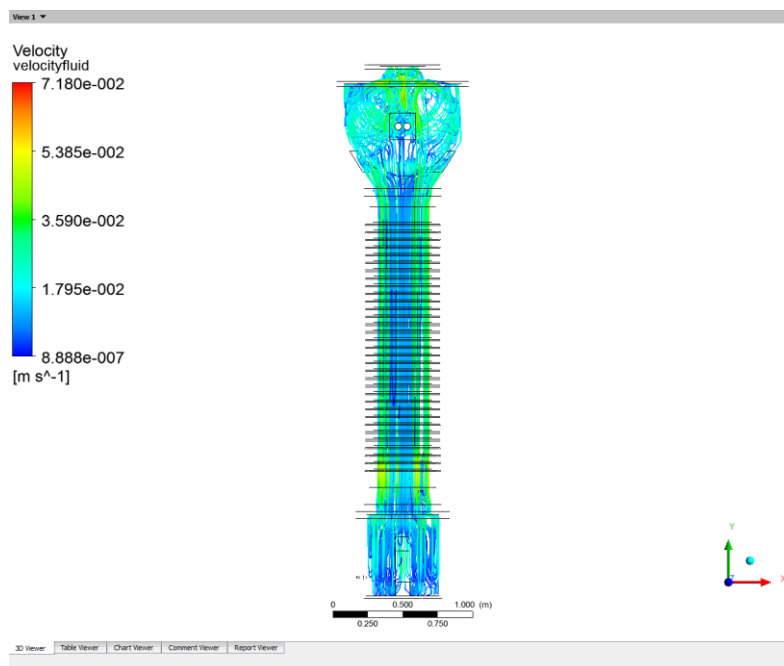


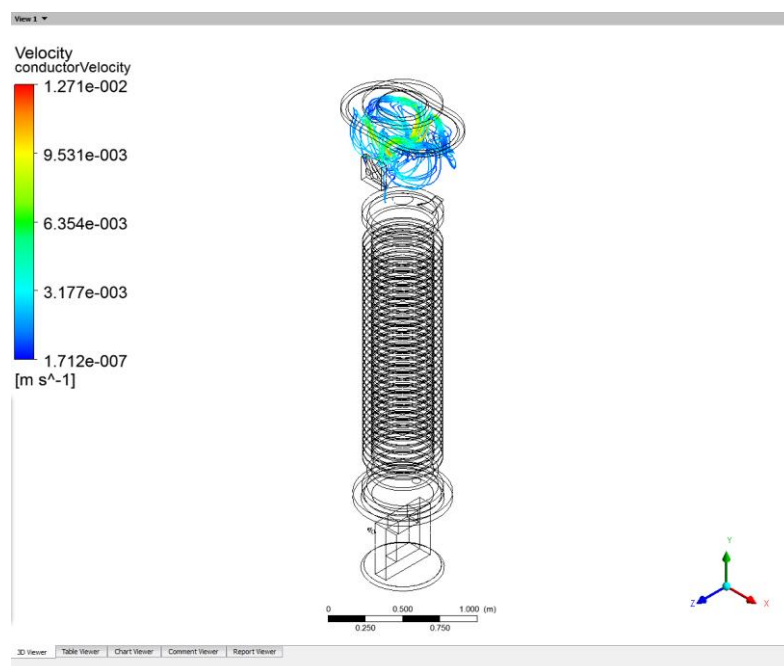
Bild 4-29 –Ölbewegung bei instationärem Zustand (isometrische Ansicht)

Bild 4-30 zeigt selbigen Systemzustand nochmals in der Frontansicht auf den Kombiwandler.

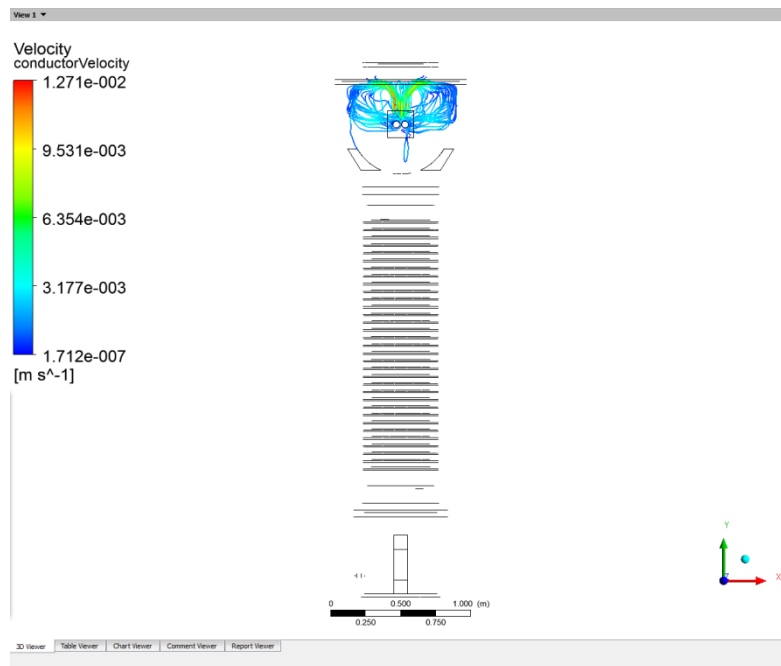


**Bild 4-30 –Ölbewegung bei instationärem Zustand (Frontansicht)**

Anschließend wurde eine stationäre Simulation der Wärmeleitung im System durchgeführt, um somit das System in einen thermisch quasi stationären Zustand zu überführen. Während dieser Simulation wurde jedoch auch die Wärmeübertragung beziehungsweise die innere Wärmeerzeugung der Heizleiter unterdrückt. Die Systemtemperatur stellte sich also lediglich bedingt durch die Umgebungstemperatur, die Wärmeleitungseigenschaften der Materialien und die gewählten Konvektionsbedingungen an den einzelnen Komponenten ein. Abschließend erfolgte erneut eine transiente Strömungsberechnung, hier jedoch mit aktiven Heizleitern, siehe Bild 4-31 und Bild 4-32.



**Bild 4-31 –Ölbewegung bei stationärem Zustand (isometrische Ansicht)**



**Bild 4-32 –Ölbewegung bei stationärem Zustand (Frontansicht)**

Wie bereits beim vereinfachten Zylindermodell kann auch hier die während der Versuche getroffenen Annahme, dass die Öldurchmischung bei Beaufschlagung mit konstantem Strom und konstanter Umgebungstemperatur über längere Zeiträume durch eine erheblich reduzierte natürliche Konvektion des Öls eingeschränkt wird, bestätigt werden.

Durch die genutzte Herangehensweise, die Simulation in Teilsimulationen zu zerlegen, sind diese Ergebnisse jedoch als erste Näherungen zu verstehen. Für exakte Aussagen müsste tatsächlich eine entsprechend umfangreiche Simulation mit noch feinerem Rechenetz durchgeführt werden, was aber an dieser Stelle den Umfang dieser Arbeit maßlos übersteigen würde.

Nichtsdestotrotz konnte mit Hilfe der Simulation eine Tendenz zum angenommenen Verhalten bestätigt werden.

## 5 Zusammenfassung

Untersucht wurde das Verhalten eines 220 kV Kombiwandlers bei Belastung mit dem thermischen Bemessungsgrenzstrom von 3150 A. Es wurden hierfür zwei Belastungsversuche, einer bei erhöhter Umgebungstemperatur und ein weiterer bei erhöhter Umgebungstemperatur und erhöhter Umgebungsluftfeuchte, durchgeführt. Hierbei wurden regelmäßig Ölproben genommen und analysiert. Es wurden dielektrische Vergleichsuntersuchungen mit einem thermisch unbelasteten Wandler angestellt. Zudem wurde begleitend ein Simulationsmodell des Wandlers erstellt und auf mechanische, thermische und fluiddynamische Vorgänge untersucht.

### 5.1 Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur

Der Versuch wurde bei 40 °C Umgebungstemperatur und unbeeinflusster Luftfeuchte durchgeführt. Der Wandler wurde für 5 unterschiedlich lange Zeiträume mit dem Bemessungsgrenzstrom von 3150 A beaufschlagt.

Die höchsten Temperaturen konnten an der Seilklemme mit etwa 150 °C beobachtet werden. An allen Komponenten der Hauptstrombahn konnten deutliche Überschreitung der Grenzwerte für Übertemperaturen, siehe Tabelle 3-4, festgestellt werden.

An der Seilklemme konnte die Ausbildung mehrerer, einzelner, punktueller Verschweißungsstellen sowie eine deutliche Fremdschichtbildung innerhalb der Seilklemme nachgewiesen werden. An den Verbindungsglaschen wurde außerdem eine Heißkontaktbildung und B-Fritten beobachtet, was in den Diagramm 3-7 bis Diagramm 3-9 dargestellt wurde. Ferner kam es zu einem thermo-mechanischen Kraftverlust der Schraubverbindungen, im Speziellen im Bereich der Seilklemmen. Dieser äußerte sich in der Form, dass die Seilklemmenverschraubungen, die zu Beginn des Versuchs allesamt mit 46 Nm angezogen wurden, eine Lockerung auf unter 20 Nm erfuhren, sodass die Schraubverbindungen Großteil mit bloßen Händen gelöst werden konnten.

### 5.2 Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit

Der Versuch wurde bei 40 °C Umgebungstemperatur und erhöhter Luftfeuchte von durchschnittlich 70 % durchgeführt. Der Wandler wurde für 13 Zyklen zu je 48 Stunden mit dem Bemessungsgrenzstrom von 3150 A beaufschlagt.

Während des Versuchs konnten an den Winkellaschen, den Verbindungsglaschen sowie den Seilklemmen thermische Grenzwertüberschreitungen, entsprechend den Grenzwerten in Tabelle 3-4, festgestellt werden. Des Weiteren wurden Kontaktdegradierungen an Verbindungsglaschen und Seilklemmen, einhergehend mit einer deutlichen Fremdschichtbildung, beobachtet.

Gleichzeitig kam es erneut zu einer thermo-mechanisch bedingten Lösung der Seilklemmen.

### **5.3 Vergleichsuntersuchungen**

Während der ersten Vergleichsuntersuchung wurden die Wandler nur mit verminderter Spannung geprüft. Dabei ließen sich beim Referenzobjekt keine nennenswerten Teilentladungsaktivitäten feststellen, sehr wohl jedoch beim Testobjekt. Die Muster wiesen auf ein Grenzsichtproblem, zum Beispiel verursacht durch die Delamination von Papierlagen infolge des thermischen Belastungsversuches, hin.

Die zweite Vergleichsuntersuchung zeigte beim Testobjekt starke Anzeichen für die Ausbildung einer Kriechstrecke, während das Referenzobjekt einen ähnlichen aber wesentlich weniger ausgeprägten Verlauf aufwies.

Die Verlustfaktormessung ergab einen um etwa 20 Prozent erhöhten Verlustfaktor beim Testobjekt im Vergleich zum Referenzobjekt, welcher über den Zeitraum der Vergleichsuntersuchungen weitestgehend unverändert blieb.

Angemerkt sei an dieser Stelle noch, dass die Prüfzeiten, welche die Norm DIN EN 61869 vorgibt, bei den durchgeführten Untersuchungen teilweise unzureichend kurz gewesen wären, da sich einige der Teilentladungsaktivitäten erst nach ein paar Minuten nachweisen ließen.

### **5.4 Untersuchung des Mineralöls**

Die Eingangsmessungen zeigten die Einhaltung der maximalen Wasserkonzentration von 10 ppm nach IEC 61181:2007. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Messwerte teilweise kleiner der Toleranz der quantitativen Wasserbestimmung durch Titration, waren. Auch die eingangs durchgeführte Analyse der gelösten Gase blieb unauffällig.

Auch beim ersten Belastungsversuch „Thermischer Belastungsversuch bei erhöhter Umgebungstemperatur“ blieben die gemessenen Feuchtigkeitswerte des Öls unter den Grenzwerten und wies keinen deutlichen Trend auf.



Im Vergleich zum Belastungsversuch 1 konnte beim Belastungsversuch 2 „Thermischer Belastungsversuch unter erhöhter Luftfeuchtigkeit“ eine Zunahme der Ölfeuchte jedoch keine Grenzwertüberschreitung festgestellt werden.

Der Feuchte- sowie Gasgehalt des Öls blieb während der gesamten thermischen Belastungsversuche unter den vorgegebenen Grenzwerten. Die relative Sättigung des Mineralöls sowie die näherungsweise Berechnung der Papierfeuchte mit Hilfe von Gleichgewichtskurven und Näherungsformeln indizierten zudem ebenfalls trockenes Papier.

## 5.5 Modellierung und Simulation

Für die Untersuchung mechanischer, thermischer und fluiddynamischer Vorgänge wurde ein CAD-Modell des Wandlers erstellt und mit Hilfe des Softwarepakets ANSYS Mechanical 16.1 untersucht.

Die mechanische Simulation zeigte dabei geringfügige Rückwirkungen des Prüfaufbaus auf den Prüfling in Form von Kontaktdruckänderungen. Diese bewegten sich aber Großteils unter 3 % oder mehrheitlich in einer Verlagerung dieser Drücke, vor allem im Bereich der Kontaktringe und der Primärleiterkontaktflächen.

Im Zuge der thermischen Simulation, genauer der elektro-thermisch gekoppelten Simulation, wurde eine Parameterstudie mit 100 Simulationspunkten, den Variationspunkten, für die näherungsweise Berechnung der Gesamtkontaktwiderstände der Hauptstrombahn durchgeführt. Es konnte dabei besonders für die Variationspunkte 6 den Mittelwert aus 16 und 17 sowie den Punkt 27 eine sehr gute Näherung an die Messwerte erzielt werden. Auf Basis deren Simulationsparameter wurde ein Gesamtkontaktwiderstand in der 2 bis 3-fachen Höhe des Hauptstrombahnwiderstands ohne Kontaktwiderstände bestimmt.

Weiterst wurden Temperaturverteilungen für das Gesamtsystem berechnet wodurch die während der Versuche aufgestellte Vermutung, dass die Serienlasche an der Wandlerseite P2/A eine thermische Senke darstellt, welche die Komponenten dieser Seite kühlt, bestätigt werden konnte.

Die für die thermische Simulation eingangs durchgeführte Berechnung der Verlustleistungsdichte der Hauptstrombahn indiziert ein Temperaturgefälle entlang der Verbindungslaschen sowie eine erhöhte Erwärmung an der Stirnseite der Winkellaschen beziehungsweise im Übergangsbereich von Seilklemmen auf Winkellaschen.

Mit Hilfe der CFD-Simulation konnte gezeigt werden, dass die Ölbewegung im quasistationären thermischen Zustand des Wandlers durch ein Wegfallen der natürlichen Konvektion stark vermindert und somit die Öldurchmischung zwischen Kopf- und Sockel des

Wandlers beeinträchtigt wird. Dieser Zustand stellte sich beim Wandler während des ersten Belastungsversuches ein, nicht hingegen beim Belastungsversuch 2. Dadurch dürften die Messwerte der Ölfeuchtemessung und der Analyse der gelösten Gase, welche während des Belastungsversuchs 1 aufgenommen wurden, tendenziell und absolut nicht den tatsächlichen Zustand des Systems widerspiegeln, da hierfür ein ausreichender Austausch des Ölvolumens vom Kopf zum Sockel nötig wäre.

## 6 Anhang

## 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] C. Gebhardt, Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [2] R. Schwarze, CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendung bei Strömungsprozessen, Freiberg: Springer Vieweg, 2013.
- [3] ANSYS Inc., ANSYS Mechanical User's Guide, Canonsburg, PA 15317: ANSYS Inc., 2015.
- [4] W. Rieder, Elektrische Kontakte: Eine Einführung in ihre Physik und Technik, Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2000.
- [5] E. Vinaricky, W. A. Merl und A. Keil, Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe, Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [6] V. Popov, Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik, Berlin: Springer Verlag, 2010.
- [7] N. World, „www.nano-world.org,“ Departement Informatik - Universität Basel, 30 März 2016. [Online]. Available: <http://www.nano-world.org/frictionmodule/content/0200makroreibung/0500asperities/?lang=de>. [Zugriff am 2 April 2016].
- [8] R. Schneider, H. Löbl, S. Großmann, T. Schoenemann und M. Holdis, „Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Elektroenergietechnik,“ *Zeitung der IG Metall für die Bundesrepublik Deutschland*, pp. 591-594, 11 2009.
- [9] D. Baehr und S. Kabelac, Thermodynamik, Berlin: Springer Verlag, 2012.
- [10] P. von Böckh und T. Wetzels, Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis, Berlin: Springer, 2014.
- [11] H. Eichlseder und P. Sturm, *Thermodynamik Skriptum*, Graz: Technische Universität Graz, 2014.
- [12] R. J. E. Clausius, „Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie,“ *Pogg. Ann.* 93, pp. 481-506, 1854.
- [13] W. Nußelt, „Das Grundgesetz des Wärmeübergangs,“ *Gesundh Ing*, 1915.

- [14] R. Bauer, *Die Messwandler - Grundlagen, Anwendung und Prüfung*, Berlin: Springer, 1953.
- [15] R.-D. Rogler, *Praktikum Schaltanlagen Skriptum*, Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2011.
- [16] G. Herold, „Beispiele für die Berechnung von Leiteranordnungen unter Berücksichtigung von Stromverdrängung und Magnetisierung,“ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [17] A. Küchler, *Hochspannungstechnik*, Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [18] Palavanpour, B.; Wiklund; P. Nynas AB, „Mineral Insulating Oils in Service - Monitoring and their properties,“ in *International Transformer Conference and Exhibition*, Teheran, 2015.
- [19] A. Arakelian und I. Fofana, „Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment Part 1: States, Solubility, and Equilibrium in Insulating Materials,“ *DEIS Feature Article*, Bde. %1 von %2Vol. 23, No. 4, Nr. July/August, pp. 15-27, 2007.
- [20] L. Lewand, „Understanding Water in Transformer Systems - The Relationship Between Relative Saturation and Parts per Million (ppm),“ 2002.
- [21] Y. Du, M. Zahn, B. Lesieutre, A. Mamishev und S. Lindgren, „Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems,“ *DEIS Feature Article*, Bde. %1 von %2Vol. 15, No. 1, Nr. January/February, pp. 11-17, 1999.
- [22] B. Buerschaper und T. Leibfried, „Physik des Feuchteausstauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens,“ in *ETG-Fachtagung*, Hanau, 2005.
- [23] B. Pahlavanpour und M. Martins, „Study of Moisture Equilibrium in Oil-Paper Systems with Temperature Variation,“ in *7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, 2003.
- [24] B. Sparling und J. Aubin, „Assessing Water Content in Insulating Paper of Power Transformers,“ *Electrical Energy T&D Magazine*, Bde. %1 von %2Issue 3, Vol 11, Nr. July/August, pp. 30-34, 2007.
- [25] DIN EN 61869-1, *Messwandler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Berlin: VDE Verlag, 2010.

- [26] IEC TR 60943, *Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals*, Genf: IEC, 1998.
- [27] Südkabel, „[www.suedkabel.de](http://www.suedkabel.de),“ 2006. [Online]. Available: <http://www.suedkabel.de/cms/upload/pdf/Freileitungsseile.pdf>. [Zugriff am 24 März 2016].
- [28] M. Koch und S. Tenbohlen, „Wasser in Leistungstransformatoren - Richtig messen und den Zustand beurteilen,“ in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Leinfelden, 2006.
- [29] DIN EN 60599, *In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte - Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase*, Berlin: VDE Verlag, Beuth Verlag, 2008.
- [30] A. Wilson, *Insulation liquids: their uses, manufacture and properties*, London und New York: The Institution of Electrical Engineering, 1980.
- [31] W. Lick, *Analyseverfahren der Isolierstoffe Skriptum*, Graz: Institut für Hochspannungstechnik, Technische Universität Graz, 2014.
- [32] Verein deutscher Ingenieure, *Richtlinie VDI 2230 - Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen*, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2014.

## 6.2 Bilderverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Bild 2-1 – Kontaktflächen mit und ohne Kräfteinfluss. Quelle: [7] .....                             | 4  |
| Bild 2-2 – unterschiedliche Kontaktteilflächen. Quelle: [4], S 11.....                              | 4  |
| Bild 2-3 – Kontaktstelle .....  | 5  |
| Bild 2-4 – Stromfäden.....  | 5  |
| Bild 2-5 – Kugelmodel.....  | 5  |
| Bild 2-6 – Reibkorrosionsvorgang. Quelle: [4],S 20.....   | 8  |
| Bild 2-7 – Intermetallische Phasen bei Al-Cu-Verbindungen in Anlehnung an [8] .....                 | 10 |
| Bild 2-8 – Geschlossenes System. Quelle: [11],S 5.....  | 12 |
| Bild 2-9 – Offenes System, Wärmeübertrager. Quelle: [10],S 6 .....                                  | 12 |
| Bild 2-10 – Offenes System, Dampfturbine. Quelle: [11],S 6.....                                     | 12 |
| Bild 2-11 – isolierte Dampfturbine. Quelle: [11],S 6 .....  | 13 |
| Bild 2-12 – abgeschlossenes System. Quelle: [11],S 5 .....  | 13 |
| Bild 2-13 – Konvektion. Quelle: [10],S 4.....   | 16 |
| Bild 2-14 –Wärmeleitung ebene Wand. Quelle: [10],S 19 .....   | 17 |
| Bild 2-15 –Wärmeleitung Zylinder. ....  | 17 |
| Bild 2-16 –Wärmeleitung Hohlkugel. ....   | 17 |
| Bild 2-17 – Wärmestrahlung. Quelle: [10],S 4.....   | 18 |
| Bild 2-18 – Wärmestrom zwischen zwei Oberflächen. Quelle: [10],S 210 .....                          | 19 |
| Bild 2-19 – Stromverdrängungsfaktor für Rundleiter. Quelle: [15] .....                              | 22 |
| Bild 2-20 – Magnetisierungskurve und spezifische Wattverluste. Quelle: [14],S 187.....              | 23 |
| Bild 2-21 – Grundbausteine Mineralöl. Quelle: [17],S 338 .....                                      | 24 |
| Bild 2-22 – Durchschlagsspannung als Funktion von Wassergehalt und Sättigung. Quelle: [20],S 3..... | 26 |
| Bild 2-23 – Fabre-Pichon-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 12 .....                    | 28 |
| Bild 2-24 – Oommen-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 14 .....                          | 28 |
| Bild 2-25 – Griffin-Kurve für Feuchtegleichgewicht. Quelle: [21],S 19 .....                         | 29 |
| Bild 3-1 – Stromwandler. Quelle: [17], S 401 .....  | 30 |
| Bild 3-2 – Spannungswandler. Quelle: [17], S 400 .....  | 30 |
| Bild 3-3 – Untersuchungsobjekt RITZ KOTEF 220 kV Kombiwandler .....                                 | 31 |
| Bild 3-4 – Typenschild Wandler #1.....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| Bild 3-5 – Typenschild Wandler #2.....  | 31 |
| Bild 3-6 – CAD-Modell der Hauptstrombahn mit markierten Komponenten.....  | 32 |
| Bild 3-7 – Explosionsansicht der Hauptstrombahn mit Seilklemmen (rot), Kontaktringe (schwarz), Verbindungslaschen (gelb), Gehäuseanschlussplatten (türkis), Serienlasche (orange), Winkellaschen (grün), Primärleiterstäben (blau) und Dichtungen (braun) ..... | 32 |
| Bild 3-8 – Aufbau innerhalb der Kabine .....  | 33 |
| Bild 3-9 – Stromtransformatoren.....  | 34 |
| Bild 3-10 – Stromtransformatoren.....   | 34 |
| Bild 3-11 – Leiterseilführung .....   | 34 |
| Bild 3-12 – Stelltransformatoren.....   | 34 |
| Bild 3-13 – Schalt- und Steuerschrank .....   | 34 |
| Bild 3-14 –Thermoelement-positionen Seite P1 .....  | 36 |
| Bild 3-15 – Thermoelement-positionen Seite P2/A .....   | 36 |
| Bild 3-16 – Thermoelementpositionen um die Seilklemme .....   | 36 |
| Bild 3-17 – Angebrachte Thermoelemente an der Seite P1.....   | 36 |
| Bild 3-18 – BV 1: Abgetropftes Leiterschmiermittel .....  | 41 |
| Bild 3-19 – BV 1: Ausgelaufenes Leiterschmiermittel .....   | 41 |
| Bild 3-20 – BV 1: Leiterseilabschluss nach Zyklen .....   | 42 |
| Bild 3-21 – BV 1: Leiterseilabschluss Nahaufnahme .....   | 42 |
| Bild 3-22 – BV 1: Seilklemme nach Zyklen.....   | 43 |
| Bild 3-23 – BV 1: Winkellasche P1 mit Kontaktringen nach Zyklen .....   | 44 |
| Bild 3-24 – BV 1: Kontaktring auf Seite P1 nach Zyklus.....   | 44 |
| Bild 3-25 – BV 1: Winkellasche P2/A mit Kontaktringen nach Zyklen.....  | 45 |
| Bild 3-26 – BV 1: Kontaktring auf Seite P2/A nach Zyklus.....   | 45 |
| Bild 3-27 – BV 1: neue Kontaktringe .....   | 45 |
| Bild 3-28 – BV 2: Thermographie Stromtransformator und Leiterseil.....  | 53 |
| Bild 3-29 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (unten) vor Umbau .....  | 54 |
| Bild 3-30 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (seitlich) vor Umbau.....  | 54 |
| Bild 3-31 – BV 2: Seilklemme (oben) vor Umbau .....   | 55 |
| Bild 3-32 – BV 2: Seilklemme (oben) nach Umbau.....   | 55 |
| Bild 3-33 – BV 2: Seilklemme (Detail) vor Umbau .....   | 55 |
| Bild 3-34 – BV 2: Seilklemme (Detail) nach Umbau .....  | 55 |



|   |    |
|---|----|
| Bild 3-35 – BV 2: Seilklemme (unten) vor Umbau .....  | 55 |
| Bild 3-36 – BV 2: Seilklemme (unten) nach Umbau .....   | 55 |
| Bild 3-37 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (unten) nach Umbau .....                                   | 56 |
| Bild 3-38 – BV 2: Thermographie der Seilklemme (seitlich) nach Umbau .....                                | 56 |
| Bild 3-39 – BV 2: Thermographie Winkellasche P1 .....   | 57 |
| Bild 3-40 – BV 2: Thermographie Winkellasche P2/A .....   | 57 |
| Bild 3-41 – BV 2: Verbindungsflasche (vorne) vor Umbau .....  | 58 |
| Bild 3-42 – BV 2: Verbindungsflasche (hinten) vor Umbau .....   | 58 |
| Bild 3-43 – BV 2: Kontakt Winkellasche vor Umbau .....  | 58 |
| Bild 3-44 – BV 2: Kontakt Primärleiter vor Umbau .....  | 58 |
| Bild 3-45 – BV 2: Verbindungsflasche (vorne) nach Umbau .....   | 59 |
| Bild 3-46 – BV 2: Verbindungsflasche (hinten) nach Umbau .....  | 59 |
| Bild 3-47 – BV 2: Kontakt Winkellasche nach Umbau .....   | 59 |
| Bild 3-48 – BV 2: Kontakt Primärleiter nach Umbau .....   | 59 |
| Bild 3-49 – BV 2: Thermographie Wandlerkopf .....   | 62 |
| Bild 3-50 – BV 2: Thermographie Isolator und Kopf .....   | 62 |
| Bild 3-51 - Teilentladungsmessaufbau Prinzipschaltbild [17] .....   | 64 |
| Bild 3-52 – Realer Messaufbau mit Koppelkondensator(links), Prüfling und Prüftransformator (rechts) ..... | 64 |
| Bild 3-53 – Verwendetes Verlustfaktormessprinzip [17] .....   | 65 |
| Bild 3-54 – Verlustfaktormessaufbau .....   | 65 |
| Bild 3-55 – Gesamtaufbau mit beiden Wandlern .....  | 65 |
| Bild 3-56 – 400 kV Prüftransformator .....  | 66 |
| Bild 3-57 – Verbindungsisolator .....   | 66 |
| Bild 3-58 – Kombiwandler mit Schirmelektroden .....   | 66 |
| Bild 3-59 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts vor der Konditionierung .....                                | 69 |
| Bild 3-60 – PRPD-Pattern des Testobjekts vor Belastungsversuch 2 .....                                    | 69 |
| Bild 3-61 – PRPD-Pattern des Testobjekts nach Belastungsversuch 2 .....                                   | 70 |
| Bild 3-62 – PRPD-Pattern des Testobjekts nach Belastungsversuch 2 .....                                   | 71 |
| Bild 3-63 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts nach der Konditionierung .....                               | 71 |
| Bild 3-64 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts bei 285 kV .....   | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| Bild 3-65 – PRPD-Pattern des Referenzobjekts bei $U_m$ .....                               | 72  |
| Bild 3-66 – PRPD-Pattern des Testobjekts bei 285 kV .....                                  | 73  |
| Bild 3-67 – PRPD-Pattern des Testobjekts bei $U_m$ .....                                   | 73  |
| Bild 4-1 – CAD-Modell des Wandlers geschlossen .....                                       | 84  |
| Bild 4-2 – CAD-Schnittmodell des Wandlers .....  | 84  |
| Bild 4-3 – EDX-Spektrum Verbindungsflasche .....   | 86  |
| Bild 4-4 – CAD-Modell der Hauptstrombahn .....   | 88  |
| Bild 4-5 – Vernetztes Modell der Hauptstrombahn .....                                      | 89  |
| Bild 4-6 – Nachbildung der Verschrauben auf einer Seite der Hauptstrombahn .....           | 90  |
| Bild 4-7 – mechanisches Modell mit applizierten Kräften und Lagerungen .....               | 91  |
| Bild 4-8 – mechanisches Modell mit applizierten Kräften und Lagerungen in Seitenansicht .. | 91  |
| Bild 4-9 – Kontaktdruck in der Seilklemme für einen Belastungspunkt .....                  | 92  |
| Bild 4-10 – Kontaktdruck auf Kontaktringe ohne äußere einwirkende Kraft .....              | 93  |
| Bild 4-11 – Kontaktdruck auf Kontaktringe mit äußerer einwirkender Kraft .....             | 93  |
| Bild 4-12 – Kontaktdruck an den Verbindungsflaschen für einen Belastungspunkt .....        | 94  |
| Bild 4-13 – Kontaktdruck an der Serienflasche für einen Belastungspunkt .....              | 95  |
| Bild 4-14 – Kontaktdruck an den Primärleitern für einen Belastungspunkt .....              | 96  |
| Bild 4-15 – Verlustleistungsdichte für thermische Simulation .....                         | 97  |
| Bild 4-16 – Stromdichte im Übergangsbereich Seilklemme auf Winkellasche .....              | 98  |
| Bild 4-17 – Stromdichte im Übergangsbereich Seilklemme auf Winkellasche .....              | 98  |
| Bild 4-18 – Thermisches Modell mit applizierten Randbedingungen .....                      | 100 |
| Bild 4-19 – Temperaturverteilung des Gesamtsystems für Variationspunkt 0 .....             | 103 |
| Bild 4-20 – Temperaturverteilung an der Seite P1 für Variationspunkt 0 .....               | 104 |
| Bild 4-21 – Temperaturverteilung an der Seite P2/A für Variationspunkt 0 .....             | 104 |
| Bild 4-22 – Temperaturverteilung des Gesamtsystems für Variationspunkt 0 .....             | 105 |
| Bild 4-23 – Temperaturverteilung an der Seite P1 für Variationspunkt 0 .....               | 105 |
| Bild 4-24 – Temperaturverteilung an der Seite P2/A für Variationspunkt 0 .....             | 106 |
| Bild 4-25 – CAD-Modell für CFD-Simulation .....  | 107 |
| Bild 4-26 – vereinfachtes Modell für Ölbewegungsstudie in Querschnittsdarstellung .....    | 108 |
| Bild 4-27 – Ölbewegung zu Beginn des Simulationszeitraums beim vereinfachten Modell ..     | 108 |
| Bild 4-28 – Ölbewegung gegen Ende des Simulationszeitraums beim vereinfachten Modell       | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| Bild 4-29 –Ölbewegung bei instationärem Zustand (isometrische Ansicht)..... | 110 |
| Bild 4-30 –Ölbewegung bei instationärem Zustand (Frontansicht).....         | 111 |
| Bild 4-31 –Ölbewegung bei stationärem Zustand (isometrische Ansicht).....   | 111 |
| Bild 4-32 –Ölbewegung bei stationärem Zustand (Frontansicht).....           | 112 |

### 6.3 Diagrammverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Diagramm 3-1 – BV 1: Stromverlauf .....   | 38 |
| Diagramm 3-2 – BV 1: Temperaturverlauf an den Leiterseilenden .....                                   | 41 |
| Diagramm 3-3 – BV 1: Temperaturverlauf an der Seilklemme .....  | 43 |
| Diagramm 3-4 – BV 1: Temperaturverlauf an den Winkellaschen.....                                      | 44 |
| Diagramm 3-5 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P1 .....                   | 45 |
| Diagramm 3-6 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P1 .....                    | 46 |
| Diagramm 3-7 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P2/A.....                  | 46 |
| Diagramm 3-8 – B – BV 1: Fritten bei Verbindungsflasche .....   | 47 |
| Diagramm 3-9 – BV 1: Detaillierter Frittvorgang .....   | 47 |
| Diagramm 3-10 – BV 1: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P2/A .....                 | 47 |
| Diagramm 3-11 – BV 1: Temperaturverlauf des Mineralöls .....  | 48 |
| Diagramm 3-12 – BV 1: Temperaturverlauf der Dichtungen .....  | 48 |
| Diagramm 3-13 – BV 1: Mittlere Temperaturen der Hauptstrombahnkomponenten während<br>Zyklen .....     | 50 |
| Diagramm 3-14 – BV 2: Stromverlauf .....  | 52 |
| Diagramm 3-15 – BV 2: Temperaturverlauf an den Leiterseilenden .....                                  | 53 |
| Diagramm 3-16 – BV 2: Temperaturverlauf an der Seilklemme .....                                       | 54 |
| Diagramm 3-17 – BV 2: Temperaturverlauf an den Winkellaschen .....                                    | 56 |
| Diagramm 3-18 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P1 .....                   | 57 |
| Diagramm 3-19 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P1 vor dem<br>Umbau .....  | 58 |
| Diagramm 3-20 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P1 nach dem<br>Umbau ..... | 59 |
| Diagramm 3-21 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P1 .....                  | 60 |
| Diagramm 3-22 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche rechts auf Seite P2/A .....                | 60 |
| Diagramm 3-23 – BV 2: Temperaturverlauf Verbindungsflasche links auf Seite P2/A .....                 | 61 |
| Diagramm 3-24 – BV 2: Temperaturverlauf des Mineralöls .....  | 61 |
| Diagramm 3-25 – BV 2: Temperaturverlauf der Dichtungen .....  | 62 |
| Diagramm 3-26 – BV 2: Mittlere Temperaturen der Hauptstrombahnkomponenten während<br>Zyklen .....     | 63 |
| Diagramm 3-27 – Ergebnisse der ersten Verlustfaktormessung .....                                      | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| Diagramm 3-28 – Ergebnisse der zweiten Verlustfaktormessung.....                                   | 74  |
| Diagramm 3-29 – BV 1: Zeitliche Entwicklung der Ölfeuchtigkeit .....                               | 75  |
| Diagramm 3-30 – BV 2: Zeitliche Entwicklung der Ölfeuchtigkeit .....                               | 75  |
| Diagramm 3-31 – BV 1: Bestimmte relative Sättigung.....  | 78  |
| Diagramm 3-32 – BV 2: Bestimmte relative Sättigung.....  | 78  |
| Diagramm 3-33 – BV 1: Berechnete Papierfeuchte .....   | 79  |
| Diagramm 3-34 – BV 2: Berechnete Papierfeuchte .....   | 79  |
| Diagramm 3-35 – Wasserstoffgehaltentwicklung in ppm .....  | 82  |
| Diagramm 3-36 – Methangehaltentwicklung in ppm .....   | 82  |
| Diagramm 3-37 – Kohlenmonoxidgehaltentwicklung in ppm .....  | 83  |
| Diagramm 3-38 - Ethingehaltentwicklung in ppm .....  | 83  |
| Diagramm 3-39 – Kohlendioxidgehaltentwicklung in ppm.....  | 83  |
| Diagramm 3-40 – Ethengehaltentwicklung in ppm .....  | 83  |
| Diagramm 3-41 – Ethangehaltentwicklung in ppm.....   | 83  |
| Diagramm 4-1 – Relative Kontaktdruckänderung an der Seilklemme.....                                | 92  |
| Diagramm 4-2 – Relative Kontaktdruckänderung an den Kontaktringen.....                             | 93  |
| Diagramm 4-3 – Relative Kontaktdruckänderung an den Verbindungsflaschen .....                      | 94  |
| Diagramm 4-4 – Relative Kontaktdruckänderung an der Serienlasche .....                             | 95  |
| Diagramm 4-5 – Relative Kontaktdruckänderung an den Primärleitern .....                            | 96  |
| Diagramm 4-6 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 6.....      | 101 |
| Diagramm 4-7 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 16/17 ..... | 101 |
| Diagramm 4-8 – Gegenüberstellung Messwerte und Simulationsergebnis für Variationspunkt 27.....     | 102 |
| Diagramm 4-9 – Strömungsgeschwindigkeit über y-Koordinate transienter Fall.....                    | 109 |
| Diagramm 4-10 – Strömungsgeschwindigkeit über y-Koordinate stationärer Fall.....                   | 110 |

## 6.4 Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 2-1 - Materialeigenschaften von Aluminium und Kupfer .....   | 7  |
| Tabelle 2-2 - Eigenschaften der intermetallischen Phasen .....   | 10 |
| Tabelle 2-3 – Vergleich der Größen aus Elektrotechnik und Wärmelehre .....   | 15 |
| Tabelle 2-4 – Wärmestrombestimmung einfacher Geometrien .....  | 17 |
| Tabelle 2-5 - Oberflächeneigenschaften bei Wärmestrahlung .....  | 18 |
| Tabelle 2-6 - Oxidationsvorgänge in Mineralöl .....  | 27 |
| Tabelle 2-7 - Gleichungen zur Feuchtebestimmung des Papiers .....  | 29 |
| Tabelle 3-1 – Position und Bezeichnung der Thermoelemente .....  | 37 |
| Tabelle 3-2 - Stromzyklen bei erhöhter Umgebungstemperatur .....   | 38 |
| Tabelle 3-3 – Grenzen der Übertemperatur in Anlehnung an [26] .....  | 39 |
| Tabelle 3-4 – Grenzen der Übertemperatur in Anlehnung an [25] Tabelle 5 .....  | 40 |
| Tabelle 3-5 – Übertemperaturaufkommen während Belastungsversuch unter erhöhter Umgebungstemperatur .....             | 49 |
| Tabelle 3-6 - Stromzyklen bei erhöhter Umgebungsluftfeuchtigkeit .....   | 51 |
| Tabelle 3-7 – Übertemperaturaufkommen bei den Stromzyklen unter erhöhter Luftfeuchtigkeit .....                      | 63 |
| Tabelle 3-8 – Spannungswerte für 220 kV Kombiwandler .....   | 66 |
| Tabelle 3-9 – Teilentladungsprüfspannung und Grenzwerte angelehnt an DIN EN 61869 .....                              | 67 |
| Tabelle 3-10 – Teilentladungsmessverfahren nach Wandlerrausschuss .....  | 67 |
| Tabelle 3-11 - Ergebnisse der Papierfeuchte unter Anwendung der Gleichgewichtskurven ..                              | 76 |
| Tabelle 3-12 - typische 90-%-Konzentrationswerte für Messwandler nach DIN EN 60599, Tabelle A.6 .....                | 80 |
| Tabelle 3-13 - Basis-Gasquotienten nach DIN EN 60599, Tabelle 2 .....  | 81 |
| Tabelle 3-14- Ergebnisse der DGA .....   | 81 |
| Tabelle 3-15 - Schlüsselgas und Schlüsselgasquotienten nach CIGRE Task Force 15.01.01 (CI) mit Fehlerzuweisung ..... | 82 |
| Tabelle 4-1 - Materialdaten 626 Al 3 .....   | 85 |
| Tabelle 4-2 - Eigenschaften von Mineralöl .....  | 87 |
| Tabelle 4-3 - Modelklassen nach VDI 2230 Blatt 2 .....   | 89 |
| Tabelle 4-4 - Belastungspunkte (BP) der durchgeführten Kraftvariation .....  | 90 |
| Tabelle 4-5 - Wärmeübergangswert für Parameterstudie .....   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 4-6 - Wärmestromwert für Parameterstudie .....                    | 100 |
| Tabelle 4-7 - Berechnete Gesamtkontaktwiderstände .....                   | 102 |
| Tabelle 4-8 - Betrachtete Variationspunkte für Temperaturverteilung ..... | 103 |