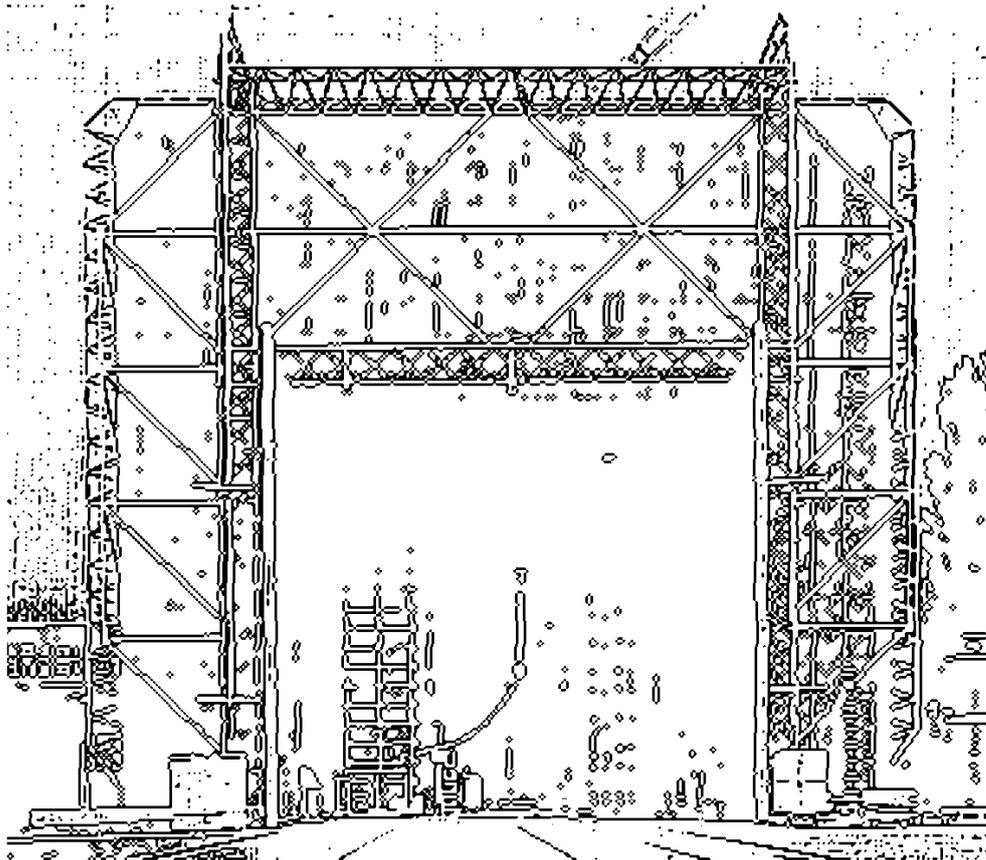


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT



Institut für Hochspannungstechnik und
Systemmanagement

**Dimensionierung eines Prüfkessels zur Bestimmung
der elektrischen Leitfähigkeit des
Öl-Board-Isoliersystems
unter Einfluss der Feldstärke, Temperatur sowie
Boardfeuchte**

Masterarbeit

Durchgeführt am

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement



Betreuer

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz

In Zusammenarbeit mit der Firma

WEIDMANN Electrical Technology AG
Rapperswil, Schweiz



Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Jauer

Vorgelegt von Bernhard Nader, BSc
Graz im Oktober 2012



Danksagung

Für die Erstellung einer wissenschaftlichen Arbeit sind fachliche Unterstützung, Anregungen sowie Motivation unentbehrlich, daher gilt mein herzlicher Dank allen, die an der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit Anteil haben.

An erster Stelle möchte ich mich beim emeritierten Institutsvorstand, Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr für die Ermöglichung dieser Masterarbeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Firma Weidmann Electrical Technology AG, namentlich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Jauer, in deren Zusammenarbeit diese Arbeit entstand.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Sein Engagement, seine hilfreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge aber vor allem sein umfangreiches Fachwissen und seine Erfahrung waren bei der Erstellung meiner Masterarbeit sehr wertvoll. Danke für die hervorragende Betreuung, die kein Wochenende kannte.

Vielen herzlichen Dank auch an meinen Begutachter, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz, der mir bei der Fertigstellung meiner Masterarbeit mit seinem Wissen und seinen Anregungen unterstützte.

Für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung während des Kesselbaus möchte ich dem gesamten Team der Werkstätte meinen Dank aussprechen, stellvertretend bei Herrn Anton Schriebl.

Danken möchte ich auch meinem Studienkollegen und Freund, Herrn Bernhard Jocham, BSc für die Unterstützung bei diversen Problemstellungen sowie all meinen Kommilitonen für die schöne Studienzeit.

Meiner Familie danke ich in ganz besonderem Maße für den Rückhalt und die moralische Unterstützung, insbesondere meinen Eltern, die mir eine derartige Ausbildung ermöglichten.

Dank gilt auch meiner Freundin für ihre Geduld und Hilfe.

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Statutory Declaration

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

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Bei der Auslegung der elektrischen Isolation von Konvertertransformatoren in HGÜ-Anlagen ergeben sich infolge der Mischfeldbeanspruchung (Gleich- und Wechselanteile) Besonderheiten in der elektrischen Feldverteilung. In der Barrierenisolation, ein quer geschichtetes Dielektrikum zur Isolation der Transformatorwicklung, erfolgt bei Gleichspannungsbeanspruchung eine extreme elektrische Belastung der Barrieren, während es zur weitgehenden Entlastung der Ölspalte kommt. Für die Auslegung der elektrischen Isolation spielt bei Gleichspannungsbeanspruchung die Leitfähigkeit der Isolierstoffe eine zentrale Rolle. Zu beachten sind dabei die stark unterschiedlichen Leitfähigkeiten von Öl und Board sowie die Tatsache, dass sich diese infolge der Beanspruchungen im Betrieb um mehrere Größenordnungen verändern können, was eine mit der Betriebsdauer verändernde elektrische Beanspruchung der Komponenten Öl und Board nach sich zieht.

Unter den zahlreichen Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit ist es Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der elektrischen Feldstärke, der Temperatur sowie der Feuchte auf die Leitfähigkeit des ölprägnierten Boards zu studieren. Untersucht werden diese im Speziellen am Transformerboard T I.

Einleitend in diese Thematik werden zunächst im Kapitel 4 theoretische Grundlagen der Leitungsmechanismen in den Isolierstoffen Öl und Board dargestellt und darauf aufbauend, im Kapitel 5, der Einfluss der oben genannten Parameter auf die elektrische Leitfähigkeit erarbeitet.

Um den praktischen Teil der Arbeit, die Leitfähigkeitsmessung an Transformerboard-Proben zu ermöglichen, war der Bau eines geeigneten Prüfkessels notwendig. In Kapitel 6 werden die Anforderungen an den Prüfkessel zur Messung der Leitfähigkeit als Funktion der elektrischen Feldstärke, Temperatur und Feuchte dargelegt. Herausforderungen, die sich infolge der normgerechten Umsetzung der gestellten Anforderungen ergaben, werden aufgezeigt und Konstruktion und Bau des Prüfkessels festgehalten.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Durchführung der Leitfähigkeitsmessung. Es wird ein Einblick in die Messdatenaufbereitung gegeben, Messergebnisse und Erkenntnisse dokumentiert.

Abstract

For the dimensioning of electric insulation of converter transformers in HVDC systems particularities in the electric field distribution ensue on account of alternating field stress (direct and alternating components). In the isolation barrier, a cross laminated dielectric for the insulation of the transformer winding, the barriers are subject to an extreme electric load in case of DC stress while stress on the oil clearance is largely reduced. For the dimensioning of the electric insulation at DC stress conductivity of the insulating materials is essential. In this context, attention must be paid to distinctly varying conductivities of oil and board and to the fact that they may vary by several magnitudes on account of the stresses occurring during operation. This results in electric load on the components oil and board which is changing in the course of operating time.

Among the various influencing factors on electrical conductivity this thesis focuses on the influence of electric field strength, temperature and humidity on conductivity of the oil impregnated board. Special emphasis is put on their role with regard to transformer board T I.

As an introduction into this field chapter 4 offers theoretical foundations of conductivity mechanisms in the insulating materials oil and board while, on the basis of these principles, chapter 5 covers the influence of the aforementioned parameters on electrical conductivity.

For the practical part of this thesis, i.e. the conductivity measurement at transformer board samples, it was necessary to manufacture an appropriate test tank. Chapter 6 details the requirements on the test tank enabling measurement of conductivity as a function of electric field strength, temperature and humidity. Challenges ensuing from the standard-compliant translation of the requirements are pointed out and the design and construction of the test tank are described.

Chapter 7 deals with the structure and execution of conductivity measurement. It gives an insight into the preparation of measuring data and documents measuring results and conclusions.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Begriffsdefinitionen	3
3	Faserstoffe	5
3.1	Papier und Pressspan	5
3.2	Synthetische Faserstoffe	6
4	Leitfähigkeit des Öl-Board-Isolationssystems	7
4.1	Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit	7
4.2	Leitfähigkeit im Isolieröl	10
4.2.1	Gleichstromleitfähigkeit	10
4.3	Leitfähigkeit im Board	11
4.3.1	Gleichstromleitfähigkeit	12
4.4	Leitfähigkeit im ölprägniertem Board	13
4.4.1	Anlegen einer Gleichspannung an ein Öl-Board-Isolationssystem	13
5	Einflussparameter auf die Leitfähigkeit	17
5.1	Elektrische Feldstärke	17
5.2	Feuchte	19
5.3	Temperatur	20
6	Prüfkessel-Design zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit	23
6.1	Anforderungen an den Prüfkessel	23
6.2	Planung und Entwicklung	24
6.2.1	Entwicklungsphasen des Kessels	25
6.2.2	Auswahl der Materialien	29
6.3	Teilentladungsfestigkeit der Elektrodenanordnung	29
6.3.1	Ermittlung der Teilentladungseinsetzfelstärke in Öl	30
6.3.2	Ermittlung der Teilentladungseinsetzfelstärke in Transformer- board	31
6.3.3	Teilentladungsfestigkeit des Prüfkessels	39
6.4	Konstruktion und Umsetzung	42
6.4.1	Hochspannungsdurchführung	42
6.4.2	Konstruktion	45
6.4.3	Zusammenbau	47

7 Kesselprüfung - Praktische Leitfähigkeitsmessung	53
7.1 Messaufbau	54
7.2 Proben	54
7.3 Messvorbereitung	55
7.4 Messergebnisse	58
7.4.1 Einfluss der elektrischen Feldstärke	59
7.4.2 Einfluss der Feuchte	63
7.4.3 Einfluss der Temperatur	68
8 Zusammenfassung	73
9 Diskussion der Messergebnisse und Ausblick	75
Symbolverzeichnis	75
Literaturverzeichnis	81
Anhang	82

1 Einleitung

In der elektrischen Energietechnik spielen Transformatoren eine Schlüsselrolle in der Energieübertragung. Für die elektrische Isolation von Transformatoren bewährt sich das Isolationssystem Öl-Board bereits über Jahrzehnte. Es findet Anwendung in einem weiten Leistungsbereich der Transformatoren, sei es vom Wandler bis hin zum Leistungstransformator. Mit der klassischen Energieübertragung, der Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ), stößt man jedoch infolge des stetig wachsenden Energiebedarfes immer häufiger an technische sowie wirtschaftliche Grenzen. Zunehmend gelingt es diese Grenzen durch die Weiterentwicklung der Halbleitertechnologien, die den Einsatz der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) ermöglichen, zu überschreiten. Durch die Übertragung elektrischer Energie mit hohen Gleichspannungen (HVDC) können Probleme infolge Leitungsinduktivitäten bzw. Leitungskapazitäten (bei Kabeln), wie sie insbesondere bei sehr großen Reichweiten auftreten, vermieden werden. Stabilitätsprobleme stellen für die Übertragungsentfernungen kein Hindernis mehr dar. Weiters ergibt sich dadurch die Möglichkeit der Kopplung asynchroner Netze bzw. Netze unterschiedlicher Frequenz. Hinsichtlich Netzbetrieb sei die schnelle Regelbarkeit des Energieflusses genannt. Im stationären Betrieb erfolgt kein Energieaustausch zwischen Leitungsinduktivitäten- und Kapazitäten, daher werden keine Blindleistungen übertragen und dielektrische Verluste in der Kabelisolation bleiben aus. Da keine Stromverdrängung auftritt, werden die Leiterquerschnitte effizienter ausgenutzt. Technische Herausforderungen ergeben sich jedoch bei den sogenannten Konvertertransformatoren in den HGÜ-Anlagen. Konvertertransformatoren stellen bei HGÜ-Anlagen eine galvanische Trennung zwischen Wechsel- und Gleichspannungsseite sicher (siehe Abbildung 1.1) [1], [4], [7].

Eine Herausforderung bei diesen Konvertertransformatoren besteht in der Dimensionierung der Isolation, da das klassische Isolationssystem Öl-Board nicht mehr ausschließlich einer reinen Wechselspannungsbeanspruchung ausgesetzt wird. Je nach Topologie des Konverters wird die Transformatorisolation mit einer Mischgröße (Wechselspannung mit Gleichanteil) beansprucht. Dadurch ergeben sich jedoch gravierende Änderungen hinsichtlich der elektrischen Beanspruchung der Isulationskomponenten Öl und Board. Bei reiner Wechselspannungsbeanspruchung (50Hz) erfolgt eine kapazitive Feldverteilung entsprechend den Permittivitäten, die Leitfähigkeiten sind dabei vernachlässigbar. Bei Beanspruchung mit Gleichspannung sind diese jedoch entscheidend, da sich eine Feldverteilung entsprechend des stationären Strömungsfeldes ergibt. Dies führt im Vergleich zur AC-Beanspruchung zur Entlastung des Öles aber zur Be-

lastung des Boards. Bei Schaltvorgängen oder Polaritätswechsel erfolgt ein Übergang vom dielektrischen Verschiebungsfeld zum stationären Strömungsfeld. Zu berücksichtigen sind dabei Polarisationsmechanismen, insbesondere Grenzflächenpolarisation, sowie die stark unterschiedlichen Polarisationsdauern zwischen den Medien Öl und Board [1], [4], [7].

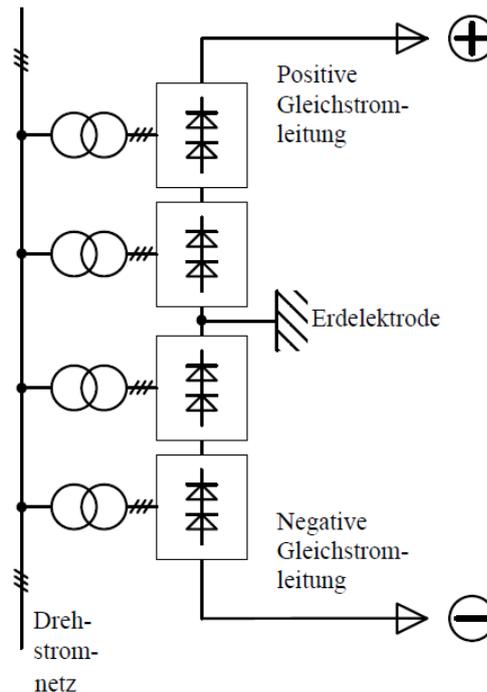


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Konverterstation einer HGÜ, aus [7]

Für die, während des Betriebes auftretende elektrische Beanspruchung des Boards, ist also die Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit von entscheidender Wichtigkeit. Während die Permittivität über die Betriebsdauer praktisch unverändert bleibt, darf die elektrische Leitfähigkeit des Boards jedoch nicht als konstanter Parameter aufgefasst werden, sondern unterliegt vielmehr sehr vielen Einflussfaktoren wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, elektrische Feldstärke, Alterung und ist natürlich auch vom verwendeten Material abhängig. Unter Gleichspannungsbeanspruchung spielt zudem auch die Beanspruchungsdauer eine sehr wesentliche Rolle. Die resultierende Belastung des Boards bei Mischfeldbeanspruchung macht daher genaue Untersuchungen der Leitfähigkeit hinsichtlich der Leitfähigkeitsveränderungen infolge der Beanspruchungen im Betrieb notwendig [1].

2 Begriffsdefinitionen

In der vorliegenden Masterarbeit werden eine Reihe von Begriffen zur Bezeichnung von elektrischen Isolierstoffen verwendet, die indirekt oft auch Aufschluss über deren Zusammensetzung sowie Herstellung geben, da die Namensgebung teilweise durch den Hersteller selbst erfolgt. Um den Leserinnen und Lesern einen klaren Überblick zu verschaffen, sollen diese Isolierstoffe zunächst kurz erläutert werden. Der Autor ist bemüht, in der gesamten vorliegenden Masterarbeit, eine klare und einheitliche Linie in Bezug auf die Isolierstoffbezeichnung zu führen.

Bei den elektrischen Isolierstoffen Papier und Pressspan handelt es sich um Faserstoffe. Der Unterschied in der Bezeichnung definiert sich lediglich aus dem Herstellungsprozess (siehe dazu Kapitel 3.1 Herstellung von Papier und Pressspan). Faserstoffe lassen sich weiters unterteilen in natürliche und synthetische Faserstoffe. Isolierpapier und Pressspan können also sowohl aus natürlichen als auch aus synthetischen Faserstoffen hergestellt werden. Ausgangsprodukt natürlicher Faserstoffe ist der Zellstoff, während synthetische Faserstoffe neben anorganischen Materialien zum Beispiel aus Aramid hergestellt werden.

Board stellt eine, je nach Zellstoffaufbereitung, Herstellung und Trocknung, weitere Unterteilung des Überbegriffs Pressspan dar.

Transformerboard ist eine Produktbezeichnung der Firma Weidmann Electrical Technology für Board aus natürlichen Faserstoffen. Je nach Dichte erfolgt eine weitere Unterteilung z.B. in Transformerboard T I (hochdicht) sowie Transformerboard T III (niederdicht). Nomex ist der Handelsname für Board aus synthetischen Faserstoffen der Firma DuPont.

3 Faserstoffe

Eines der wichtigsten Isolierstoffe der elektrischen Hochspannungstechnik sind Faserstoffe wie Papier oder Pressspan. Sie finden Anwendung als Dielektrikum in zahlreichen elektrischen Betriebsmitteln wie Kabeln, Durchführungen, Kondensatoren, Wandlern und Transformatoren, können aber auch zu Formteilen verpresst werden, wo sie dann hauptsächlich Anwendung als sogenannte Barrierenisolierungen in Transformatoren finden.

Die technische Nutzbarkeit für die Hochspannungstechnik ergibt sich aber erst durch die Imprägnierung dieser Faserstoffe, die eine Unterdrückung von Hohlräumen und Poren im Inneren ermöglicht und somit die elektrische Festigkeit entscheidend erhöht. Als Imprägnierstoffe finden Flüssigkeiten auf Mineralölbasis aber auch alternative Isolierflüssigkeiten sowie Gase Anwendung. Es handelt sich also stets um ein Mischdielektrikum aus festen und flüssigen oder gasförmigen Isolierstoffen, wie zum Beispiel ölprägniertes Papier (OIP) bzw. imprägnierter Pressspan.

Betriebstemperaturen über 90°C führen jedoch bei der Zellulose, dem Hauptbestandteil von Papier und Pressspan, zu einer unzulässig schnellen Alterung [7]. Für Beständigkeit bei höheren Temperaturen können synthetische Faserstoffe verwendet werden (siehe Kapitel 3.2).

3.1 Papier und Pressspan

Ausgangsprodukt bei der Herstellung von Papier oder Pressspan ist der sogenannte Zellstoff, der sich fast ausschließlich aus Zellulosefasern zusammensetzt. Dazu muss der Rohstoff, gewonnen hauptsächlich aus Nadelhölzern wie Kiefer oder Fichte, zunächst von störenden Bestandteilen wie Lignin und Harze sowie anderen Verunreinigungen befreit werden. Dies erfolgt nach der Zerkleinerung durch chemischen und thermischen Aufschluss. Vorwiegend in Verwendung ist dabei das Sulfatverfahren, ein alkalischer Aufschluss, bei dem der (Sulfat-)Zellstoff durch Kochen mit Natronlauge und Natriumsulfid gewonnen wird [7].

Aus den Rohstoffen Sulfatzellstoff und Wasser wird in einem Veredelungsprozess durch

die Zerlegung in Einzelfasern, Mahlung und Reinigung eine Suspension erzeugt. Durch den Mahlprozess werden die Fasern schmiegsamer und dünner, was zu einer Erhöhung der Berührungspunkte führt. Dadurch können die Bindungskräfte zwischen den Fasern beeinflusst werden und die mechanische Festigkeit erhöht werden [9].

In der Papiermaschine entsteht aus der wässrigen Suspension eine Papierbahn, durch das Aufgießen auf ein durchlaufendes Sieb. Dadurch kommt es zu einem ersten Wasserverlust. Eine weitere Reduktion des Wassergehalts auf ca. 65 bis 70% erfolgt nach der Abhebung vom Sieb, durch das Pressen der Papierbahn zwischen Walzen und Filztücher. Damit das Papier technisch nutzbar wird, muss der Wassergehalt durch Erwärmung weiter reduziert werden. Übliche Werte der Restfeuchte liegen im Bereich von 4 bis 8%.

Der Herstellungsprozess von Pressspan ist dem Papierherstellungsprozess sehr ähnlich, dabei wird die feuchte Papierbahn nach der Abhebung vom Sieb unmittelbar auf einer Walze bis zur gewünschten Plattenstärke von einigen Millimetern aufgewickelt. Infolge des noch sehr hohen Wassergehaltes verbinden sich die einzelnen Papierlagen sehr gut. Die Walze wird anschließend in axialer Richtung durchgeschnitten, dabei entstehen feuchte Tafeln, die nach Press- und Trocknungsprozeduren technisch nutzbares Pressspan ergeben [7].

3.2 Synthetische Faserstoffe

Papier, Pressspan oder Formteile aus synthetischen Faserstoffen zeichnen sich durch eine hohe Dauertemperaturbeständigkeit aus und können aufgrund der Imprägnierbarkeit zellulosehaltige Isolierungen in thermisch hoch ausgelasteten Betriebsmitteln ersetzen. Die Herstellung erfolgt aus Aramid-Fasern, die sehr hohe Zugfestigkeiten erreichen und bis etwa 300°C stabil sind. Da die synthetischen Fasern im Vergleich zu den natürlichen Zellulosefasern nicht aneinander haften und auch nicht verfilzen, sind veränderte Herstellungstechnologien wie z.B. das Fibrillieren der Fasern notwendig, um ausreichende mechanische Festigkeiten zu erreichen. Alle weiteren Schritte zur Erzeugung von Aramid-Papieren sind denen zur Herstellung von Papier und Pressspan aus Zellstoff sehr ähnlich [7], [9].

Weitere nennenswerte Eigenschaften dieser Aramid-Produkte, im Vergleich zu Produkten aus natürlichen Fasern, sind die wesentlich höhere Teilentladungsbeständigkeit sowie eine praktisch zu vernachlässigende Alterung. Diesen vorteilhaften Eigenschaften stehen aber höhere Kosten gegenüber [7].

4 Leitfähigkeit des Öl-Board-Isolationssystems

4.1 Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit

Aus der elektrischen Spannungsbeanspruchung eines Isolators resultiert ein elektrisches Feld, welches das dielektrische Medium zunächst unbeeinflusst durchsetzt. Infolge der Wechselwirkungen zwischen Feld und vorhandenen Ladungsträgern im Medium setzen verschiedene Mechanismen ein, die einen elektrischen Strom hervorrufen. Transiente Teile dieses Stromes klingen nach charakteristischen Zeitkonstanten in einen stationären Strom ab [1].

Diese transienten Stromanteile werden durch Polarisationsmechanismen verursacht. Dazu zählen [7]:

- Elektronenpolarisation bzw. Deformationspolarisation (Abbildung 4.1),
- Atompolarisation bzw. ebenfalls auch Deformationspolarisation (Abbildung 4.1),
- Gitterpolarisation (Abbildung 4.2),
- Orientierungspolarisation (Abbildung 4.3) und
- Grenzflächenpolarisation.

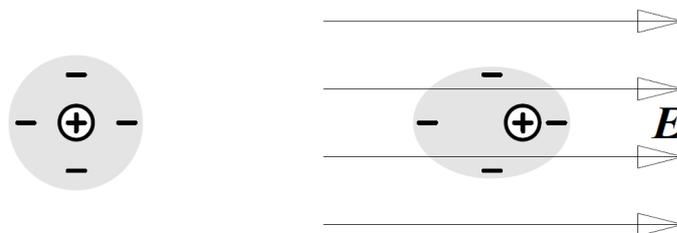


Abbildung 4.1: Deformationspolarisation, nach [7]

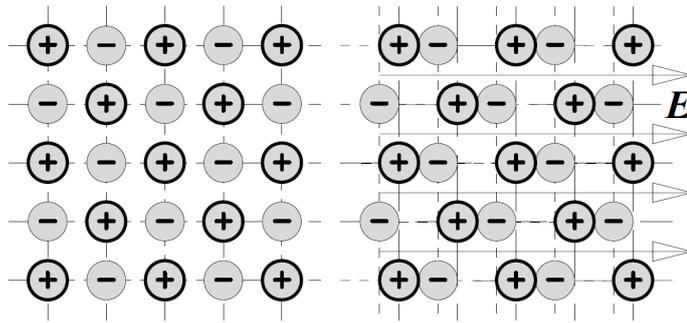


Abbildung 4.2: Gitterpolarisation, nach [7]

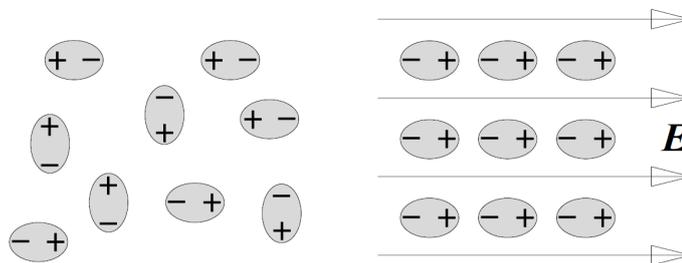


Abbildung 4.3: Orientierungspolarisation, nach [7]

Unabhängig vom speziellen Polarisationsmechanismus verursacht das elektrische Feld eine Verschiebung von Ladungsträgern, deren Wirkung immer der Ursachen entgegengerichtet ist. Die aus der Überlagerung resultierenden Dipolfelder E_{Dip} wirken also dem ursprünglichen Feld E_0 entgegen, das hier als Vakuum-Feld der gleichen Anordnung zu verstehen ist [7].

$$E = E_0 - E_{Dip} \quad (4.1)$$

Für ein nicht ideales Dielektrikum lässt sich die Stromdichte J durch folgende Gleichung beschreiben [5]:

$$J = \sigma \cdot E + \frac{\partial D}{\partial t} + \varrho_R \cdot v. \quad (4.2)$$

Der erste Term repräsentiert dabei die stationäre Stromdichte, hervorgerufen durch Elektronen, Defektelektronen (Löcher) sowie Ionenleitung. Die Ladungsverschiebung

durch Polarisationsmechanismen (dielektrische Verschiebungsstromdichte) wird durch den zweiten Term beschrieben und der dritte Term erfasst die durch Raumladungen hervorgerufene Diffusionsstromdichte infolge der Bewegung freier Ladungsträger entlang von Konzentrationsgefällen. ρ_R entspricht dabei der Raumladungsdichte und v die Ladungsträgergeschwindigkeit.

Unter der Leitfähigkeit von Materialien versteht man im engeren Sinn die sogenannte Gleichstromleitfähigkeit, die sich nur aus dem stationären Anteil des Stromes (Leitungsstrom) definiert [5], [7]. Unter der Voraussetzung eines stationären Stromes lässt sich die Stromdichte über die spezifische elektrische Leitfähigkeit σ und der elektrischen Feldstärke E errechnen und die Gleichung 4.2 vereinfacht sich zu:

$$J = \sigma \cdot E. \quad (4.3)$$

Prinzipiell erfahren alle Ladungsträger im realen Dielektrikum eine Kraftwirkung und tragen somit zur Leitfähigkeit bei, je nach Werkstoff und Verarbeitung können dies Elektronen, Defektelektronen (Löcher) sowie positiv oder negativ geladene Ionen sein. Für die spezifische elektrische Leitfähigkeit gilt daher allgemein [5]:

$$\sigma = \sum_i (q_i \cdot n_i \cdot b_i), \quad (4.4)$$

wobei q_i die Ladung, n_i die Dichte und b_i die Beweglichkeit des i -ten Ladungsträgers sind.

Unter dem Einfluss eines Gleichfeldes wandern die Ladungsträger entsprechend ihrer Polarität ab, was zu einer Ladungsträgerverarmung und in weiterer Folge, mit zunehmender Zeit, zu einer charakteristischen Reduktion der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit führt. Eine unmittelbare Messung des transienten Leitungsstromes ist jedoch durch die Überlagerung weiterer transienter Ströme mit anderen physikalischen Ursachen (Gleichung 4.2) nicht möglich [5].

Unter dem Einfluss eines Wechselfeldes erfahren die Ladungsträger im Mittel keine resultierende Bewegung. Werden Elektrodeneffekte vernachlässigt, kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die Ladungsträgerdichte gegenüber dem feldfreien Zustand nicht verändern wird. Dies begründet die im Vergleich zur Gleichstromleitfähigkeit wesentlich höhere und vor allem zeitlich konstante Wechselstromleitfähigkeit σ_{\sim} [5].

4.2 Leitfähigkeit im Isolieröl

Die Leitfähigkeit in Flüssigkeiten ist bei geringen Feldstärken hauptsächlich auf die Ionenleitung zurück zu führen. Freie Elektronen spielen erst bei sehr hohen Feldstärken (ab etwa 10MV/m) eine Rolle, andernfalls kommt es zu Bindungen an Molekülen oder zur Rekombination mit positiven Ionen [5], [7].

Mineralisches Isolieröl (Transformatoröl), aus den Grundbestandteilen Paraffine, Naphtene, Aromate und Olefine, weist prinzipiell weder Ionen noch Elektronen als potentielle Ladungsträger auf. Die Leitfähigkeit ist daher auf Fremdbestandteile im Öl infolge Verunreinigungen oder Alterungsprozesse zurück zu führen, die durch Dissoziation als Quelle der Ladungsträger an zu sehen sind. Unter dem Begriff der Dissoziation versteht man allgemein den angeregten oder selbständig ablaufenden Zerfall eines Moleküls in seine Bestandteile (Ione). Erfolgt der Zerfall unter dem Einfluss von Wasser, so spricht man von elektrolytischer Dissoziation. Aufgrund dessen weist vollständig entionisiertes Wasser bereits eine Leitfähigkeit von etwa 10^{-7}S/m auf. Die Erhöhung der Ölleitfähigkeit durch Dissoziation der Wassermoleküle ist aber infolge der geringen Wassermenge verschwindend und beschränkt sich eher auf dissozierende Säuren oder Salze. Für die Dissoziation von Säuren ist jedoch Wasser notwendig [6], [7].

In gealtertem Öl können zu dem auch höhere Leitfähigkeiten durch gelöste Metallionen der Elektroden festgestellt werden [7].

4.2.1 Gleichstromleitfähigkeit

Nach dem Anlegen einer Gleichspannung erfolgt zunächst die Orientierung der Dipole. Durch die Ausrichtung der Dipole sinkt zunächst die Leitfähigkeit deutlich. Durch den Einfluss des elektrischen Feldes wandern nun die Ladungsträger entsprechend ihrer Polarität zu den Elektroden ab. Die Leitfähigkeit in diesem Bereich wird als tatsächliche Leitfähigkeit bezeichnet, da sie der Wechselstromleitfähigkeit (50Hz) entspricht (etwa nach 10^{-2}s). Die Zeit die ein Ion für das Durchqueren einer Ölstrecke d im homogenen elektrischen Feld E benötigt, wird als Transitzeit τ bezeichnet. Sie ist abhängig von der Ionenbeweglichkeit μ und errechnet sich zu [7]:

$$\tau = \frac{d}{\mu \cdot E}. \quad (4.5)$$

Durch das Abwandern der Ladungsträger kommt es zu einer Verarmung von schnellen Ladungsträgern sowie zum Aufbau von Raumladungszonen vor den Elektroden.

Die Leitfähigkeit sinkt wieder signifikant ab und der Strom klingt in einen stationären Strom, verursacht durch ständig neu erzeugte Ionen infolge Dissoziation, ab. Dieser Leitfähigkeitsendwert wird als Gleichstromleitfähigkeit bezeichnet und ist feldstärkeabhängig, da bei Feldstärken größer als 2 bis 3kV/mm feldstärkebeschleunigte Dissoziation (Wien¹-Effekt) einsetzt und je nach Elektrodenmaterial auch Ladungsträgerinjektion denkbar wird.

Für die Leitfähigkeit des Isolieröles ergibt sich somit eine komplexe Funktion aus Temperatur (Ionenbeweglichkeit), Zeit, Feldstärke und Ölspaltweite [5], [6], [7]. Der charakteristische Verlauf der Leitfähigkeit eines Isolieröles unter Gleichspannungsbeanspruchung als Funktion der Beanspruchungsdauer ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

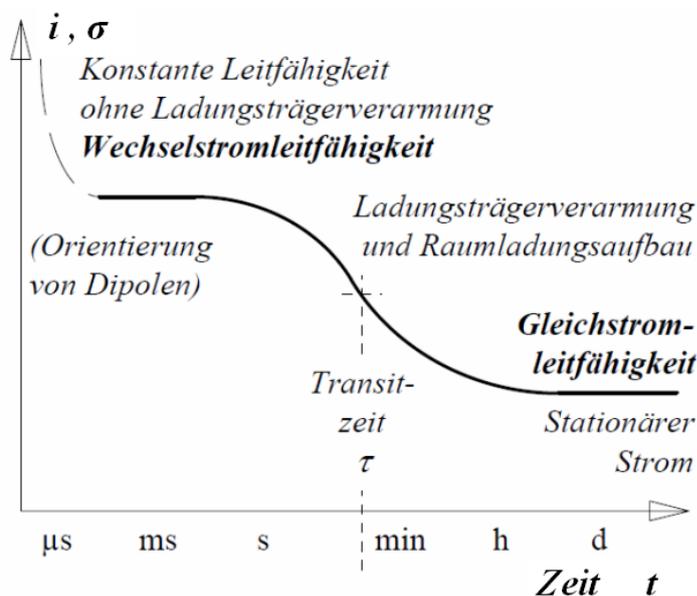


Abbildung 4.4: Gleichstromleitfähigkeit eines Isolieröles in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer, nach [7]

4.3 Leitfähigkeit im Board

In realen festen Isolierstoffen sind immer geringe Konzentrationen von Ladungsträgern vorhanden, sodass die Leitfähigkeit, ähnlich wie bei flüssigen Stoffen ebenfalls durch Leitungsmechanismen verursacht wird. Es können dies Elektronen, Löcher und Ionen sein. Bei niedrigen Feldstärken dominiert jedoch die Ionenleitung infolge Dissoziation von Fremdbestandteilen wie z.B. Feuchte und Verunreinigungen. Erst bei Feldstärken im Bereich der elektrischen Festigkeitsgrenze setzt zudem Elektronenleitung durch Injektion aus der Kathode ein [5], [7].

¹Max Karl Werner Wien (1866-1938), deutscher Physiker

4.3.1 Gleichstromleitfähigkeit

Durch das Anlegen einer Gleichspannung setzt ein Ladungstransport ein, der sich, nicht nur auf die tatsächlich im gesamten Volumen frei beweglichen Ladungsträgern beschränkt, sondern jegliche Art der Ladungsverschiebung umfasst. In Abhängigkeit der Beweglichkeit dieser Ladungsträger kommen die Einzelprozesse nach unterschiedlichen Zeiten zum Abschluss und tragen dann zur Gesamtleitfähigkeit (Gleichung 4.4) nicht mehr bei. Dies ist die Ursache für den, bei nahezu allen festen Isolierstoffen, charakteristischen Verlauf der spezifischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Gleichspannungsbeanspruchungsdauer, wie er in Abbildung 4.5 dargestellt ist [5], [7], [8].

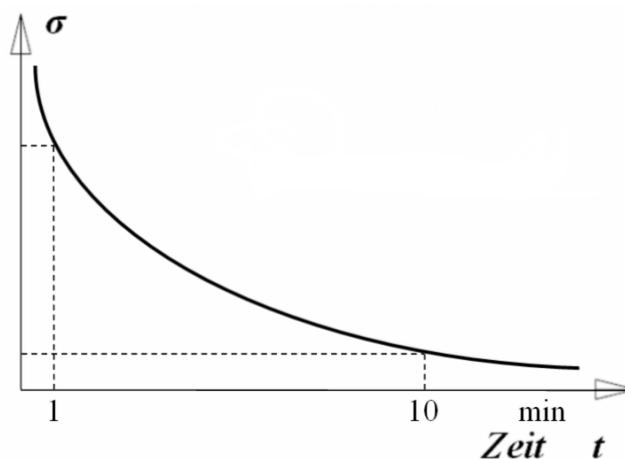


Abbildung 4.5: Gleichstromleitfähigkeit des Boards in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer bei konstanter Temperatur, nach [8]

Man unterscheidet daher bei Feststoffen zwischen der transienten und der stationären Gleichstromleitfähigkeit. Die Zeit bis zum Erreichen dieses stationären Endwertes wird dabei von vielen Faktoren wie z.B. dem Reinheitsgrad des Materials, der Temperatur oder der Prüffeldstärke beeinflusst und kann wenige Sekunden bis hin zu Monaten betragen. Allgemein stellt sich jedoch der stationäre Zustand mit zunehmender Temperatur und Prüffeldstärke schneller ein.

Die transienten Komponenten der Gleichstromleitfähigkeit werden durch Polarisationsmechanismen (siehe Kapitel 4.1) sowie durch Ladungsträgerverarmung und Elektronenanreicherung verursacht. Die Ladungsträgerverarmung kann dabei durch das Abwandern der Ladungsträger in die Elektroden oder durch Rekombination im Isolierstoff erfolgen. Unter Elektronenanreicherung versteht man die Speicherung von Elektronen im Isolierstoff durch Injektion aus der Kathode. Dies führt zum Aufbau homopolarer Raumladungen, welche den Ladungstransport erschweren. Die stationäre Gleichstromleitfähigkeit kann dem gegenüber nur durch Ladungsträger wie Ionen oder Elektronen hervorgerufen werden, die im gesamten Isolierstoffvolumen frei beweglich sind und deren Ausscheidung aus dem Leitungsprozess z.B. durch Entladung oder

Rekombination, durch laufende Generation neuer Ladungsträgern kompensiert wird, sodass die Ladungsträgerdichte konstant bleibt. Dies kann wie bereits erwähnt durch Dissoziation oder Ladungsträgerinjektion erfolgen aber auch durch thermisch bzw. durch Strahlung angeregte Gitterschwingungen des Feststoffverbandes [5], [7], [8].

4.4 Leitfähigkeit im ölimprägniertem Board

Die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Boards ergibt sich aus den Leitfähigkeiten der Komponenten Öl und Board, wie in den Kapiteln 4.2 sowie 4.3 beschrieben, hauptsächlich durch Dissoziation von Fremdstoffen. Dabei unterscheiden sich die Leitfähigkeiten deutlich. Sie liegen größenordnungsmäßig bei Raumtemperatur für Isolieröl bei etwa 10^{-13}S/m und für Board bei etwa 10^{-15}S/m [10]. Dieses Leitfähigkeitverhältnis von etwa 100 zu 1 hat jedoch bei Wechselspannungsbeanspruchungen praktisch keinen Einfluss, da sich ein dielektrisches Verschiebungsfeld entsprechend den Permittivitäten aufbaut, wohl aber bei Gleichspannungsbeanspruchungen. Nach Abklingen aller Übergangsvorgängen dominieren dort die Leitfähigkeiten und die Feldbeanspruchung erfolgt nach dem stationären Strömungsfeld [4], [10].

4.4.1 Anlegen einer Gleichspannung an ein Öl-Board-Isolationssystem

Durch das sprunghafte Anlegen der Gleichspannung an eine Öl-Board-Barrierenanordnung stellt sich zunächst eine kapazitive, raumladungsfreie Feldverteilung ein. Die elektrische Beanspruchung der Komponenten Öl und Board erfolgt gemäß dem dielektrischen Verschiebungsfeld nach den Permittivitäten. Infolge des Permittivitätsverhältnisses von 1 zu 2 (Isolieröl: $\epsilon_r = 2,2$; Board: $\epsilon_r = 4,4$ [10]) ergibt sich im Ölspalt eine doppelt so große elektrische Feldstärke als in der Barriere. Infolge dieser Feldverdrängung wird das Material mit der niedrigeren Permittivität, also das Öl, stärker belastet (Abbildung 4.6 links) [4], [10].

Die Stromdichten in den beiden Materialien lassen sich entsprechend der Gleichung 4.3 ermitteln. Aus der Feldverdrängung Öl-Board von 2 zu 1 und dem Leitfähigkeitverhältnis Öl-Board von 100 zu 1, resultiert eine deutlich höhere (Faktor 200) Stromdichte im Öl. Daher staut sich die Ionenströmung im Ölspalt an der Grenzfläche Öl-Board und bildet eine Raumladungszone aus, wodurch die Feldstärke mit zunehmender Zeit im Öl abnimmt, während sie in der Barriere zunimmt. Im stationären Zustand ergibt sich schließlich eine vollständig resistive Feldverteilung und die elektrische Beanspruchung der Komponenten Öl und Board erfolgt gemäß dem stationären Strömungsfeld nach deren Leitfähigkeiten. Die Folge ist eine extreme Feldverdrängung in das geringer

leitfähigere Material, unter der es zur praktischen Entlastung des Isolieröles sowie zur starken Belastung der Barriere kommt (Abbildung 4.6 rechts) [4], [10].

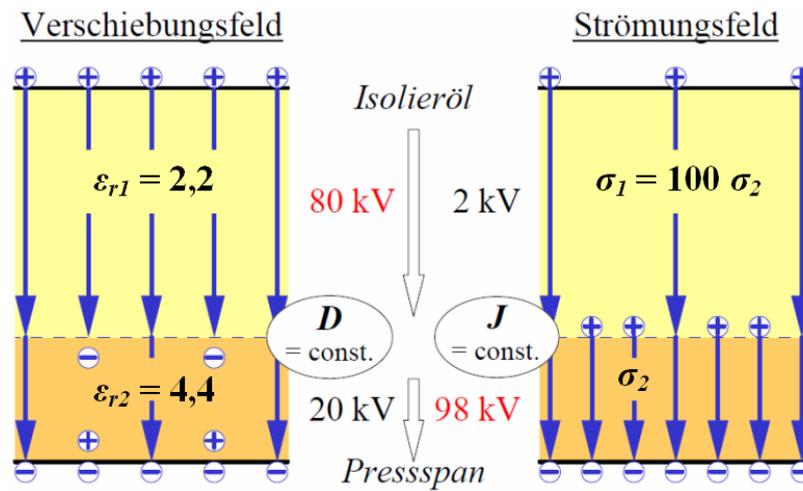


Abbildung 4.6: Schematische Feld- und Spannungsverteilung in einem Öl-Board-Isolationssystem für das dielektrische Verschiebungsfeld (links) sowie das stationäre Strömungsfeld (rechts), nach [4]

Abbildung 4.7 zeigt den Ausschnitt der Simulation einer Barrierenisolation. Der Aufbau des untersuchten Isolationsmodell entspricht dem der Isolation im Wicklungsbereich. Dargestellt ist der Übergang vom dielektrischen Verschiebungsfeld in das stationäre Strömungsfeld bei einem DC-Spannungssprung von 0 auf 100kV. Für weitere Betrachtungen soll an dieser Stelle auf [1] verwiesen werden.

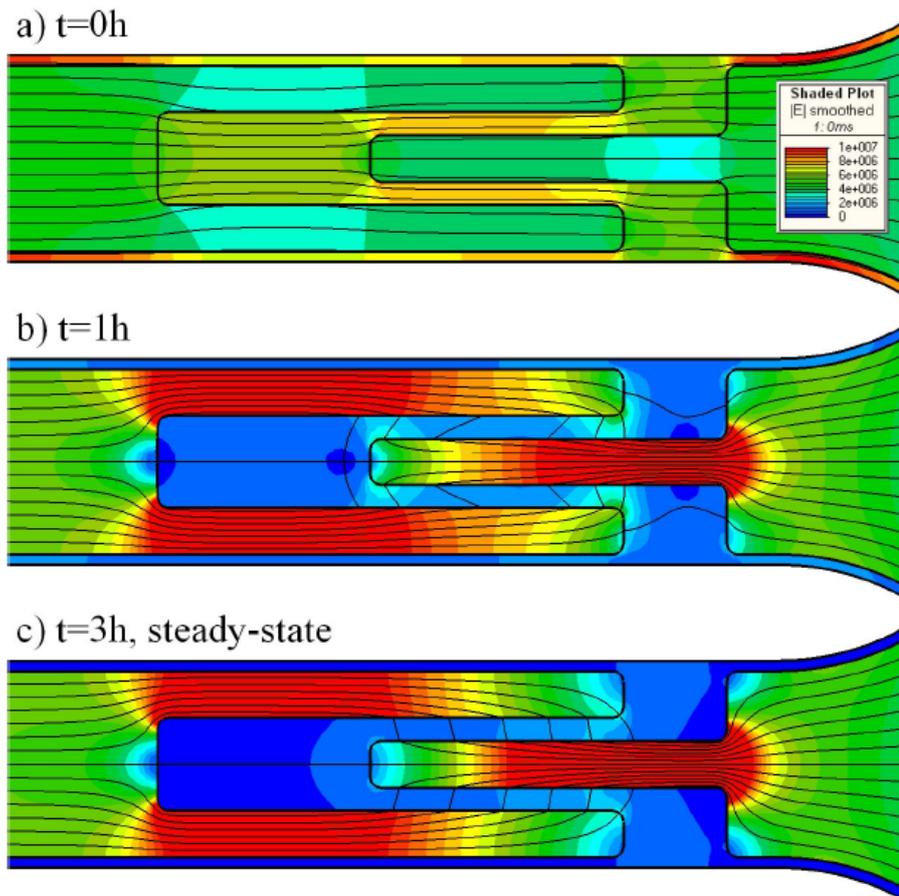


Abbildung 4.7: Feldverteilung eines Öl-Board-Isolationssystems bei einem DC-Spannungssprung von 0 auf 100kV, aus [1]

5 Einflussparameter auf die Leitfähigkeit

Wie bereits einleitend festgehalten wurde, darf die elektrische Leitfähigkeit des Boards nicht als konstanter Parameter aufgefasst werden. Die elektrische Leitfähigkeit unterliegt vielmehr sehr vielen Einflussfaktoren wie z.B. elektrische Feldstärke, Feuchte, Temperatur, Alterung sowie materialspezifischen Eigenschaften. Im Nachfolgenden soll eine gezielte Untersuchung der Einflüsse elektrische Feldstärke, Temperatur sowie Feuchte auf die elektrische Leitfähigkeit des ölprägnierten Boards erfolgen. Es sei noch angemerkt, dass sich mit zunehmender Beanspruchungsdauer eine Ladungsträgerverarmung im Isolierstoffvolumen ergibt und die elektrische Leitfähigkeit daher wie im Kapitel 4 bereits erarbeitet wurde, natürlich auch entscheidend vom Parameter Zeit abhängig ist. Die Einflussparameter elektrische Feldstärke, Feuchte und Temperatur sind daher als Funktionen der Zeit zu verstehen.

5.1 Elektrische Feldstärke

Bei Erhöhung der elektrischen Feldstärke zeigt sich zunächst kein Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, sie bleibt konstant. Bei flüssigen Isolierstoffen hingegen können im Bereich von 1 bis 2kV/mm sogar Leitfähigkeitsminima beobachtet werden, da in diesem Bereich Ionen durch das elektrische Feld abgesaugt werden, die Feldstärke jedoch für die Generation neuer Ionen zu gering ist. Bei weiterer Steigerung der Feldstärke zeigt sich schließlich ein Anstieg der Leitfähigkeit, der sich durch die Zunahme an Ladungsträger im Isolierstoffvolumen infolge Dissoziationsprozessen sowie Elektroneninjektion aus der Kathode erklären lässt [7], [16]. Abbildung 5.1 zeigt die Feldstärkeabhängigkeit der Leitfähigkeit von Mineralöl bei konstanter Temperatur.

Bei Isolierölen auf Mineralölbasis erfolgt die Leitfähigkeitszunahme bei 20°C ab einer Feldstärke von ca. 2kV/mm, bei 70°C beispielsweise bereits ab etwa 0,8kV/mm. Bei konstanter Temperatur lässt sich die Leitfähigkeit näherungsweise mit dem Potenzgesetz nach Gleichung 5.1 beschreiben [7]. Dabei ist σ_0 die vom elektrischen Feld unbeeinflusste Leitfähigkeit, E_0 die Feldstärke im Knickbereich zum Leitfähigkeitsanstieg und m ein positiver Exponent.

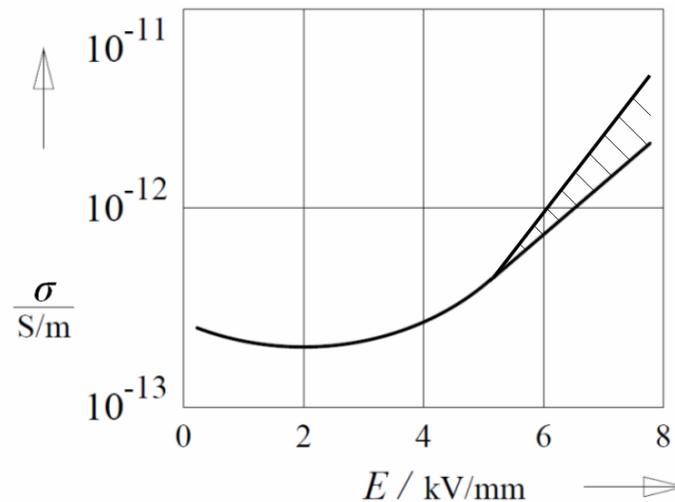


Abbildung 5.1: Leitfähigkeit von Mineralöl als Funktion der Feldstärke bei Raumtemperatur, nach [3], [7], [15]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^m \quad (5.1)$$

Bei Feststoffen zeigt sich hingegen eine wesentlich geringere Feldstärkenabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bis etwa 20kV/mm [3], [7]. Der prinzipielle Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Feldstärke bei konstanter Temperatur ist in Abbildung 5.2 ersichtlich und lässt sich in drei charakteristische Bereiche unterteilen [8]:

- Bereich I: Leitfähigkeit ist feldstärkeunabhängig und ergibt sich durch Leitungsmechanismen, siehe dazu Kapitel 4.3.
- Bereich II: Übergangsbereich, in dem die Leitfähigkeit, die bei niedriger Feldstärke hauptsächlich auf Ionenleitung basiert, mit wachsender elektrischer Beanspruchung durch den Einsatz von Elektronenleitung steigt. Dieser Übergang erfolgt je nach Art, Temperatur und Reinheit des Isolierstoffes bei etwa 1kV/mm.
- Bereich III: Die Leitfähigkeit gehorcht in Abhängigkeit des Feldes einem Potenzgesetz (ähnlich Gleichung 5.1) und wird nahezu ausschließlich durch Elektronenleitung bestimmt. In doppelt-logarithmischer Darstellung manifestiert sich dieser Zusammenhang als Gerade.

Bei imprägniertem Isolierpapier (OIP) oder imprägniertem Pressspan aus natürlichen Faserstoffen zeigt sich jedoch bei trockenen Materialien bis etwa 20kV/mm fast keine Feldstärkenabhängigkeit [7].

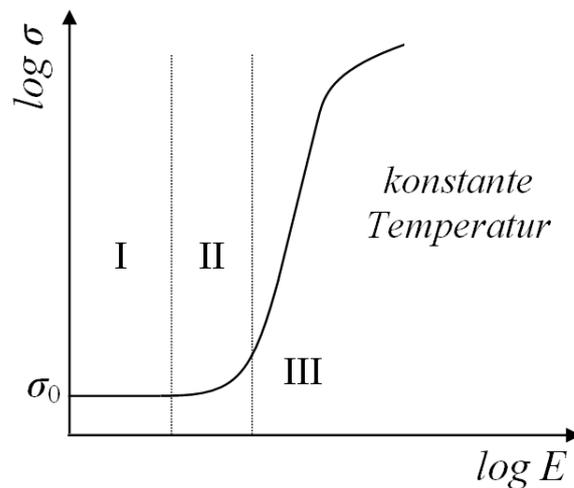


Abbildung 5.2: Schematischer Verlauf der Leitfähigkeit von Feststoffen als Funktion der Feldstärke, nach [8]

5.2 Feuchte

Der Feuchtigkeitseinfluss auf das elektrische Verhalten des Öl-Board-Isolationssystems ist nicht unerheblich. Prinzipiell nimmt die Leitfähigkeit des Öl-Board-Isolationssystems mit dem Wassergehalt infolge Dissoziation zu (siehe dazu Kapitel 4.2 und 4.3). Der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Leitfähigkeit ist jedoch sehr komplex. Untersuchungen an neuwertigen, befeuchteten Proben, zeigten eine exponentielle Abhängigkeit, die sowohl vom Feuchtigkeitsgehalt des Papiers als auch von der Ölleitfähigkeit abhängt. Die Leitfähigkeit beginnt bereits bei einer Papierfeuchte größer 0,1% exponentiell zu steigen. Zudem spielt es auch eine Rolle, wie die Befeuchtung erfolgt bzw. die Feuchtigkeit in der Probe verteilt ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Leitfähigkeitsverteilung im Board nicht homogen ist und es Zonen an der Oberfläche mit höheren Leitfähigkeiten gibt. Es ist jedoch möglich, die Gleichstromleitfähigkeit bzw. den Endwert des Polarisationsstromes als Indikator für die Feuchte heran zu ziehen [7], [14], [16].

Abbildung 5.3 zeigt schematisch die Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes F bei Raumtemperatur für ölprägnierte Papiere bei unterschiedlichen Ölleitfähigkeiten (graue Kurven) sowie ölprägniertem Pressspan (dunkelgraue Kurve).

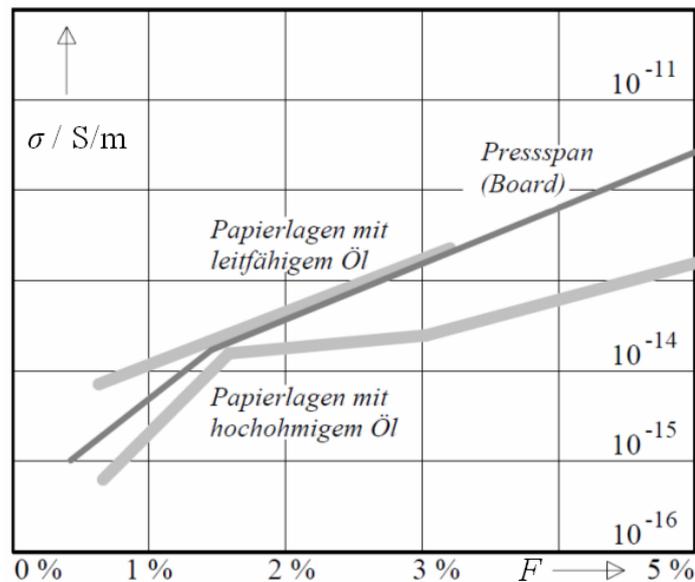


Abbildung 5.3: Leitfähigkeit als Funktion des Feuchtegehaltes für ölprägnierte Papiere (graue Kurven) und ölprägniertem Pressspan (dunkelgraue Kurve), schematisch bei Raumtemperatur, nach [7]

5.3 Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Leitfähigkeit der Isolierstoffe lässt sich durch die temperaturabhängige Ionenbeweglichkeit, sowie durch die Anzahl der Elektronen, die auf das Leitungsniveau gehoben werden, begründen. Die Ionenbeweglichkeit als auch die Elektronenanzahl auf Leitungsniveau nehmen mit der Temperatur exponentiell zu, dies ermöglicht den Ansatz der sogenannten Arrhenius¹-Beziehung (Gleichung 5.2) für die Ionen- und Elektronenleitung. In der Arrhenius-Beziehung bezeichnet W die materialspezifische Aktivierungsenergie, k die Boltzmann²-Konstante und T die Temperatur [7], [16].

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-W}{k \cdot T}\right) \quad (5.2)$$

Abbildung 5.4 zeigt die temperaturabhängige Leitfähigkeit von Mineralöl und Transformerboard. Infolge der einfach-logarithmischen Skalierung ergeben sich Geraden. Aus der Abbildung ist eine Leitfähigkeitszunahme bei einer Temperaturerhöhung von Umgebungstemperatur auf Betriebstemperatur von mehreren Zehnerpotenzen ersichtlich

¹Svante August Arrhenius (1859-1927), schwedischer Physiker und Chemiker und Nobelpreisträger für Chemie

²Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), österreichischer Physiker und Philosoph

[7]. Diese Tatsache und die stark unterschiedlichen, materialabhängigen Leitfähigkeiten müssen insbesondere bei der Auslegung gleichspannungsbeanspruchter Barrierenisolierungen berücksichtigt werden (siehe dazu auch Kapitel 4.4.1).

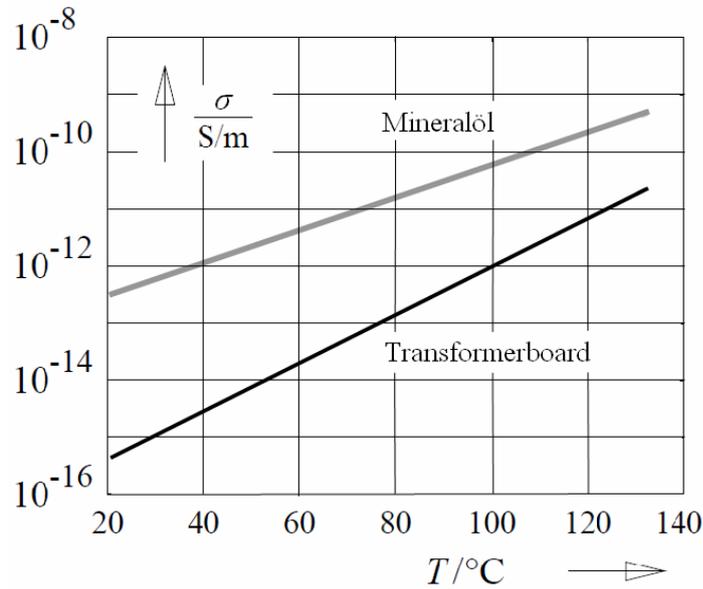


Abbildung 5.4: Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur bei einer Feldstärke von 0,5kV/mm, nach [7]

6 Prüfkessel-Design zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit

6.1 Anforderungen an den Prüfkessel

Die Konstruktion des Prüfkessels orientiert sich nach dessen primären Einsatz, nämlich der Messung der elektrischen Leitfähigkeit an Board-Scheiben. Dies legt die prinzipielle Elektrodenform, eine Schutzringanordnung nach IEC 60243-2 für die Leitfähigkeitsmessung, fest. Ebenfalls dadurch festgelegt wird ein durch die Norm angegebener Mindestanpressdruck der Elektroden auf den Prüfling, der gegebenenfalls durch zusätzliche Beschwerungsmassen gewährleistet werden muss. Da Teilentladungen die Leitfähigkeitsmessung beeinflussen würden und um den Kessel in weitere Folge auch für Teilentladungsversuche nutzen zu können, müssen alle Kesselkomponenten soweit als möglich teilentladungsfrei ausgeführt werden. Es soll außerdem die maximale Prüfspannung, bis zu der eine Teilentladungsfreiheit aller Kesselkomponenten gewährleistet werden kann, mittels Feldsimulationsprogramm ermittelt werden.

Der Kessel soll die gezielte Untersuchung des Einflusses der Parameter Feldstärke, Feuchte und Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit der Board-Scheiben ermöglichen. Unter Berücksichtigung der Kurzschlussfestigkeit wird daher eine möglichst hohe maximale Prüfspannung angestrebt, die jedoch durch die Anforderung der Teilentladungsfreiheit eingeschränkt wird. Um den Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit qualitativ erfassen zu können, soll der Kessel in einem Temperaturbereich von -20°C bis $+90^{\circ}\text{C}$ betrieben werden. Die Auswahl der Materialien, insbesondere die der Kunststoffe, orientiert sich daher nach der Temperaturbeständigkeit in diesem Bereich. Die Auswahl des Elektrodenmaterials richtet sich hingegen nach dem Einfluss auf die Leitfähigkeitsmessung, da bei Ölmessungen Metallionen infolge des elektrischen Feldes mehr oder weniger leicht, je nach Metallart, in Lösung gehen und somit die Messung empfindlich beeinflussen.

Die Analyse der Messergebnisse soll durch eine online Öl-Feuchte/-Temperaturmessung sowie eine online Umgebungs-Feuchte/-Temperaturmessung unterstützt werden.

Die Dichtheit des Kessels soll während der Langzeitmessung (48 Stunden) konstante

Prüfverhältnisse garantieren.

Genormte Kesselanschlüsse sollen den Anschluss an die Ölaufbereitungsanlage, wie sie am Institut zur Verfügung steht, ermöglichen. Außerdem soll ein zusätzlicher Flansch die Montage eines vorhandenen Lufttrockners ermöglichen. Dieser ist notwendig, um bei Temperaturänderungen einen Druckausgleich zur Umgebung zu ermöglichen.

Neben den technischen Anforderungen soll zudem ein großes Augenmerk auf die Handhabbarkeit des Kessels in Bezug auf den Wechsel der Prüfscheiben sowie dessen Mobilität gelegt werden.

Zusammenfassend sollen die wichtigsten Anforderungen an die Kesselkonstruktion nochmal angeführt werden [3]:

- Schutzringanordnung zur Leitfähigkeitsmessung nach IEC 60243-2,
- Beschwerung der Elektroden für definierte Kontaktierung laut IEC 60554,
- Auswahl der Materialien entsprechend dem Temperatureinsatzbereich von -20°C bis $+90^{\circ}\text{C}$,
- geringe Beeinflussung der Messung durch das Elektrodenmaterial,
- online Öl-Feuchte/-Temperaturmessung,
- online Umgebungs-Feuchte/-Temperaturmessung,
- Dichtheit des Kessels für definierte Verhältnisse während der Langzeitmessung,
- Teilentladungsfreiheit des gesamten Kessels,
- Anschlussmöglichkeit an die Ölaufbereitungsanlage sowie
- Handhabbarkeit sowie Mobilität.

6.2 Planung und Entwicklung

Die Kernherausforderungen der Kesselkonstruktion ergeben sich in der Findung einer Konstruktionslösung, die sowohl der durch die Norm festgelegten Eckdaten als auch den gestellten Anforderungen gerecht wird. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Dimensionierung einer Hochspannungsdurchführung, die den Umgebungsbedingungen, wie

Tabelle 6.1: Elektrodenabmessungen zur Leitfähigkeitsmessung

Schutzring Ø130mm außen, R3 außen Ø102mm innen, R1 innen Höhe 40mm
Messelektrode Ø97,8mm auf Ø60mm verjüngt, R2 am Rand außen
Spannungselektrode Ø130mm, R3 innen und R9 am Rand außen

Betriebstemperaturbereich und Ölbeständigkeit, gerecht wird, maximale Prüfspannungen unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit (Kurzschlüsse sind auszuschließen) ermöglicht und gleichzeitig Teilentladungsfreiheit gewährleistet. Um Kurzschlüsse infolge Durchschlag oder Gleitendladungen auszuschließen, ist die Isolation im Sinne der Isolationskoordination mit der gewählten Hochspannungsdurchführung abzustimmen. Durch möglichst standardisierte Komponenten sollen Fertigungskosten minimiert werden und durch die Verwendung genormter Kesselanschlüsse soll maximale Flexibilität im Einsatz erreicht werden. Zur Unterstützung der Messauswertung soll ein Öl-Feuchte/-Temperatursensor für eine online Messung implementiert werden, dabei ist besonders auf eine Montage zu achten, die einen fehlerfreien Betrieb des Sensors als auch eine rückwirkungsfreie Lösung in Bezug auf die empfindliche Leitfähigkeitsmessung darstellt. Dahingehend soll ohnedies auf eine konstruktive Lösung Wert gelegt werden, die äußere als auch innere Störungen weitgehend vermeidet bzw. unterdrückt. Um den Wechsel der Proben zu erleichtern und Standzeiten zu minimieren, ist auf eine bedienungsfreundliche Konstruktion besonders Wert zu legen.

6.2.1 Entwicklungsphasen des Kessels

Die Elektrodenabmessungen der Schutzringanordnung orientieren sich unter Berücksichtigung der Norm IEC 60243-2 nach der Probe (siehe Tabelle 6.1). Unter Einhaltung der empfohlenen Messfläche ist eine Modifikation im Sinne der gestellten Anforderungen möglich. Aus diesem Grund wurde die Spannungselektrode in Form einer Wanne, die im Innendurchmesser an den Durchmesser der Board-Scheiben angepasst wurde, ausgeführt. Dies soll beim Einlegen der Probe für eine Zentrierung in Bezug auf die Messelektrode und dem Schutzring sorgen und ein Verrutschen der Probe während der Messung verhindern. Damit der Öl-Feuchte/-Temperatursensor möglichst genaue Prüfbedingungen, also probenahe Verhältnisse erfasst, soll dieser so nah als möglich an die Probe herangeführt werden. Da es sich beim gewählten Sensor um eine kapazitive Feuchtigkeitsmessung handelt und einstreue Felder die Messung verfälschen würden, liegt es nahe, den Sensor im Feldschatten zu platzieren. Um Platz für

den Temperatur- und Feuchtefühler im feldtoten Raum, zwischen Messelektrode und Schutzring zu schaffen, wurde auch bei der Höhe des Schutzringes nicht an der Norm festgehalten.

Abbildung 6.1a zeigt schematisch die Schutzringanordnung zur Leitfähigkeitsmessung. Um die Messelektrode vor einstreuenden Störfeldern zu schirmen, sind unterschiedliche Lösungsansätze denkbar, wobei grundsätzlich fest zu halten ist, dass das elektrische Feld, ausgehend von der sich auf Hochspannungspotential befindlichen Spannungselektrode, sicher das dominanteste Störfeld darstellen wird. Abbildung 6.1b zeigt eine Anordnung mit modifiziertem Schutzring, um die Messelektrode besser vor dem elektrischen Feld der Spannungselektrode zu schirmen. Die in Abbildung 6.1c dargestellte Ausführung des Schutzringes soll im gesamten Bereich über dem Schutzring Feldfreiheit erzeugen, Abbildung 6.1d zeigt schließlich die umgesetzte Ausführungsform der Elektrodenanordnung. Die Messelektrode ist vollständig in den Schutzring eingebettet und so können auch etwaige Störungen infolge der Datenleitung zum Feuchte- und Temperaturempfänger verhindert werden.

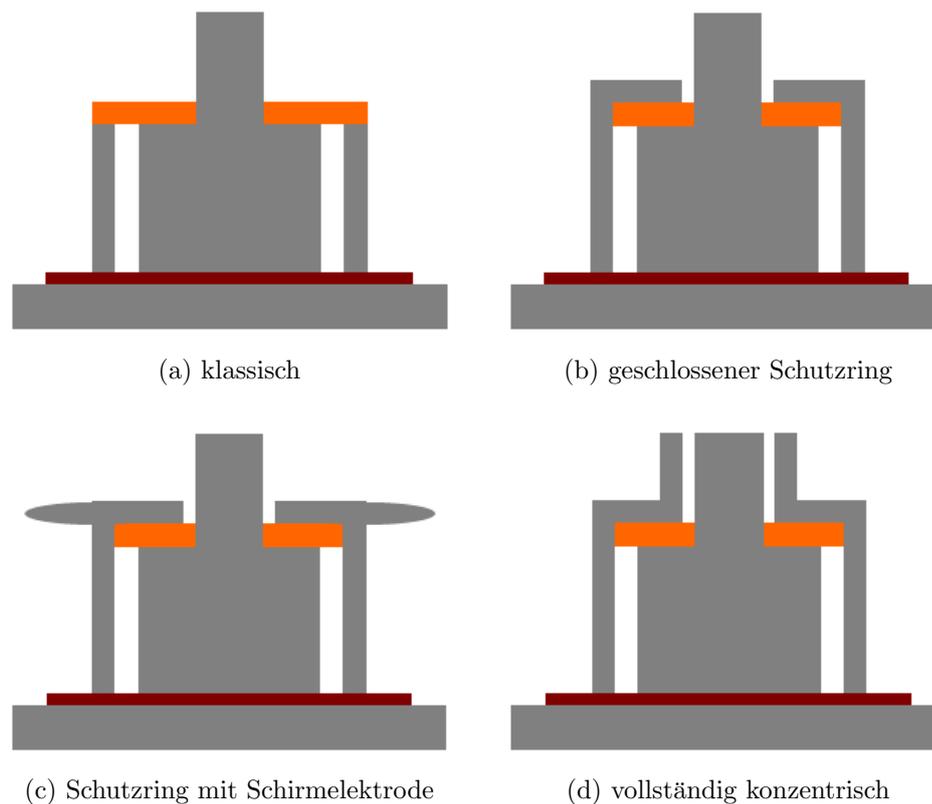


Abbildung 6.1: Schematische Ausführungsformen der Schutzringanordnung (grau: elektrisch leitend; orange: isolierend; braun: Board)

Nach der geltenden Norm IEC 60554 soll der Anpressdruck von Messelektrode und Schutzring auf die Spannungselektrode bzw. den Prüfling mindestens 20kPa betragen.

Berechnungen haben unter Berücksichtigung des Ölauftriebs, bei einer Fertigung der Elektroden aus Edelstahl bzw. Messing, eine zusätzlich notwendige Beschwerungs-
masse von 12,9kg bei Edelstahlausführung bzw. 11,8kg bei Messingausführung ergeben.
Mit der geplanten Beschwerung von 13kg wird auf jeden Fall der notwendige Anpress-
druck erreicht.

Um Luftbläschen in der Elektrodenanordnung zu verhindern, müssen Maßnahmen, ins-
besondere für den Bereich zwischen Messelektrode und Schutzring, getroffen werden.
Die Formgebung des sich dort befindlichen Distanzstückes soll in Verbindung mit Boh-
rungen für eine optimale Ölverteilung ohne Lufteinschlüsse sorgen (siehe Abbildung
6.3).

Abbildung 6.2 zeigt den gewählten Ölfeuchte- und Temperaturmesswertgeber für die
Onlinemessung der Serie MMT330 der Firma Vaisala¹ (Datenblatt im Anhang ent-
halten) und Abbildung 6.3 das Schnittbild der modifizierten Schutzringanordnung mit
Feuchte- und Temperatursensor. Der Sensor wird von oben durch den Schutzring in
den feldtoten Raum zwischen Schutzring und Messelektrode eingeführt und direkt im
Schutzring verschraubt, dadurch ergibt sich auch der Vorteil einer gemeinsamen Masse.
In weiterer Folge erzeugt der Schutzring in Verbindung mit der Beschwerungs-
masse eine Schirmung der Messelektrode bis zur elektrischen Anschlussstelle (siehe Abbildung
6.3).



Abbildung 6.2: Vaisala HUMICAP Ölfeuchte- und Temperaturmesswertgeber der Se-
rie MMT330, www.vaisala.com

¹www.vaisala.com

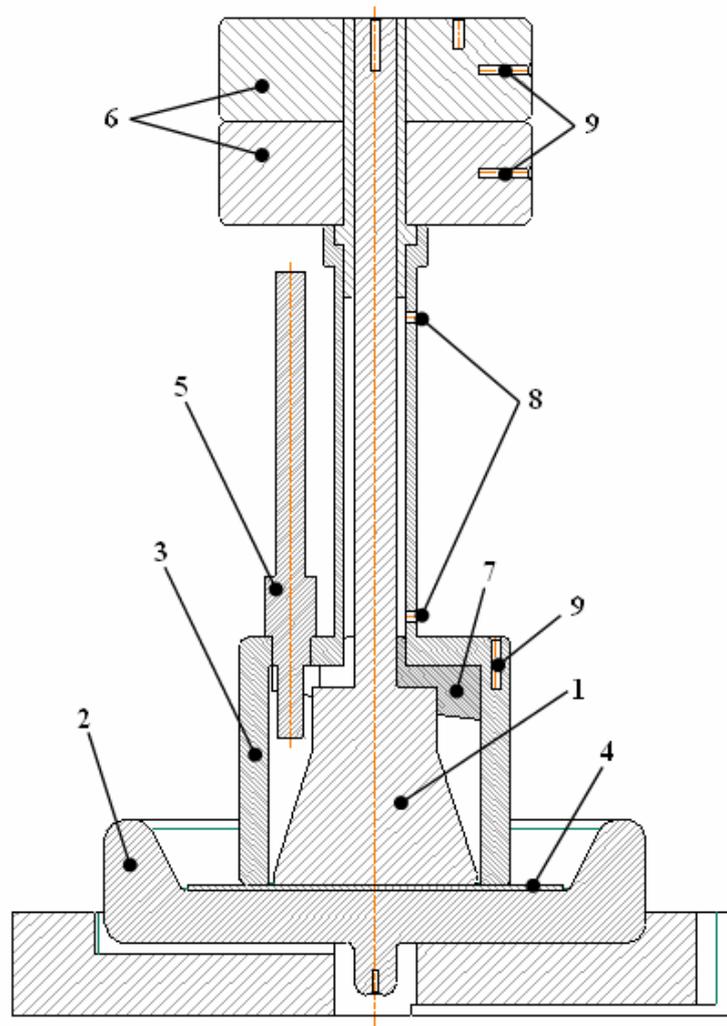


Abbildung 6.3: Schnittbild der Elektrodenanordnung

Legende zur Abbildung 6.3:

- 1 Messelektrode
- 2 Spannungselektrode in Wannenform
- 3 Schutzring
- 4 Probe
- 5 Ölfeuchte- und Temperatursensor
- 6 Beschwerungsmassen, zur besseren Handhabbarkeit geteilt
- 7 Distanzstück zur Übertragung des Anpressdrucks auf die Messelektrode
- 8 Bohrungen zur Ölverteilung und Luftblasenminderung
- 9 Bohrungen zur Herstellung der elektrischen Verbindungen

6.2.2 Auswahl der Materialien

Wie bereits erwähnt, spielt für die Auswahl der Kunststoffe der Temperatureinsatzbereich des Kessels eine wesentliche Rolle, sowie die notwendige Ölbeständigkeit. Ein entscheidendes Merkmal für die Fertigung ist zudem auch die mechanische Bearbeitbarkeit. Aus diesen Gründen wurden alle notwendigen Kunststoffisolationen sowie Zentrier- und Distanzeinrichtungen aus Polytetrafluorethylen (PTFE), welches umgangssprachlich als Teflon, dem Handelsname der Firma DuPont, bezeichnet wird, gefertigt. Es erfüllt sowohl die geforderte thermische als auch chemische Beständigkeit und ist mechanisch durch alle gängigen spanenden Vorgänge bearbeitbar.

Empirische Untersuchungen durch Prof. Küchler bezüglich des Einflusses des Elektrodenmaterials auf die Leitfähigkeitsmessung infolge Metallione die bei höheren Feldstärken bzw. durch chemische Reaktionen in Lösung gehen, haben gezeigt, dass Edelstahl diesbezüglich zweckmäßig ist. Daher wurden sowohl die Elektroden als auch sämtliche metallische Komponenten des Kessels aus Edelstahl gefertigt, da diese Wahl auch empfehlbar bezüglich Korrosion ist. Weitere Vorteile eines elektrisch leitfähigen Kessels bestehen in der Tatsache eines definierten Potentials (Erddpotential durch Erdung), dies könnte bei Kunststoffen infolge der elektrostatischen Aufladung nicht gewährleistet werden, sowie der Störunterdrückung durch Schirmwirkung.

6.3 Teilentladungsfestigkeit der Elektrodenanordnung

Bei der Planung des Prüfkessels, insbesondere bei seiner Konstruktion, soll ein Augenmerk auf seine Teilentladungsfreiheit geworfen werden. Der primäre Einsatz des Kessels, die Leitfähigkeitsmessung an Board-Scheiben, legt die Geometrie der Elektroden fest. Bedingt durch diese Geometrie, der Isolierstoffe und der Art der Prüfspannung (Gleich- oder Wechselspannung) ergibt sich die elektrische Beanspruchung auf die Isoliermedien infolge des elektrischen Feldes. Es zeigt sich also, dass eine Angabe der Teilentladungseinsetzspannung, also jene Spannung, bei der Vorentladungen einsetzen, sich nur auf eine bestimmte Anordnung unter bestimmten Nebenbedingungen beziehen kann, da nicht die Spannung sondern die Belastung durch das elektrische Feld ausschlaggebend ist.

Im homogenen elektrischen Feld entspricht die Einsetzspannung U_{TE} der Durchschlagspannung U_D , das heißt, jede Vorentladung führt zum Durchschlag. Im inhomogenen elektrischen Feld ist die Einsetzspannung stets kleiner als die Durchschlagspannung. Es handelt sich um jene Spannung, bei der sich infolge der Feldüberhöhung an der stärker gekrümmten Elektrode, Vorentladungen, sogenannte Teilentladungen (TE) ausbilden [7].

Zur Ermittlung der Teilentladungseinsetzspannung ist also eine Feldanalyse bezüglich der elektrischen Feldstärke notwendig. Die lokale Feldstärkenverteilung ist jedoch nicht nur von der Elektrodengeometrie, sondern unter anderen, wie in Kapitel 4.4.1 bereits diskutiert, auch von der Art der Prüfspannung abhängig. Zudem können sich noch zusätzliche lokale Feldstärkenüberhöhungen geometrisch bedingt (Zwickel) oder durch andere Einflüsse (Verunreinigungen, Zersetzungsprodukte) ergeben.

Es sollen nun für die verwendeten Isolierstoffe die TE-Einsetzfeldstärken ermittelt werden, um an Hand dieser, auf die maximale Prüfspannung (AC/DC) rückschließen zu können. Zu beachten sind jedoch die unterschiedlichen Entladungsverhalten von Teilentladungen bei Wechselspannung und Gleichspannung, sowie die Tatsache der noch unzureichend entwickelten Interpretation von TE-Ereignissen bei Gleichspannung [7]. Daher erfolgen die Betrachtungen zunächst für Wechselspannungen (50Hz).

6.3.1 Ermittlung der Teilentladungseinsetzfelstärke in Öl

Abbildung 6.4 zeigt die Abhängigkeit der Teilentladungseinsetzfelstärke E_{TE} in Abhängigkeit der relativen Ölfeuchte w_{rel} und dem relativen SF_6 -Gasgehalt V_{rel,SF_6} für ein Isolieröl auf Mineralölbasis (Transformatoröl) bei 23°C [11].

Experimentell wird für Transformatoröl folgende Teilentladungseinsetzspannung und Teilentladungseinsetzfelstärke ermittelt [11]:

Tabelle 6.2: TE-Einsetzspannung und TE-Einsetzfelstärke von Transformatoröl, aus [11]

Spitzenradius der Hyperboloidnadel $r = 6\mu\text{m}$ Schlagweite $s = 4\text{cm}$ 20°C		
	U_{TE} kV	E_{TE} kV/mm
Transformatoröl	24	785

Anmerkung: Es handelt sich hierbei um die Teilentladungseinsetzspannung im stark inhomogenen Feld, solche Geometrien werden im Prüfkessel vermieden!

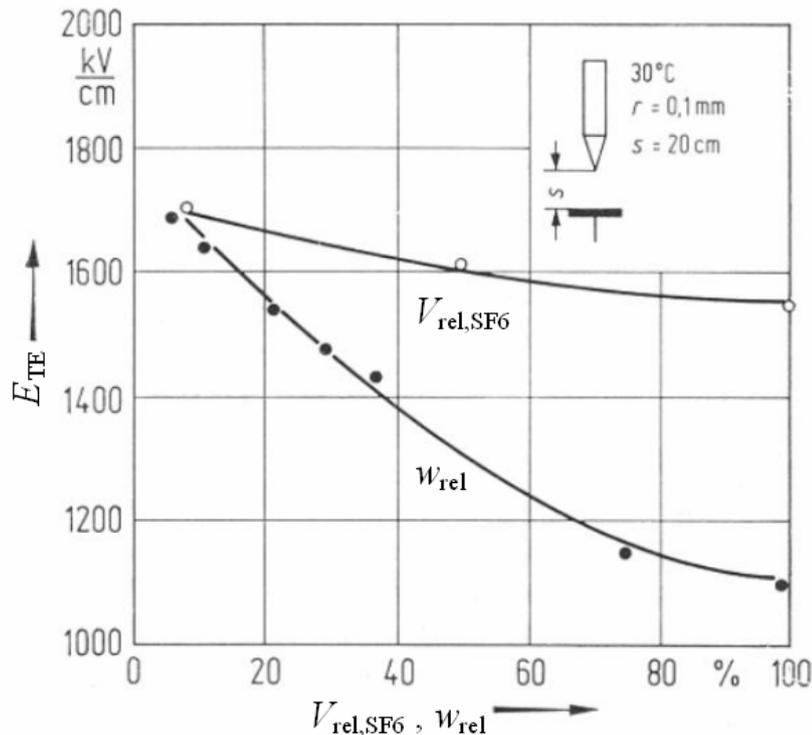


Abbildung 6.4: Teilentladungseinsetzfeldstärke eines Isolieröls auf Mineralölbasis, nach [11]

6.3.2 Ermittlung der Teilentladungseinsetzfelstärke in Transformierboard

Bei der elektrischen Untersuchung von Transformierboard muss immer berücksichtigt werden, dass es sich um keinen Festkörper im Sinne der Theorie des elektrischen Durchschlages handelt, sondern um ein Mischdielektrikum aus festen Zellulosefasern mit gasförmigen oder flüssigen Isoliermedium [10].

Abbildung 6.5 zeigt zwei mögliche Prüfanordnungen der TE-Messung, eine symmetrische Kugelelektrodenanordnung gemäß VSM 77107/1945, sowie die Platte-Platte Anordnung gemäß IEC 60641-2/IEC 60243. Die gemessenen TE-Einsetzspannungen von 1mm dicken Transformierboard bei einer Prüffrequenz von 50Hz sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

Aus Abbildung 6.6 ist ersichtlich, dass die Teilentladungseinsetzspannung U_{TE} mit steigender Dichte des Transformierboards sinkt. Außerdem ist ein früherer Einsatz von Teilentladungen bei Verwendung der IEC-Elektroden bemerkbar [10].

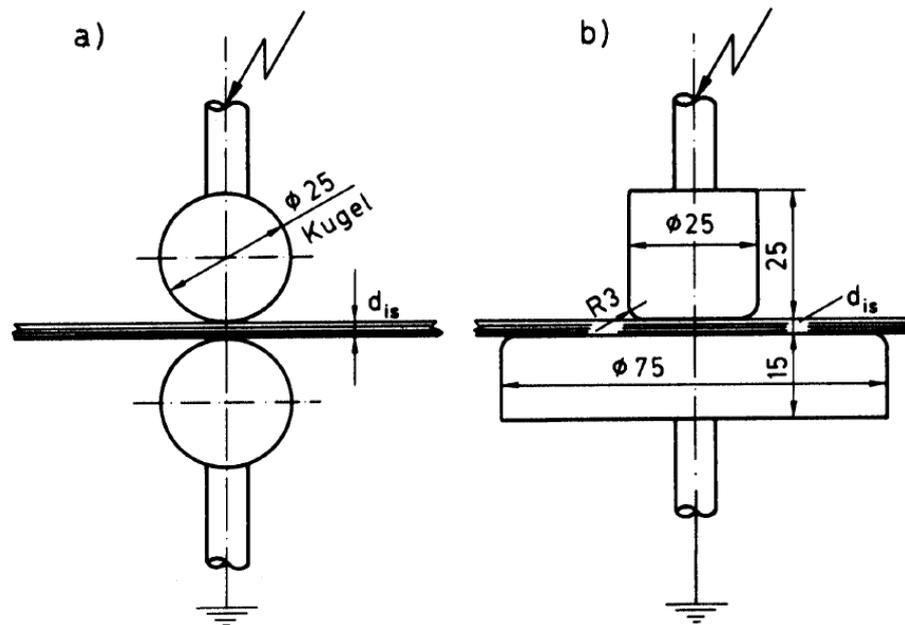


Abbildung 6.5: Prüfanordnung zur TE-Messung: a) symmetrische Kugelelektrodenanordnung gemäß VSM 77107/1945, b) Platte-Platte Anordnung gemäß IEC 60641-2/IEC 60243, aus [10]

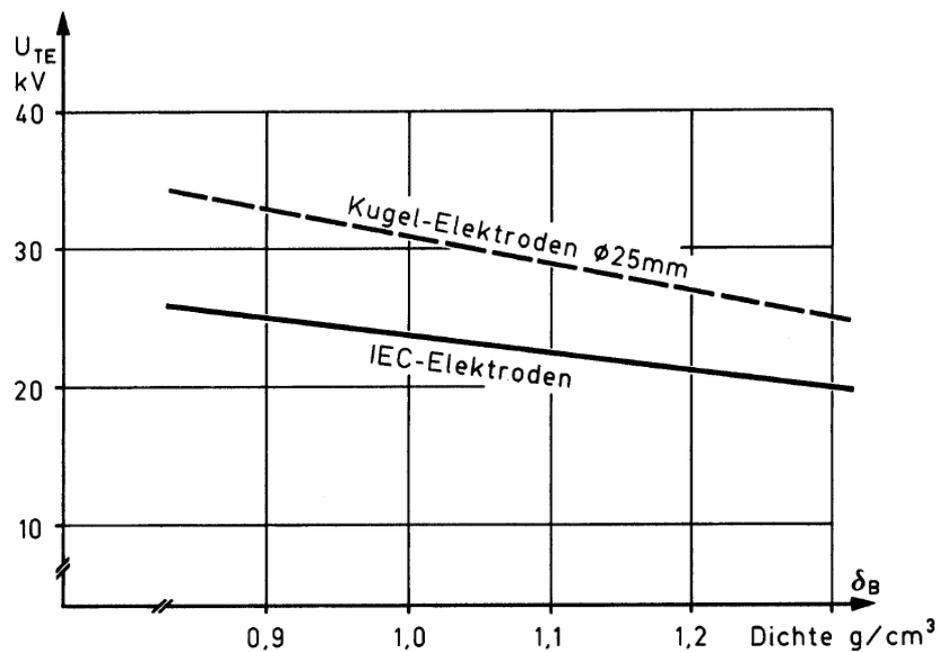


Abbildung 6.6: TE-Einsatzspannung $U_{TE}(eff)$ bei 50Hz und 1mm Boarddicke, aus [10]

Wie diese Ergebnisse zeigen, wird die Teilentladungseinsetzspannung im Wesentlichen durch die elektrische Beanspruchung des umgebenden Öls bestimmt. Daher ist sie von der Geometrie der Elektroden, insbesondere im Zwickelbereich und der Permittivität des Transformerboards abhängig, welche wiederum eine Funktion der Dichte ist (Abbildung 6.7). Die Feldverteilung erfolgt bei 50Hz kapazitiv, entscheidend ist daher das Verhältnis der Permittivitätszahlen von Öl und Transformerboard.

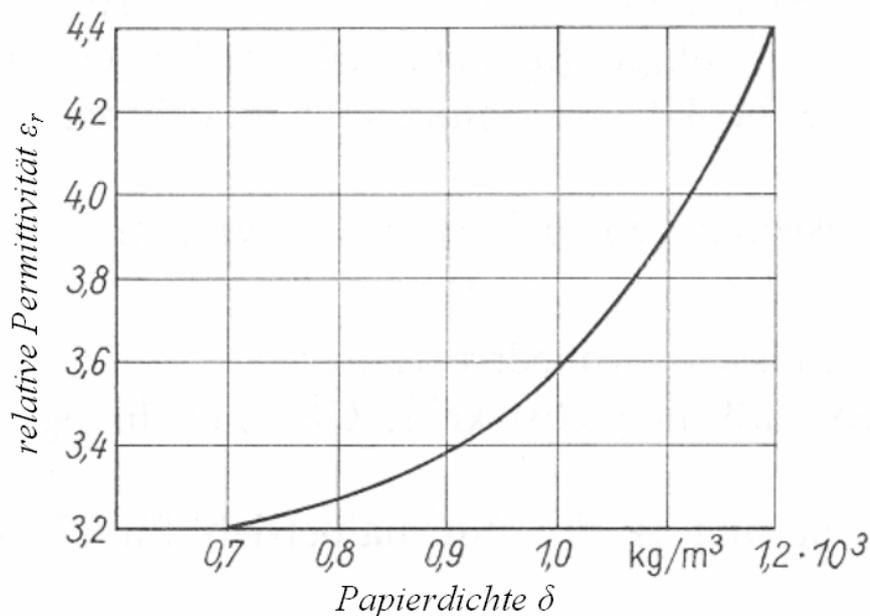


Abbildung 6.7: Permittivität eines Öl-Board-Dielektrikums als Funktion der Dichte, nach [12]

Unter Gleichspannung wird die höhere Leitfähigkeit des Öls im Vergleich zum getränkten Transformerboard zu einer Feldentlastung des schwächeren Isolieröls führen [12]. Die Feldverteilung erfolgt resistiv (siehe auch Kapitel 4.4.1). Dies begründet die höhere Teilentladungseinsetzspannung gegenüber Wechselspannung. Es ist jedoch eine stark temperaturabhängige Leitfähigkeit des getränkten Boards zu erwarten. Bei steigender Temperatur wird sich die TE-Einsetzspannung reduzieren [12].

Bei Gleich- und Wechselspannungsbeanspruchungen zeigt sich eine fallende Teilentladungseinsetzfeldstärke mit zunehmenden Wassergehalt. Abbildung 6.8 zeigt den Einfluss der Feuchtigkeit des Boards in einer Öl-Board-Isolierung auf die TE-Einsetzfeldstärke und die Durchschlagfeldstärke bei 90°C bei einem Board geringer Dichte mit 1mm Stärke [12].

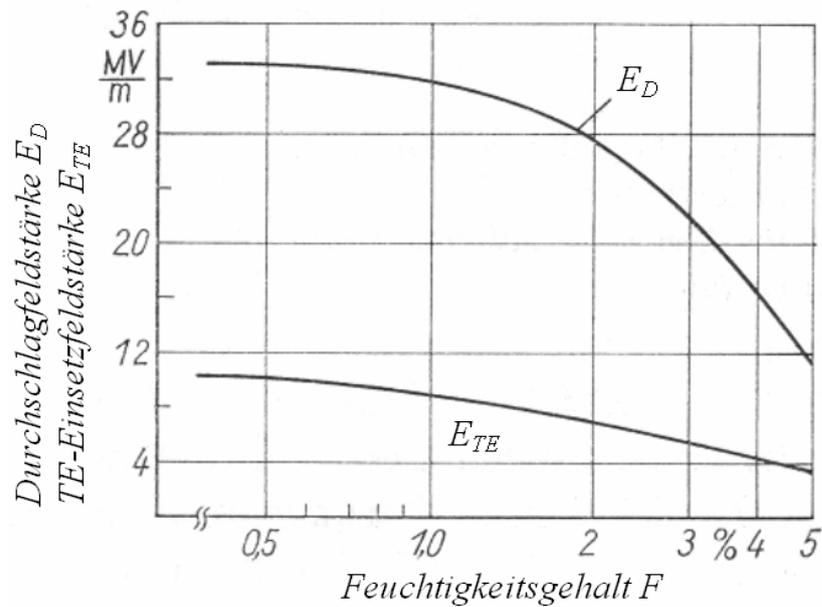


Abbildung 6.8: TE-Einsetzfeldstärke und Durchschlagfeldstärke von Board als Funktion der Feuchte (90°C , $d=1\text{mm}$), nach [12]

Simulation der TE-Einsetzfeldstärke von Transformerboard

Die Schwierigkeit besteht darin, dass es keine expliziten Angaben über die Teilentladungseinsetzfeldstärke von Transformerboard gibt, lediglich die Angabe von Teilentladungseinsetzspannungen bei bestimmten Elektrodenanordnungen unter bestimmten Nebenbedingungen. Bei den in Abbildung 6.8 gezeigten Teilentladungseinsetzfeldstärken sind genauere Daten des verwendeten Boards unbekannt.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der TE-Einsetzfeldstärke besteht in der Simulation der verwendeten Elektrodenanordnungen (siehe Abbildung 6.5) unter den gleichen Nebenbedingungen mit der TE-Einsetzspannung.

Alle Feldsimulationen werden mittels ElecNet, einer Simulationssoftware zur dreidimensionalen Berechnung elektrischer Felder von Infolytica, durchgeführt.

Abbildung 6.9 zeigt die bei der Simulation verwendete, nach IEC 60243-2 genormte Elektrodenanordnung.

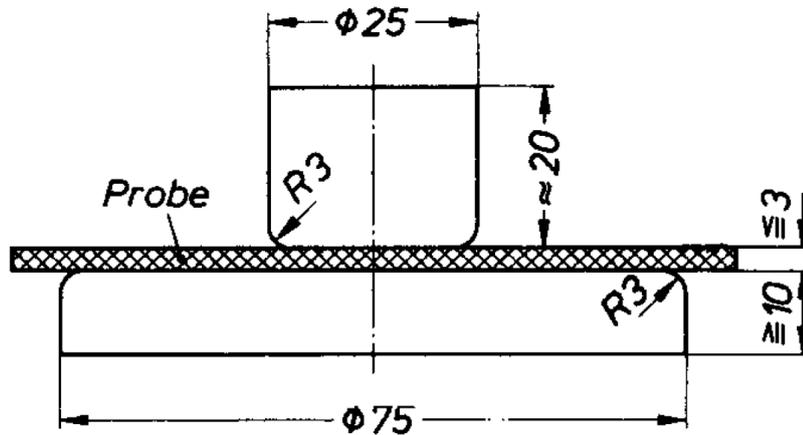


Abbildung 6.9: Elektrodenanordnung Platte gegen Platte für Isolierstoffe bis 3mm Dicke (Ausführungsbeispiel P25/P75) gemäß IEC 60243-2, aus [13]

Die Simulation erfolgt bei 50Hz Wechselspannung. Die Prüfspannungshöhe (Effektivwert) wird aus Abbildung 6.8 entnommen (gezeigt in Abbildung 6.10). Die Dichte von 1g/cm^3 entspricht dem Mittelwert aller gängigen Transformerboard-Typen [10].

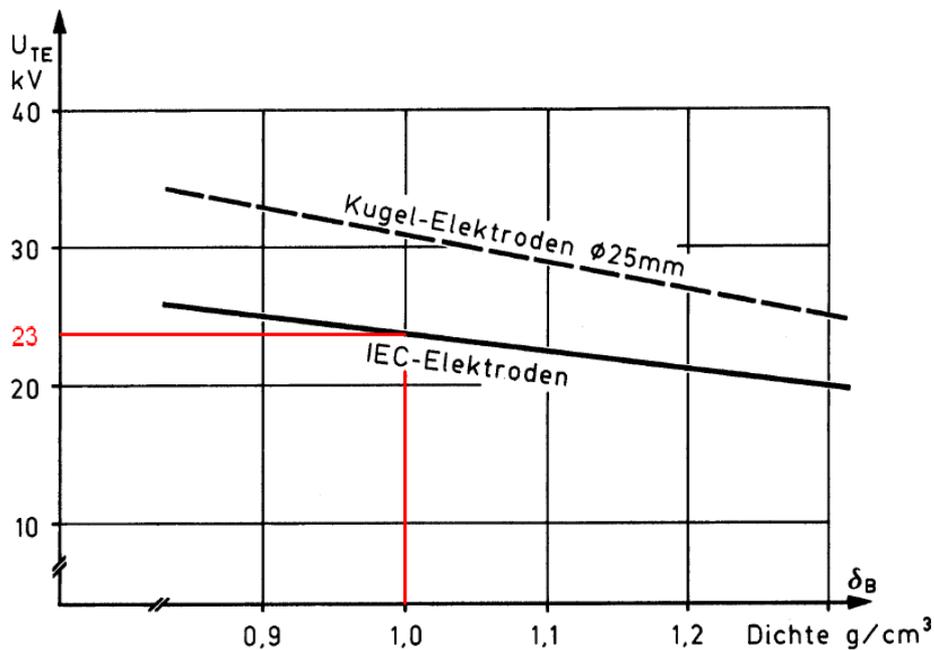


Abbildung 6.10: Ermittlung der Prüfwechselspannung, nach [10]

Die Tabelle 6.3 zeigt zusammenfassend, die für die Simulation verwendeten Daten. Abbildung 6.11 zeigt die Elektrodenanordnung, modelliert in ElecNet für die elektrische Feldberechnung, sowie rot markiert, den kritischen Zwickelbereich. Das elektrische

Feldbild nach der Feldsimulation für diesen kritischen Bereich ist in Abbildung 6.12 gezeigt. Durch die Verwendung gleicher Elektrodenabmessungen sowie gleichen spezifischen Materialparametern und Nebenbedingungen, ist es möglich, durch Anlegen der TE-Einsetzspannung die TE-Einsetzfeldstärke mittels Simulation zu bestimmen.

Tabelle 6.3: Simulationsdaten zur Ermittlung der TE-Einsetzfeldstärke

Transformatoröl	$\varepsilon_r = 2, 2; \sigma = 10^{-13}\text{S/m}$
Transformerboard	$\varepsilon_r = 4, 4; \sigma = 10^{-15}\text{S/m}$
TE-Einsetzspannung	$U_{TE}(eff) = 23\text{kV}; 50\text{Hz}$
Elektrodenanordnung	P25/P75 gemäß IEC 60243-2

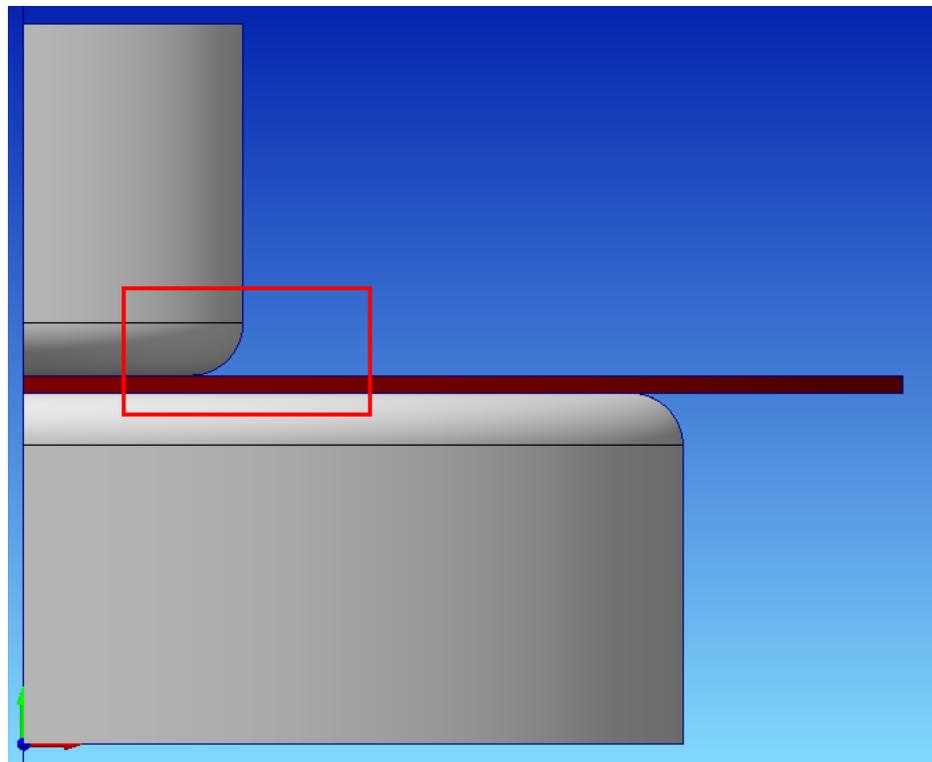


Abbildung 6.11: Elektrodenanordnung P25/P75 modelliert in ElecNet zur Feldsimulation

Abbildung 6.13 zeigt den Verlauf der elektrischen Feldstärke vom Zentrum (Symmetrieachse), entlang der Transformerboardoberfläche, über den Zwickelbereich nach außen.

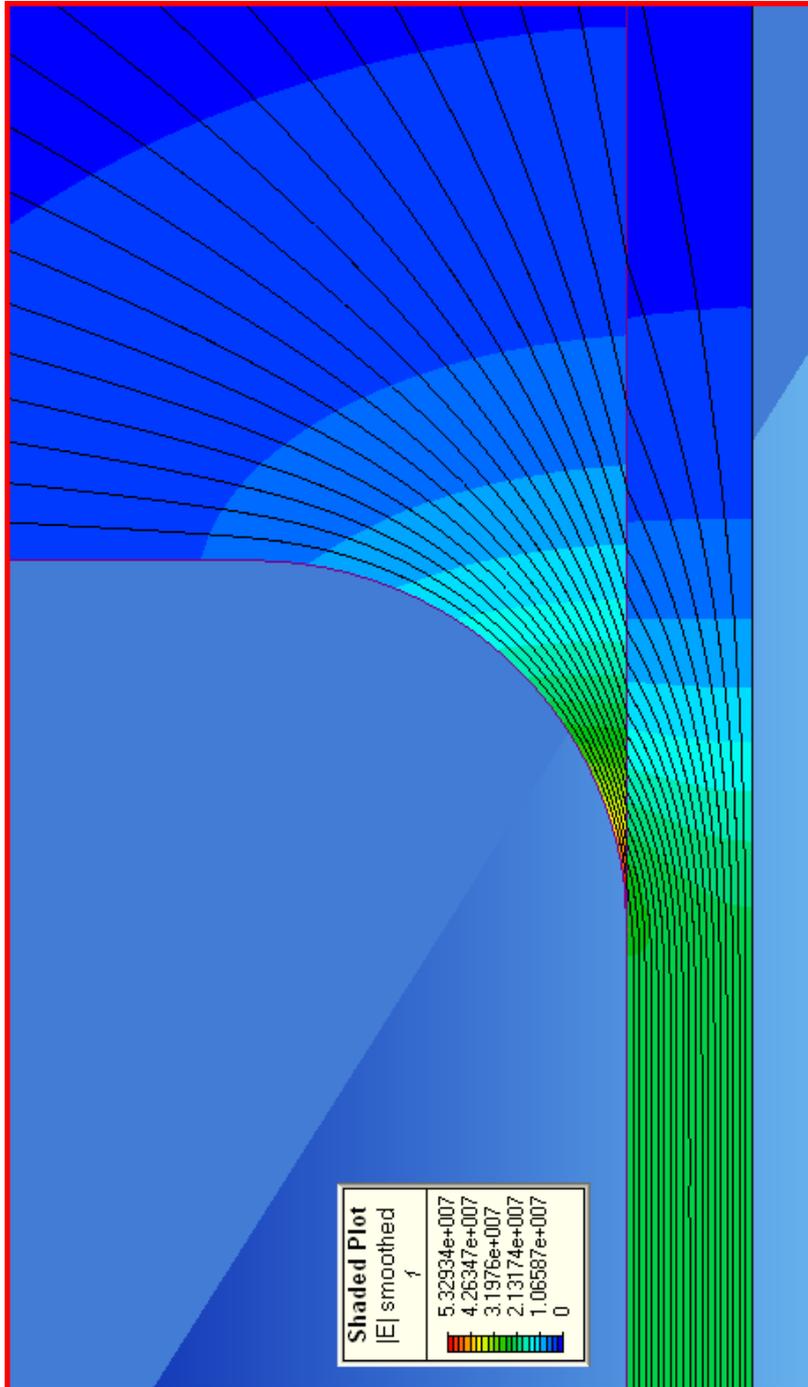


Abbildung 6.12: Erfassung der TE-Einsetzfeldstärke mittels Simulation

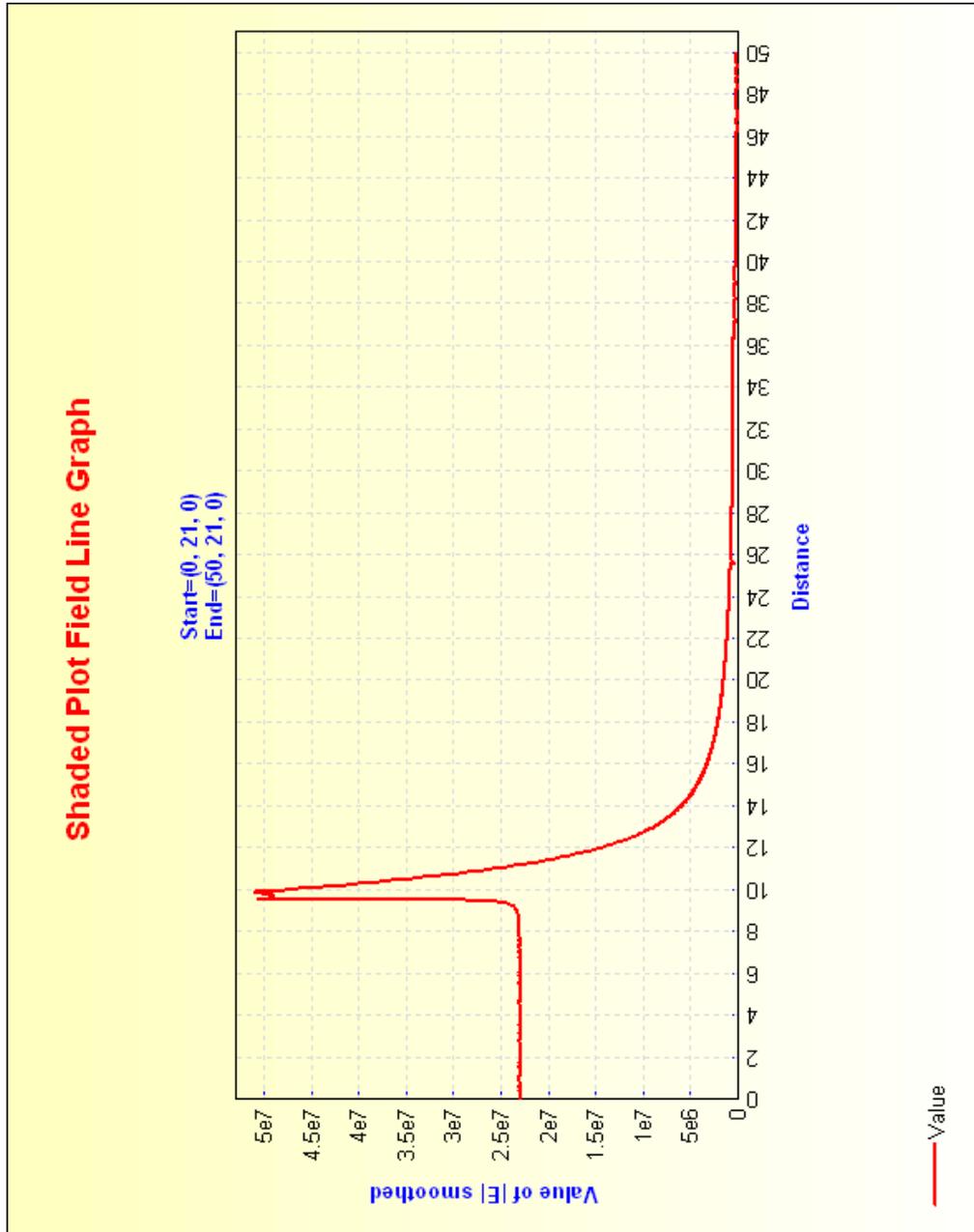


Abbildung 6.13: Verlauf der elektrischen Feldstärke im Zwickelbereich entlang der Transformerbordoberfläche

Die Simulation liefert für die Prüfanordnung eine Teilentladungseinsetzfeldstärke von $E_{TE} = 50\text{MV/m}$.

6.3.3 Teilentladungsfestigkeit des Prüfkessels

Für die Simulation des Kessels wurden folgende spezifische Materialparameter (50Hz, 20°C) verwendet:

Isolieröl:

- $\varepsilon_r = 2,2$
- $\mu_r = 1$
- $\sigma = 10^{-13}\text{S/m}$

Transformerboard:

- $\varepsilon_r = 4,4$
- $\mu_r = 1$
- $\sigma = 10^{-15}\text{S/m}$

PTFE (Teflon):

- $\varepsilon_r = 2$
- $\mu_r = 1$
- $\sigma = 10^{-16}\text{S/m}$

Mit 1mm Transformerboard-Scheibe

Die Simulation des Prüfkessels ergibt eine maximale Prüfwechselspannung (50Hz), unter der die zuvor ermittelte Teilentladungseinsetzfeldstärke in keinem Bereich überschritten wird, von 22kV(eff) (siehe Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15).

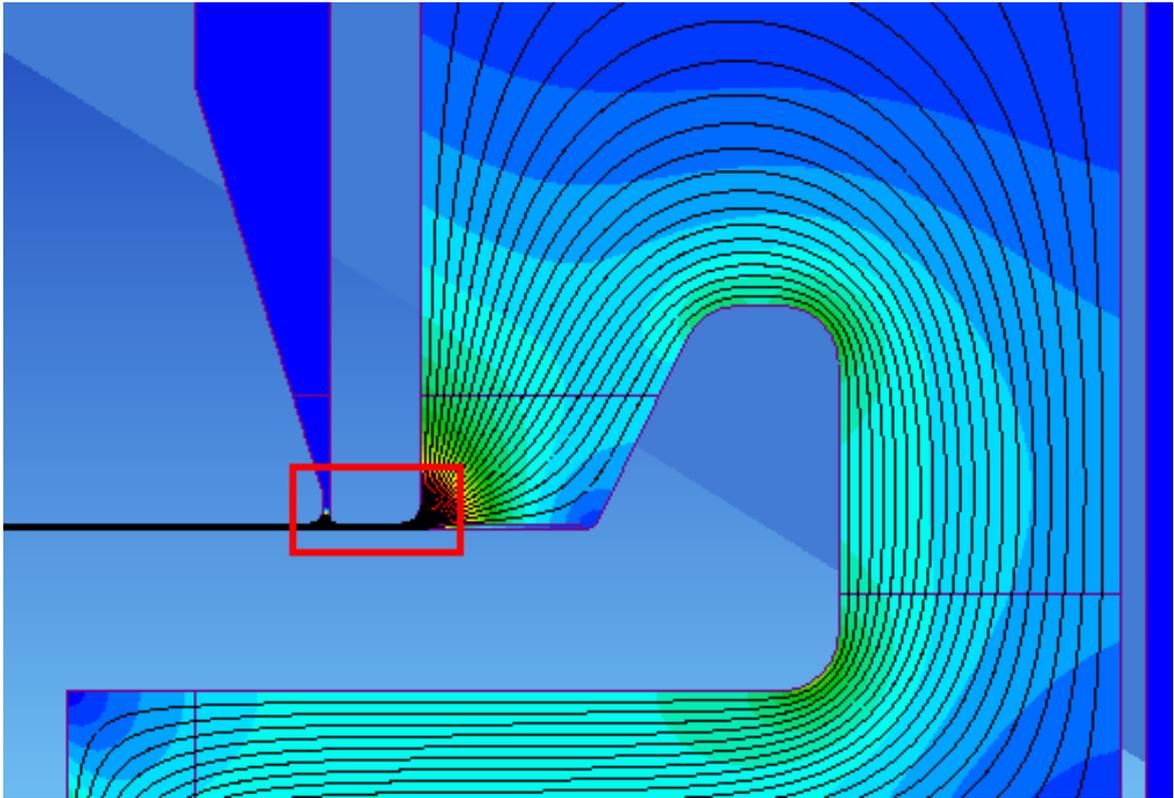


Abbildung 6.14: Ermittlung der maximalen Prüfwechselfeldstärke mittels Simulation (1mm Board)

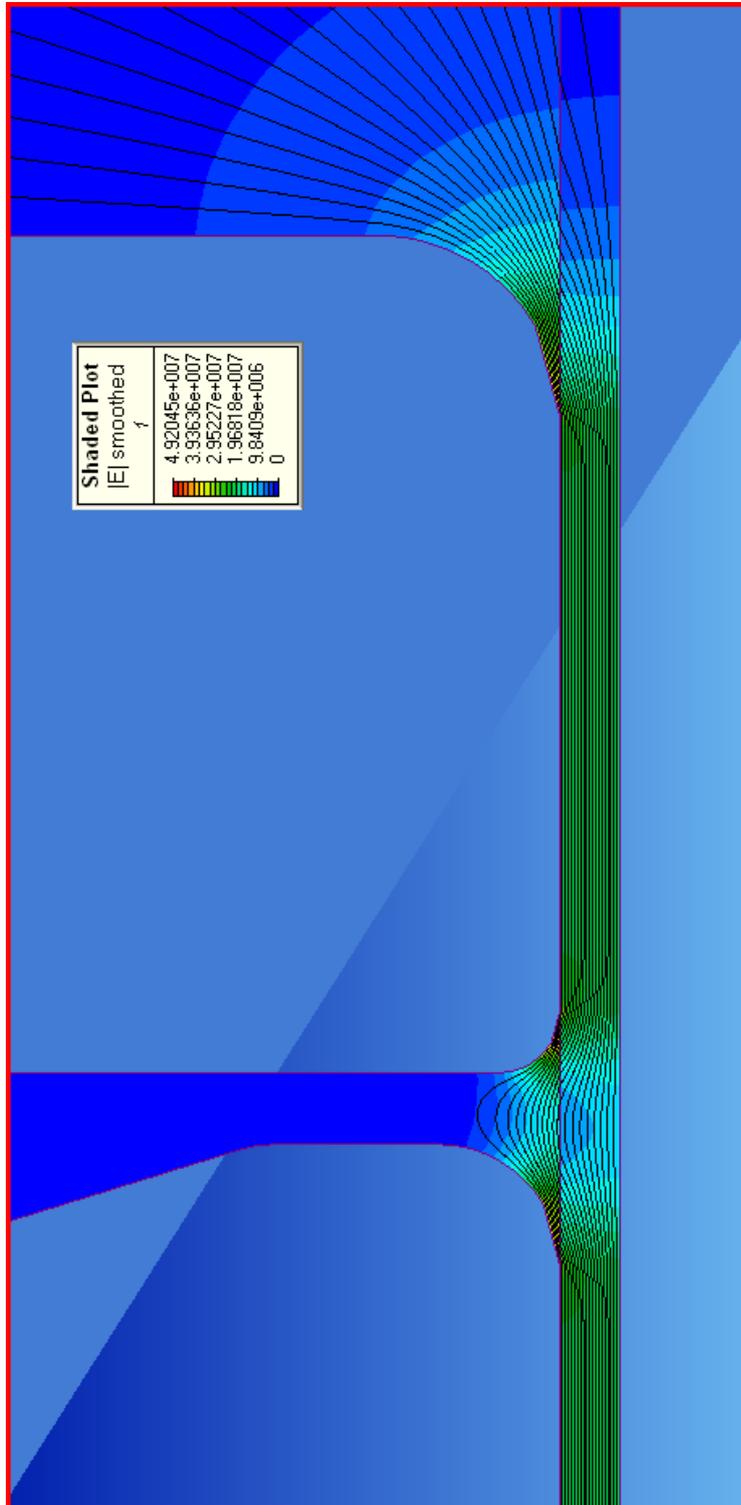


Abbildung 6.15: Zwickelbereich (1mm Board) bei einer Prüfspannung von 22kV(eff) und 50Hz

6.4 Konstruktion und Umsetzung

Da die Teilentladungseinsetzspannung für die Elektrodenanordnung nun durch die Simulation bestimmt wurde, kann die für den Kessel geeignete Hochspannungsdurchführung gewählt werden. Die TE-Einsetzspannung wurde bei Wechselspannungsbeanspruchung (50Hz) bestimmt und beträgt 22kV(eff). Für Gleichspannung bedeutet dies einen um den Faktor $\sqrt{2}$ höheren Wert der TE-Einsetzspannung, außerdem wird bei Gleichspannungsbeanspruchung infolge der resistiven Feldverteilung das elektrisch schwächere Öl entlastet, was ebenfalls zur Erhöhung der TE-Festigkeit der Anordnung führt (Kapitel 6.3.2).

In der Simulation wurde die Dicke der Probe zu einem Millimeter festgelegt, diese beträgt tatsächlich jedoch etwa zwei Millimeter. Bezüglich der elektrischen Beanspruchung erfasst die Simulation somit den ungünstigsten Fall.

6.4.1 Hochspannungsdurchführung

Gewählt wurde die SHV-20kV-Durchführung von VACOM² (Abbildung 6.16). Sie erfüllt die notwendigen Spezifikationen und ist für Gleichspannungen bis 20kV teilentladungsfrei. Weitere Informationen sind dem im Anhang beigefügtem Datenblatt zu entnehmen. Abbildung 6.17 zeigt, wie die Hochspannung mittels Durchführung in den Kessel eingeführt wird, sowie den Detailausschnitt für die Felddarstellung. In Abbildung 6.18 ist das Ergebnis der Felddarstellung ersichtlich. Die Anordnung wird dabei mit der Nennspannung von 20kV DC und zum Vergleich mit 20kV AC 50Hz beansprucht.



Abbildung 6.16: Hochspannungsdurchführung SHV-20kV von VACOM

²www.vacom.de

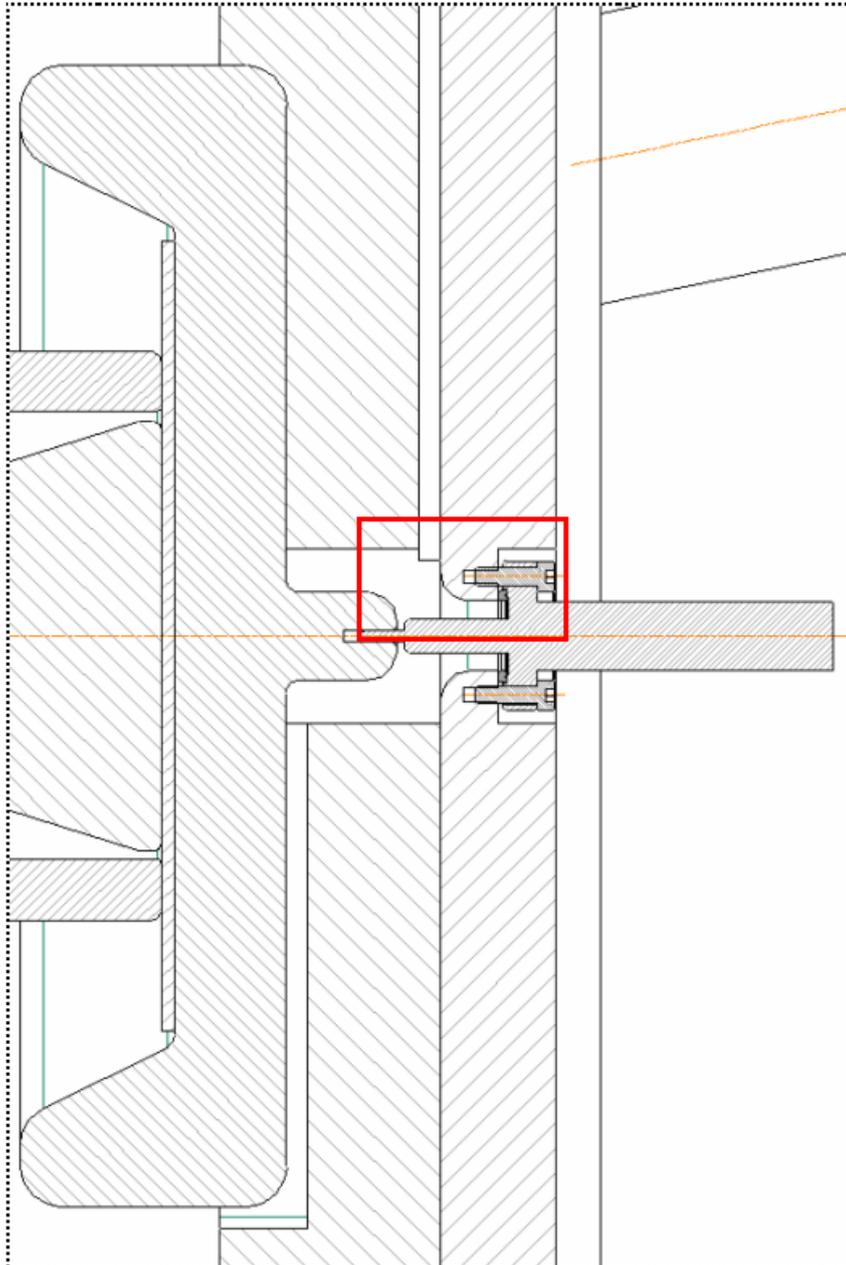


Abbildung 6.17: Einführung der Hochspannung in den Kessel

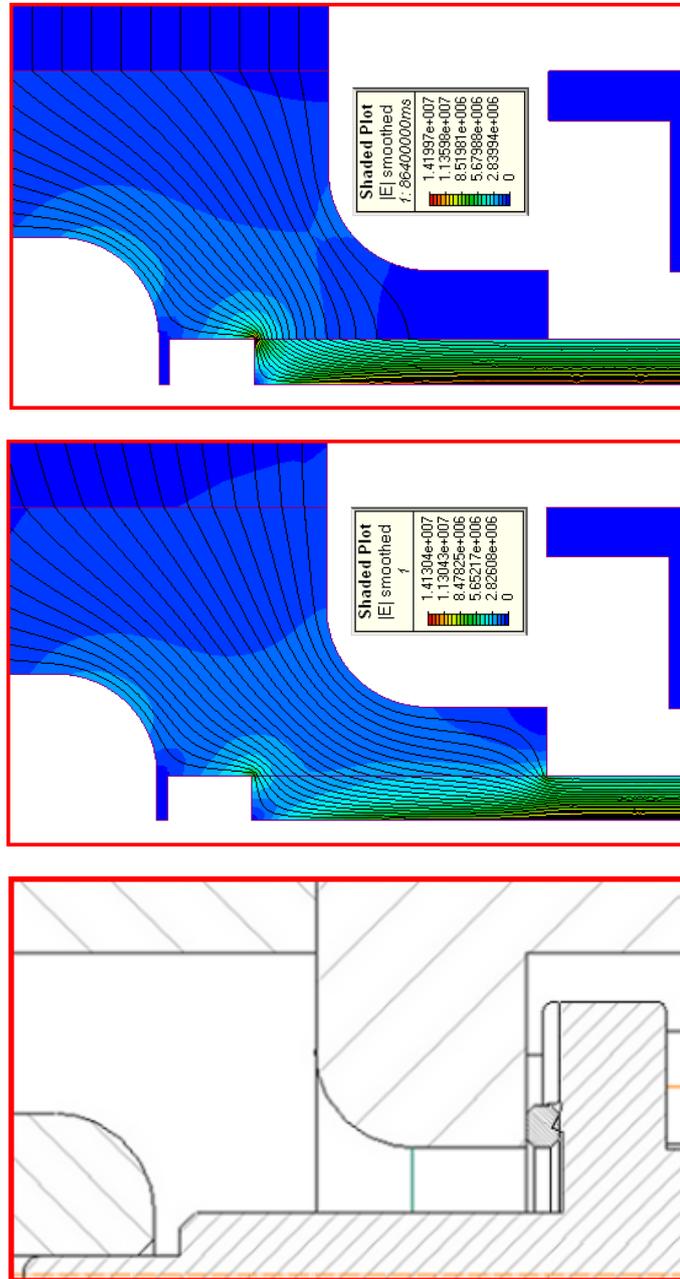


Abbildung 6.18: Elektrische Beanspruchung im Bereich der Hochspannungsdurchführung im Vergleich AC/DC

6.4.2 Konstruktion

Die Konstruktion des gesamten Prüfessels erfolgte mit Creo Elements/Direct Modeling, einem professionellen 3D-CAD-Werkzeug der Parametric Technology Corporation.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Kessel in der Planungsphase (Abbildungen 6.19, 6.20 und 6.21). Detailzeichnungen zur Fertigung aller Kesselkomponenten sind im Anhang enthalten.

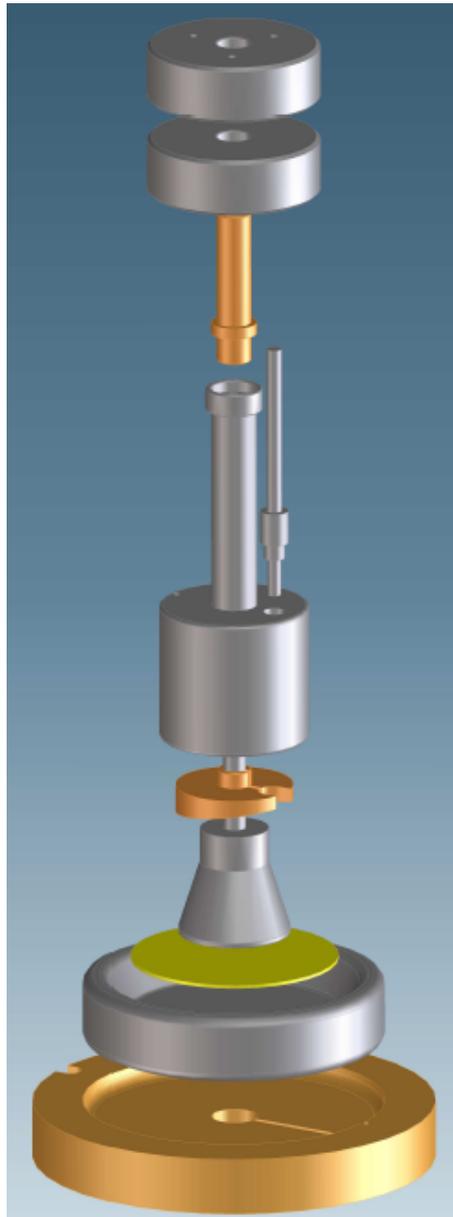


Abbildung 6.19: Elektrodenanordnung

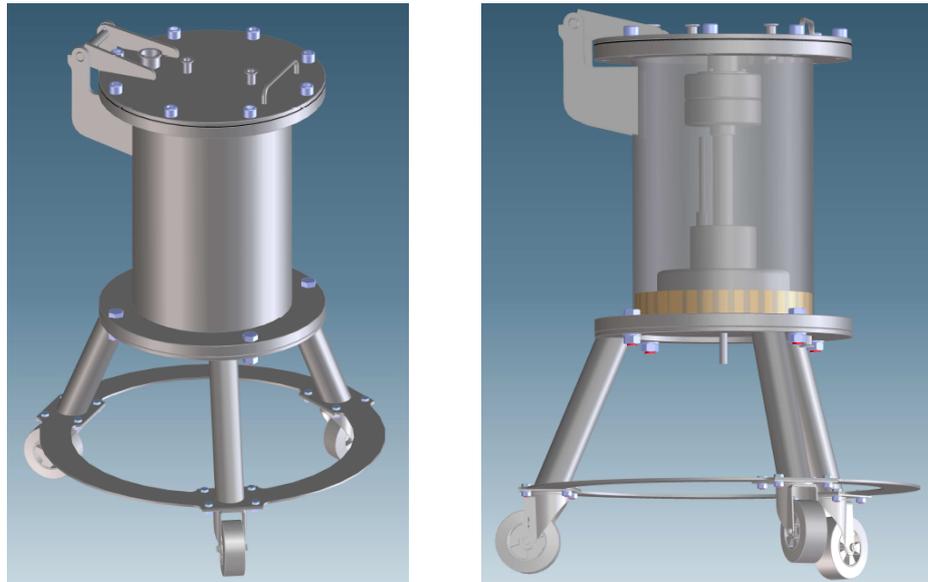


Abbildung 6.20: Prüfkessel geschlossen



Abbildung 6.21: Prüfkessel geöffnet

6.4.3 Zusammenbau

Abbildung 6.22 zeigt den Unterteil der Kesselkonstruktion mit Ölablassbohrung und bereits vormontierter Hochspannungsdurchführung. Die Abbildungen 6.23 und 6.24 zeigen die Spannungselektrodenaufnahme mit den Ölkanälen zur Umspülung der Hochspannungsdurchführung. In Abbildung 6.25 ist die als Wanne ausgeführte Spannungselektrode ersichtlich sowie die Kontaktierungsbohrung für die Hochspannungsdurchführung auf der Unterseite (Abbildung 6.26). Bevor das Kesselrohr mit dem Kesselunterteil verschweißt werden kann, muss die Spannungselektrode und deren Aufnahme zentriert und mit der Hochspannungsdurchführung ausgerichtet werden (Abbildung 6.27). Abbildung 6.28 zeigt das Kesselrohr, fertig verschweißt mit dem Unterteil und dem Deckelflansch. In Abbildung 6.29 dargestellt ist der Kesseldeckel mit den Anschlussöffnungen für die Kesselbe- und Entlüftung sowie den Mess- und Datenleitungen. Die Abbildung 6.30 zeigt die Einzelteile der Kesselscharniere und Abbildung 6.31 den fertig verschweißten Deckel. Die Abbildungen 6.32, 6.33 und 6.34 zeigen schließlich den fertigen Kessel nach der Korrosionsbehandlung.

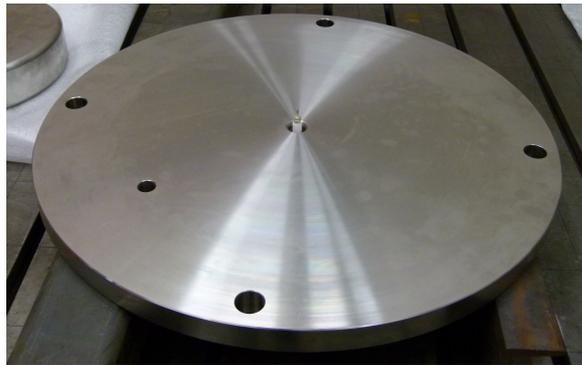


Abbildung 6.22: Kesselboden mit Hochspannungsdurchführung

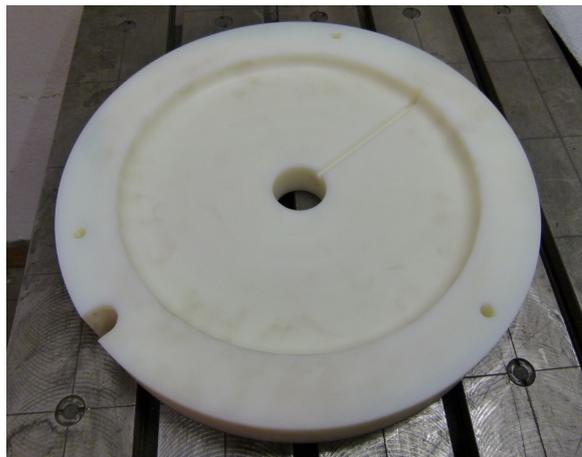


Abbildung 6.23: Spannungselektrodenaufnahme



Abbildung 6.24: Spannungselektrodenaufnahme von unten



Abbildung 6.25: Spannungselektrode



Abbildung 6.26: Kontaktierungsbohrung für die Hochspannungsdurchführung



Abbildung 6.27: Einrichten der Spannungselektrode



Abbildung 6.28: Kesselmantel fertig verschweißt

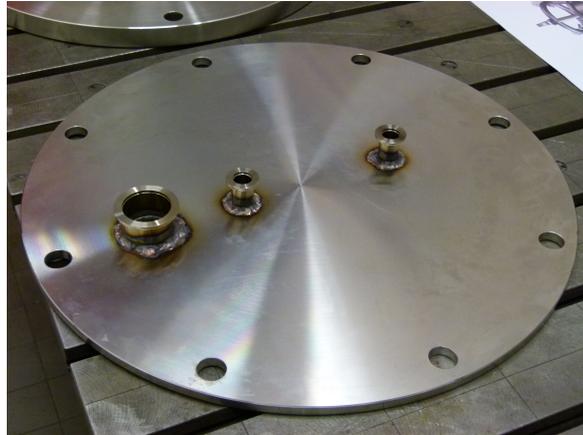


Abbildung 6.29: Kesseldeckel mit den Anschlußflanschen



Abbildung 6.30: Scharnierteile

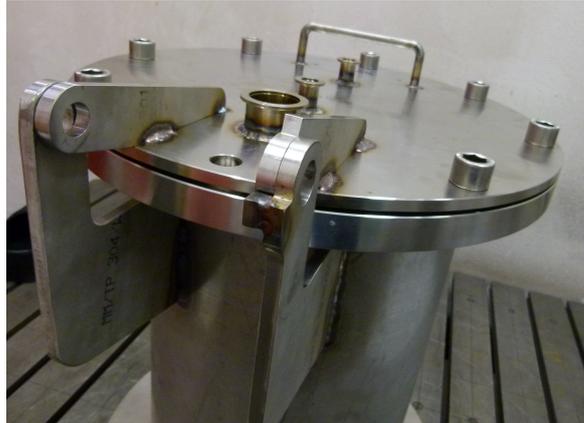


Abbildung 6.31: Deckel fertig verschweißt

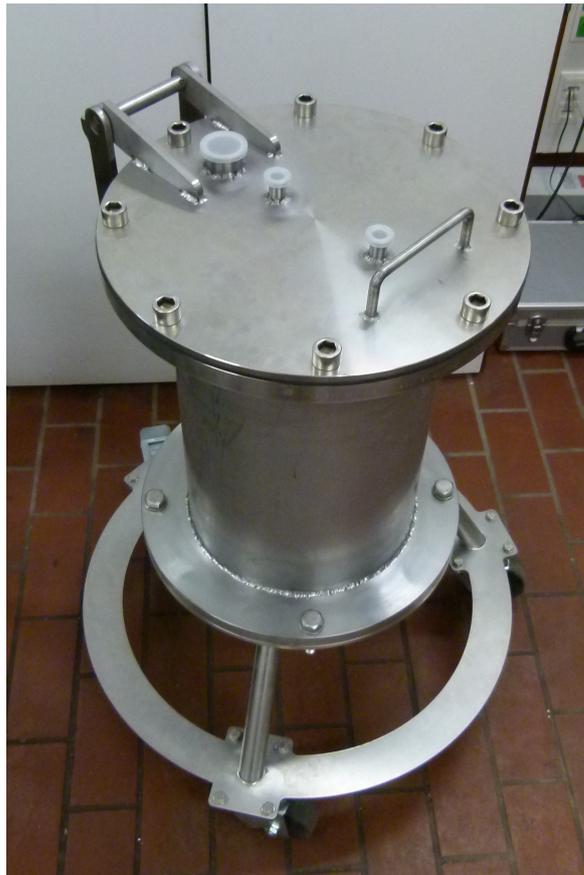


Abbildung 6.32: Kessel nach der Korrosionsbehandlung



Abbildung 6.33: Hochspannungsanschluss und Ölablasshahn



Abbildung 6.34: Einsatzbereiter Kessel

7 Kesselprüfung - Praktische Leitfähigkeitsmessung

Die Messung der Leitfähigkeit erfolgt indirekt über die Strommessung. Dabei wird der Polarisationsstrom oder Ladestrom bei Gleichspannungsbeanspruchung, sowie durch Kurzschluss des Prüflings nach erfolgter Aufladung, der Depolarisationsstrom oder Entladestrom erfasst. Diese Prozedur wird auch kurz als PDC-Messung (PDC - Polarization and Depolarization Current) bezeichnet. Das Zustandekommen des Polarisationsstromes infolge Leitungsmechanismen in den Medien Öl und Board wurde in Kapitel 4 bereits ausführlich dargelegt. Der Depolarisationsstrom resultiert aus der Rückumladung [7].

Die PDC-Messung beinhaltet die gesamte Information des Systems. Polarisations- als auch Depolarisationsstrom liefern Aussagen über den Zustand bzw. Eigenschaft der Isolierung. Durch Anwendung linearer Materialersatzschaltbilder ist es möglich, charakteristische Materialeigenschaften zu bestimmten Messzeitpunkten heraus zu kristallisieren, da die Ströme bei unterschiedlichen Messzeitpunkten von unterschiedlichen Ersatzschaltelementen beeinflusst werden. Abbildung 7.1 zeigt dazu das Materialersatzschaltbild einer Öl-Board-Isolation und die Differenzierung der entsprechenden charakteristischen Materialeigenschaften [16].

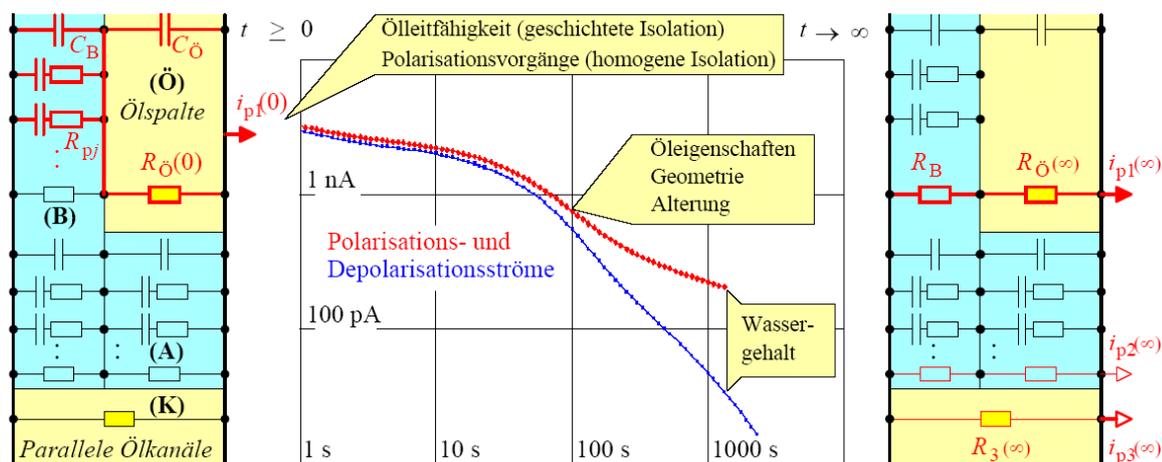


Abbildung 7.1: Materialersatzschaltbild einer Öl-Board-Isolation mit Differenzierung der charakteristischen Materialeigenschaften, aus [16]

Im Ersatzschaltbild dargestellt sind die unterschiedlichen Komponenten wie Ölspalte (Ö), Board (B), Abstützungen (A) sowie Ölkanäle (K). Die RC-Glieder repräsentieren dabei Polarisationsmechanismen. Der Anfangsstrom wird wesentlich durch Polarisationserscheinungen im Board und dessen Kapazität sowie durch die Ölleitfähigkeit bestimmt. Hohe Anfangsströme lassen beispielsweise Rückschlüsse auf schlechte Isolationswiderstände bzw. hohe Anfangsleitfähigkeiten des Öles zu. Der Endwert gibt Aufschluss über die Gleichstromleitfähigkeit und die Differenz zwischen Polarisations- und Depolarisationsstrom über den Feuchtegehalt [7], [14], [16].

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Zeit $\sigma(t)$ lässt sich mittels den gemessenen Polarisations- bzw. Depolarisationsströmen $i(t)$ nach Gleichung 7.1 errechnen. Dabei ist U_P die Prüfspannung, d die Dicke der Probe und A die Bezugsfläche, die durch die Elektrodengeometrie festgelegt wird (siehe dazu Tabelle 6.1, Seite 25). Sie errechnet sich nach Gleichung 7.2 und wird durch den Innendurchmesser des Schutzringes d_{iS} bestimmt.

$$\sigma(t) = \frac{i(t) \cdot d}{U_P \cdot A} \quad (7.1)$$

$$A = \frac{d_{iS}^2 \cdot \pi}{4} \quad (7.2)$$

7.1 Messaufbau

Abbildung 7.2 zeigt schematisch den verwendeten Mess- und Prüfaufbau zur Leitfähigkeitsmessung. Neben der Strommessung sind auch alle weiteren Messgeräte, die dem Monitoring der zu untersuchenden Einflussparameter (elektrische Feldstärke, Feuchtigkeit und Temperatur) dienen, dargestellt. Die Schutzbeschaltung soll Beschädigungen des sensiblen Elektrometers infolge eines Durchschlages vermeiden.

7.2 Proben

Die praktischen Untersuchungen der Einflussparameter Feldstärke, Feuchte und Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit erfolgte am Transformerboard T I (kalandriert).

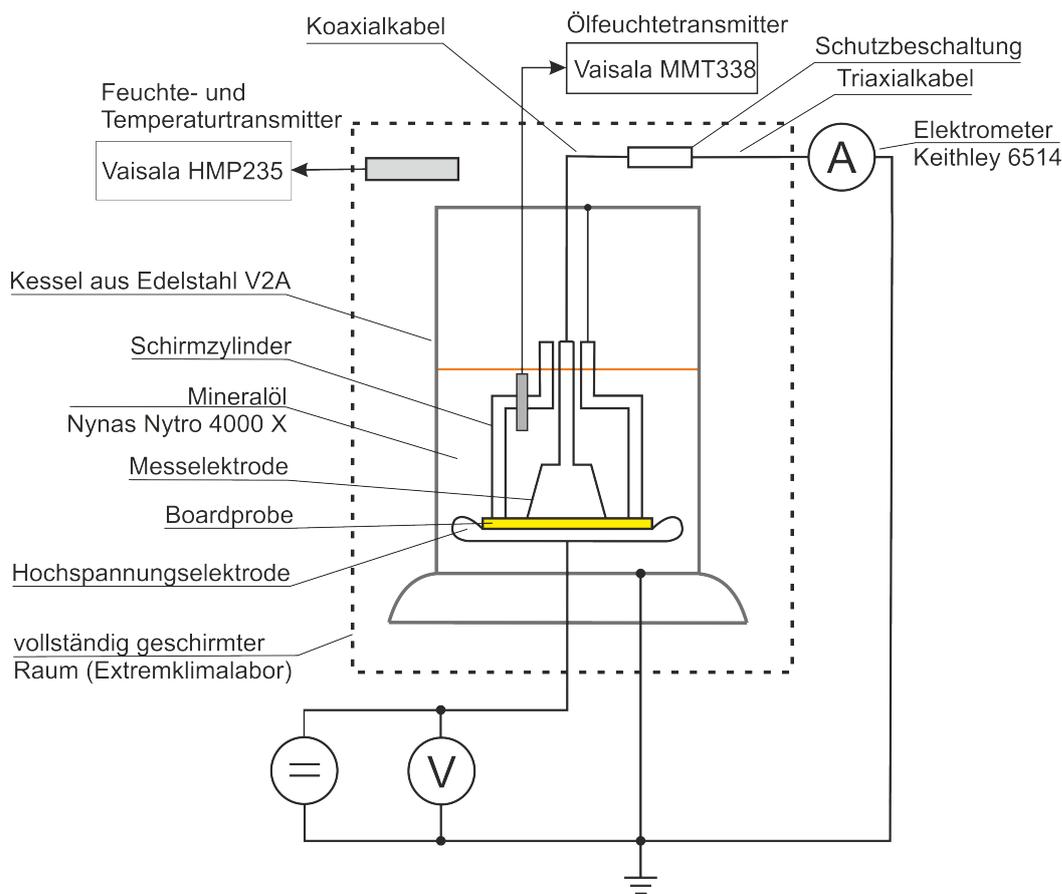


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung des Mess- und Prüfaufbaus, aus [3]

Die Anwendungsbereiche von Transformerboard T I erstrecken sich von Formteilen wie z.B. Zylinder, über Stanzteile bis hin zu gepresste Teile für Verteil- und Leistungstransformatoren. Die Herstellung von Transformerboard T I erfolgt im Werk Rapperswil/Schweiz nach IEC-Norm 60641-3-1, Typ B 2.1. Der Dichtebereich erstreckt sich von $1,0\text{g/cm}^3$ bis $1,2\text{g/cm}^3$ und wird in Dicken von $0,5\text{mm}$ bis 3mm erzeugt [9], [18]. Weitere Informationen sind dem technischen Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Bei den Untersuchungen wurden stets neuwertige Proben verwendet. Infolge der verhältnismäßig geringen Belastung sowie der kurzen Beanspruchungsdauer konnten signifikante Alterungsprozesse ausgeschlossen werden [3].

7.3 Messvorbereitung

Während sich die Durchführung der Messungen bei unterschiedlichen elektrischen Feldstärken sowie unterschiedlichen Temperaturen als unproblematisch darstellt, ge-

staltet sich die Umsetzung der Leitfähigkeitsmessung an unterschiedlich befeuchteten Proben schwierig.

Bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit von befeuchtetem Board ergibt sich infolge der temperaturabhängigen Feuchtigkeits-Gleichgewichtskurven von Öl-Board (siehe Abbildung 7.3) das Problem, dass der definierte Feuchtigkeitsgrad des Faserstoffes über die Messdauer (48h Langzeitmessung) infolge des Feuchtigkeitsaustausches zwischen Öl und Board nicht zu halten ist. Je nach Temperatur stellt sich ein Gleichgewichtspunkt zwischen Feuchte im Öl sowie Feuchte im Board ein. Die Temperatur kann über die Messdauer als konstant angesehen werden.

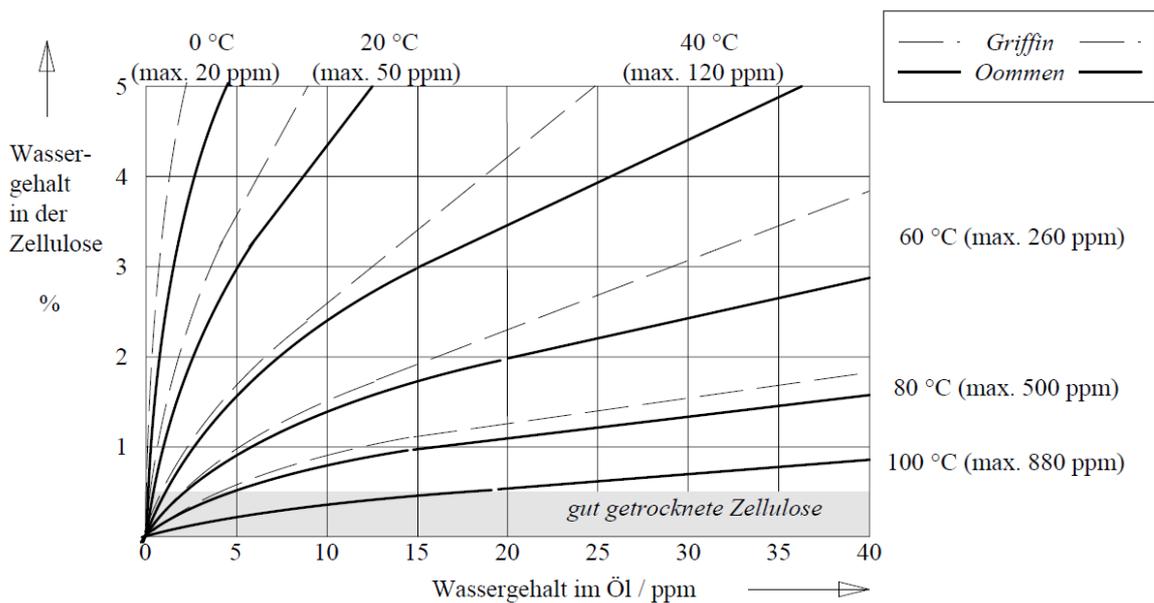


Abbildung 7.3: Feuchtigkeitsgleichgewichtskurven Öl-Board; der Wert in den Klammern entspricht der Wassersättigungskonzentration in Öl für die jeweilige Temperatur, nach [7]

Das zu einem bestimmten Grad angefeuchtete Board soll für die korrekte Durchführung der Langzeitmessung auch nach dem Eintauchen in das Isolieröl und darüber hinaus über die gesamte Messdauer diesen Zustand der Befeuchtung bewahren. Es darf also unter keinen Bedingungen ein Feuchtigkeitsaustausch zwischen Öl und Board stattfinden. Um dies zu garantieren, soll das Öl bereits gesättigt sein, das heißt, es kann kein weiteres Wasser mehr aufnehmen. Ist dies der Fall, kann eine konstante Feuchte im Board angenommen werden. Abhängig von der Prüftemperatur muss dieser Öl-Feuchte-Sättigungsgrad ermittelt werden.

Die Wassermenge, die Öl im Stande ist zu absorbieren, hängt neben den spezifischen Öleigenschaften im Wesentlichen von der Temperatur und dem Alterungszustand des Öles ab (Abbildung 7.4 soll als Beispiel für ein Mineralöl dienen). Prinzipiell nimmt die

Wasserlöslichkeit des Öles mit der Temperatur zu. Bei Erreichung der maximalen Wasserkonzentration c_{max} ist das Öl gesättigt. Unterhalb dieser Sättigungskonzentration liegt das Wasser im gelösten Zustand vor, während es oberhalb dieser Sättigungskonzentration auch ungelöst in Form von Tröpfchen auftritt. Die Konzentration des Wassers im Öl errechnet sich zu [17]:

$$c = \frac{m_{H_2O}}{m_{Oel}}. \quad (7.3)$$

Dabei ist m_{H_2O} die Masse des im Öl vorhandenen Wassers und m_{Oel} die Masse des getrockneten Öles. Das Verhältnis wird typischerweise in ppm oder $\mu\text{g/g}$ angegeben.

Die Wassersättigungskonzentration c_{max} in Öl, als Funktion der Öltemperatur T_{Oel} , lässt sich durch Gleichung 7.4 bestimmen, wobei die Konstanten A und B von verschiedenen Autoren leicht differenzierend angegeben werden (siehe Tabelle 7.1) [17].

$$\log(c_{max}) = A - \frac{B}{T_{Oel}} \quad (7.4)$$

Tabelle 7.1: Konstanten A und B, aus [17]

	Oommen	Griffin	Shell
A	7,42	7,09	7,30
B	1670	1567	1630

Es sei jedoch daran erinnert, dass die Anwendung dieser Feuchtigkeits-Gleichgewichtskurven einen Gleichgewichtszustand voraussetzen. Durch die Abhängigkeit der Gleichgewichtsprozesse von den Parametern Temperatur, Feuchte sowie Dicke und Alterungszustand des Boards, sind zur Einstellung dieses Zustandes in der Regel lange Zeiträume erforderlich. Praktische Erfahrungen an Transformatoren zeigen einen notwendigen, möglichst gleichmäßig ausgelasteten Betrieb über einige Wochen [7], [19].

Die Befeuchtung der Proben erfolgte nach einer Trocknungsdauer von 24 Stunden im Trockenschrank bei einer konstanten Temperatur von 105°C , im Klimaschrank bei definierter Temperatur (30°C) und Luftfeuchte ($30\%\text{rH}$). Durch Vergleich der zuvor ermittelten Board-Trockenmasse mit dem Massezuwachs infolge der Befeuchtung, konnte die Dauer im Klimaschrank bis zum Erreichen der gewünschten Befeuchtung ermittelt werden. Um den Grad der Verfeuchtung während der Messung zu garantieren, wurden die Proben nach durchgeführter Messung mittels Karl Fischer Titration

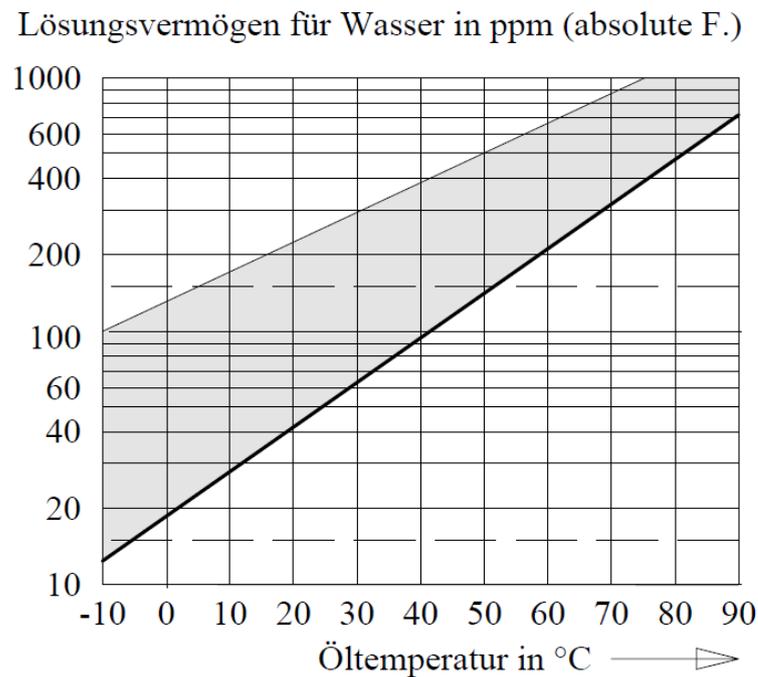


Abbildung 7.4: Sättigungsfeuchte eines Mineralöls in Abhängigkeit der Öltemperatur; etwa 10% Aromatengehalt (untere Kurve) und für Aromate (obere Kurve), aus [7]

auf deren Feuchtegehalt vermessen. Nur bei den auf 5% befeuchteten Proben konnte eine Austrocknung am Rand nachgewiesen werden, wobei die Board-Feuchte in den Bereichen unterhalb der Elektroden erhalten blieb [3].

7.4 Messergebnisse

Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten erfolgt mit Matlab. Die Messdatenreihe wird zunächst mit einem Matlab-Programm eingelesen und Messausreißer ausselektiert. Anschließend wird die Datenreihe in Polarisations- und Depolarisationsphase unterteilt. Dies ist erforderlich, um die Daten der Polarisation sowie der Depolarisation im Grafen auf gleicher Zeitachse darstellen zu können. Mittels den Polarisations- bzw. Depolarisationsströmen werden schließlich die Leitwerte für die Polarisations- sowie Depolarisationsphase errechnet und in einem Grafen ausgegeben. Zur Auswertung jeder Messung werden die Messdaten Strom, Luftfeuchte, Lufttemperatur, AW-Wert, Öltemperatur, Ölfeuchte sowie die errechneten Werte der Leitfähigkeit und Ladung für die Zeitpunkte 0 Sekunden, 1 Sekunde, 1 Minute, 5 Minuten, 1 Stunde, 3 Stunden, 12 Stunden und 24 Stunden, jeweils getrennt für Polarisations- und Depolarisationsphase, in ein Excel-File geschrieben. Außerdem werden der Widerstand und die Differenzla-

dung errechnet und ebenfalls für die Auswertung im Excel-File bereitgestellt. Das Programm ermöglicht zudem verschieden Messdatenreihen, durch die Darstellung in einem gemeinsamen Grafen, mit einander zu vergleichen [3].

Beim Abschalten der Hochspannung nach der Polarisationsphase muss beachtet werden, dass die Hochspannungsquelle nicht sofort entladen ist und daher der Depolarisationsstrom für eine Dauer von etwa 30 Sekunden betragsmäßig über dem Polarisationsstrom liegt. Sprünge im Betragsverlauf des Depolarisationsstromes sind durch eine Messbereichsumschaltung am Elektrometer erklärbar.

Für die Auswertung wurden die Messdaten aus [3] herangezogen. Als Vergleich zur Interpretation der Messergebnisse soll an dieser Stelle ebenfalls auf [3] verwiesen werden.

7.4.1 Einfluss der elektrischen Feldstärke

Die folgenden Abbildungen zeigen den Einfluss der elektrischen Feldstärke bei konstanter Öltemperatur. Die Abbildung 7.5 zeigt die Auswertung bei 25°C, Abbildung 7.6 bei 60°C und die Abbildung 7.7 bei 90°C.

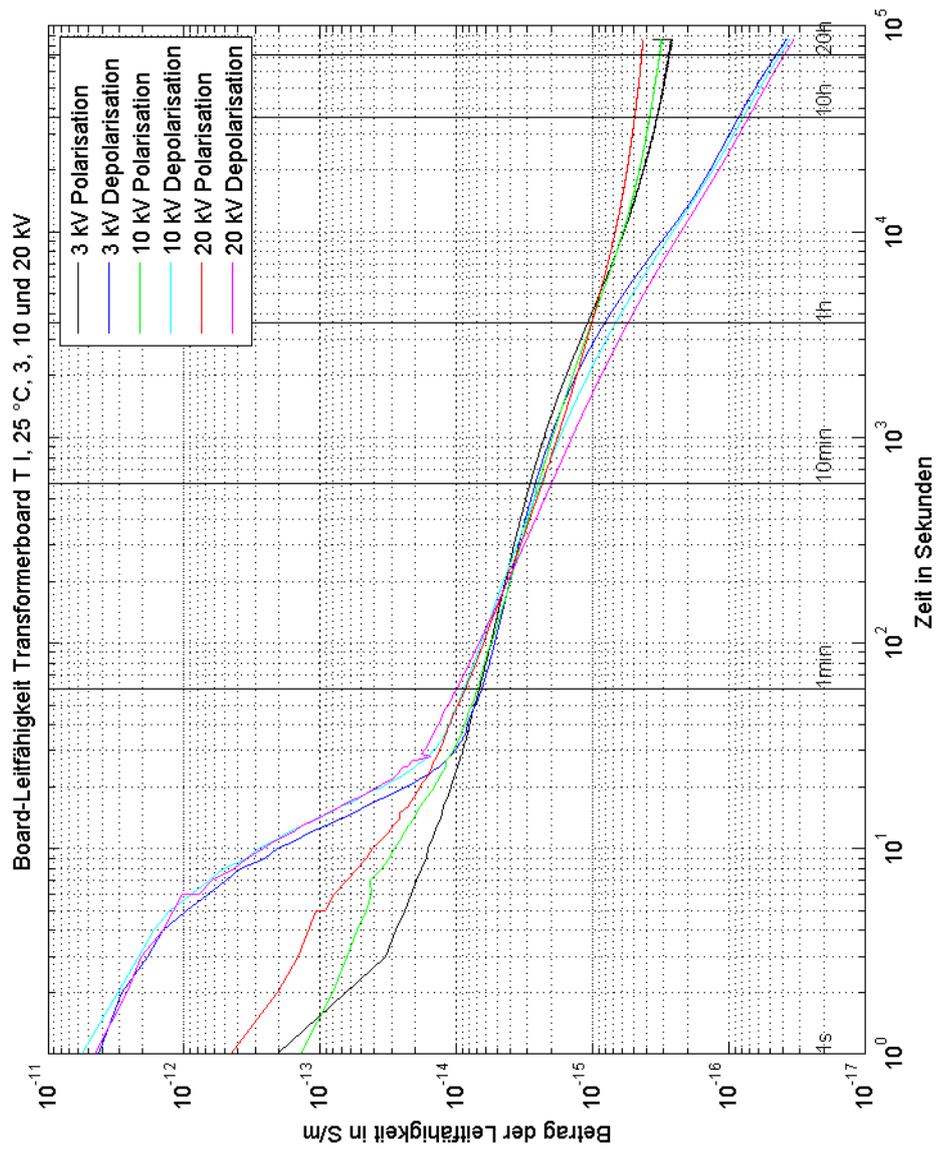


Abbildung 7.5: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 25°C, 3, 10 und 20kV

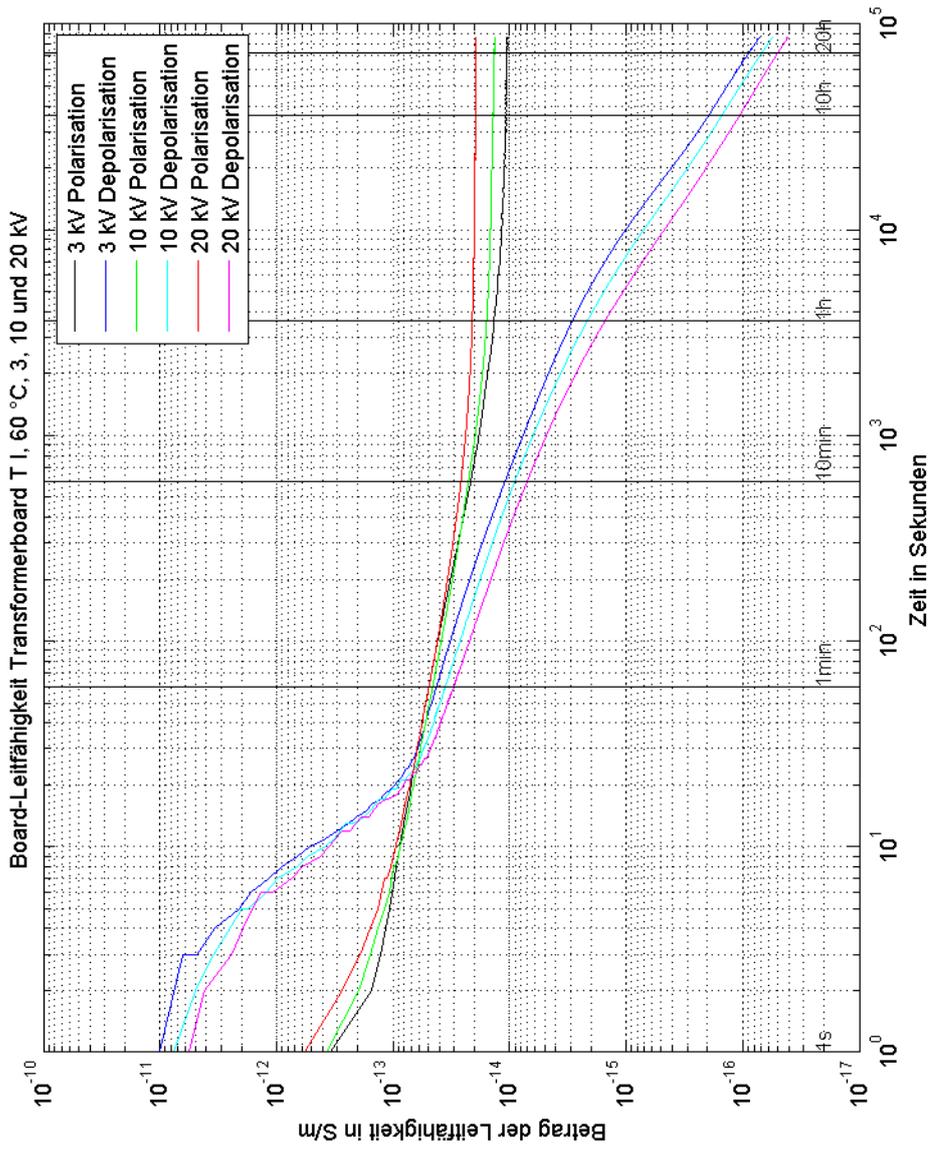


Abbildung 7.6: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 60°C, 3, 10 und 20kV

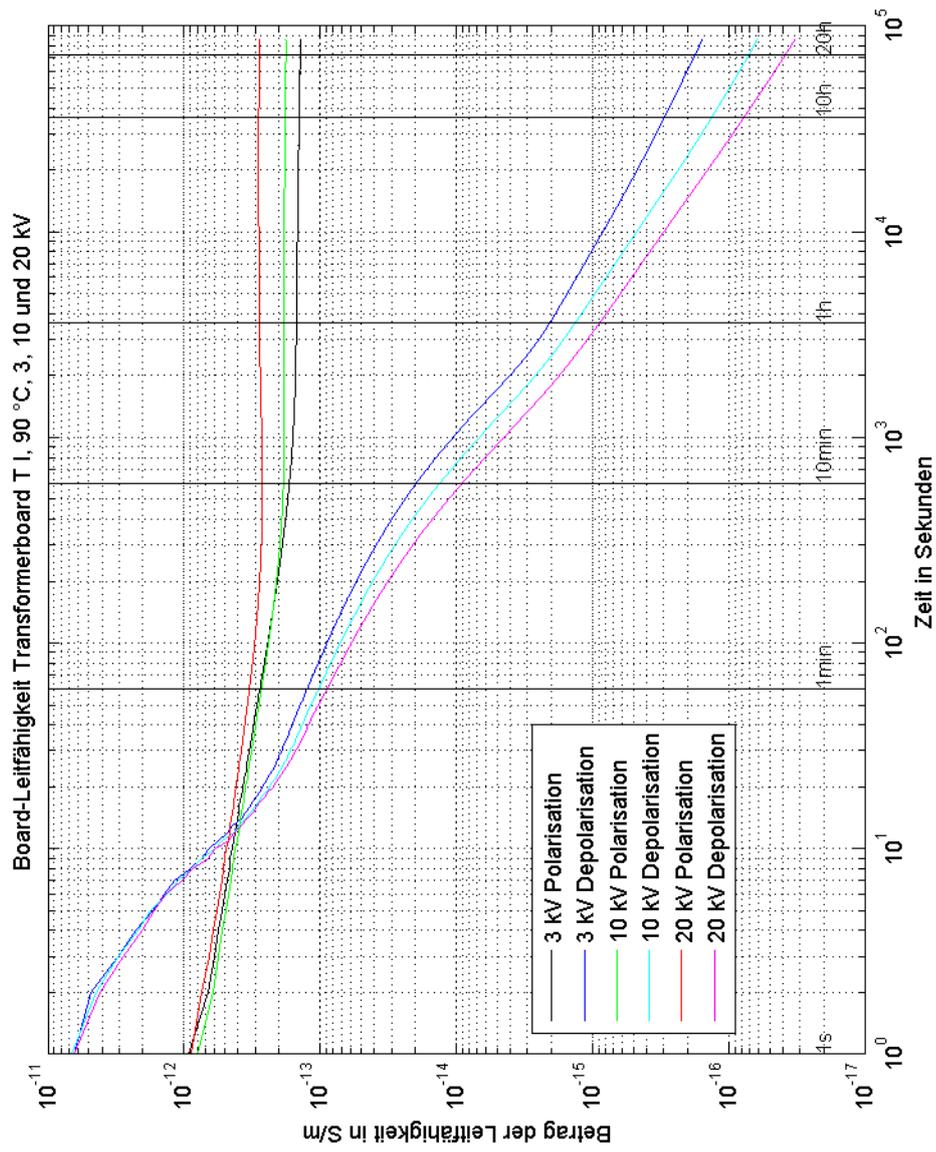


Abbildung 7.7: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 90°C, 3, 10 und 20kV

7.4.2 Einfluss der Feuchte

Die Auswertungen zeigen jeweils den Einfluss der Feuchte auf die Leitfähigkeit bei konstanter Feldstärke und konstanter Öltemperatur. Abbildung 7.8 und 7.9 die Auswertung bei 1kV und 25°C bzw. 1kV und 60°C, Abbildungen 7.10 und 7.11 bei 20kV und 25°C bzw. 20kV und 60°C.

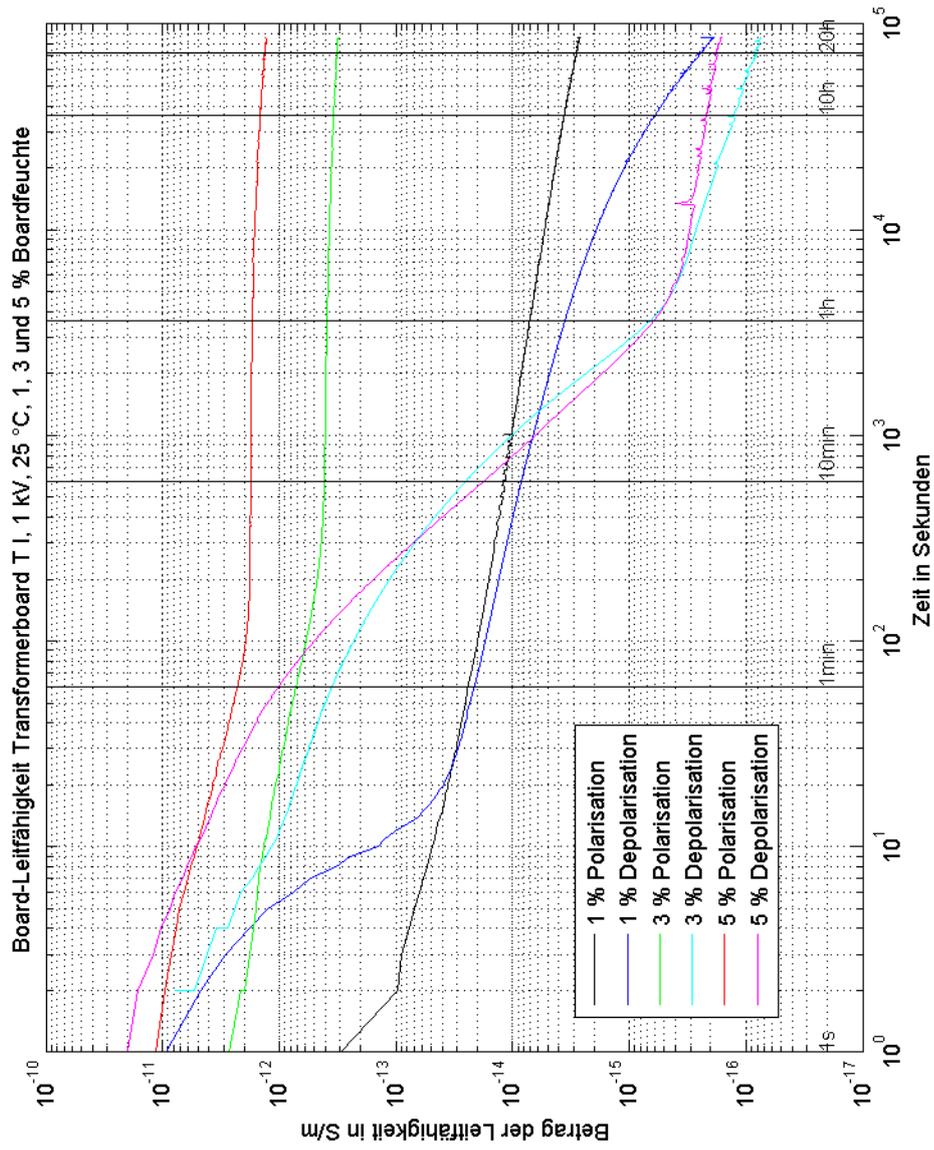


Abbildung 7.8: Board-Leitfähigkeit Transformatorboard T I, 1kV, 25°C, 1, 3 und 5% Boardfeuchte

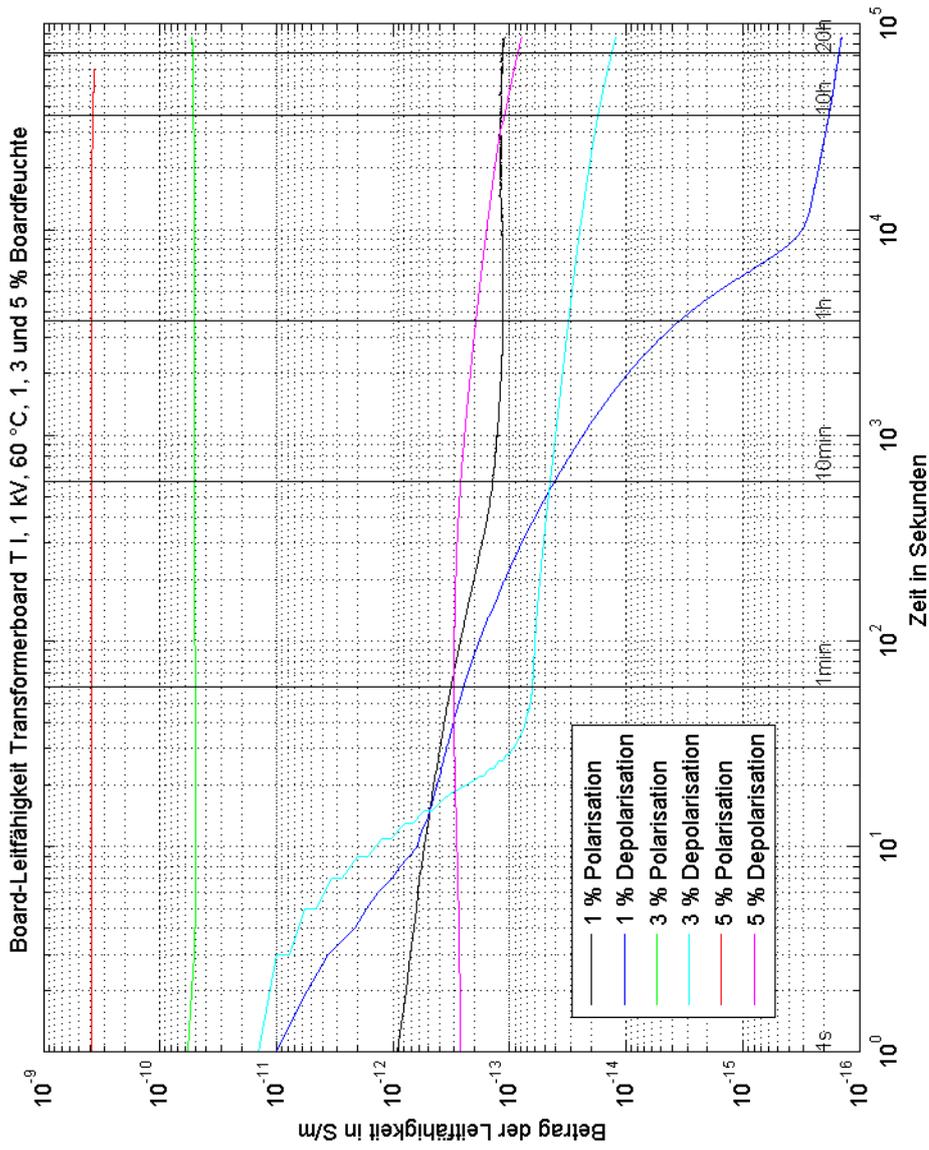


Abbildung 7.9: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 1kV, 60°C, 1, 3 und 5% Boardfeuchte

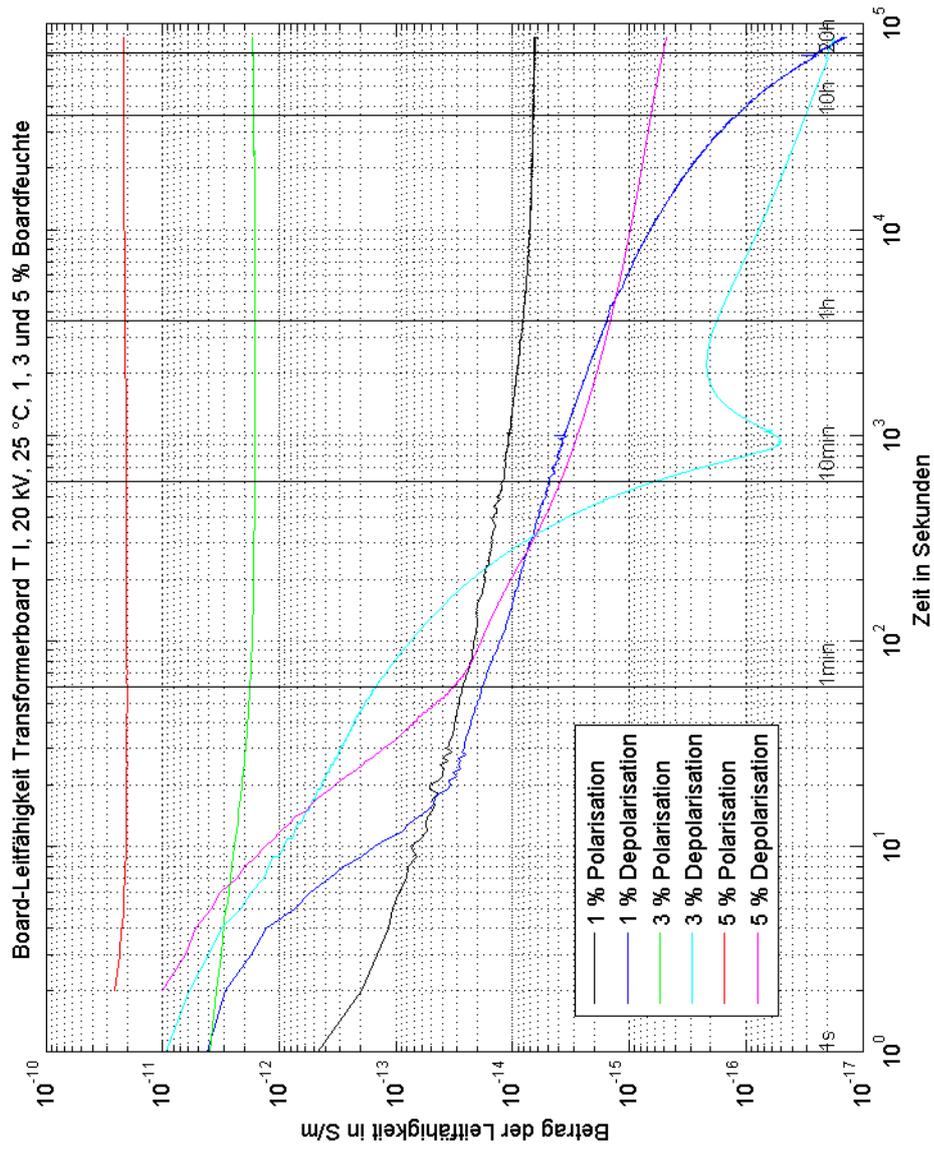


Abbildung 7.10: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 20kV, 25°C, 1, 3 und 5% Boardfeuchte

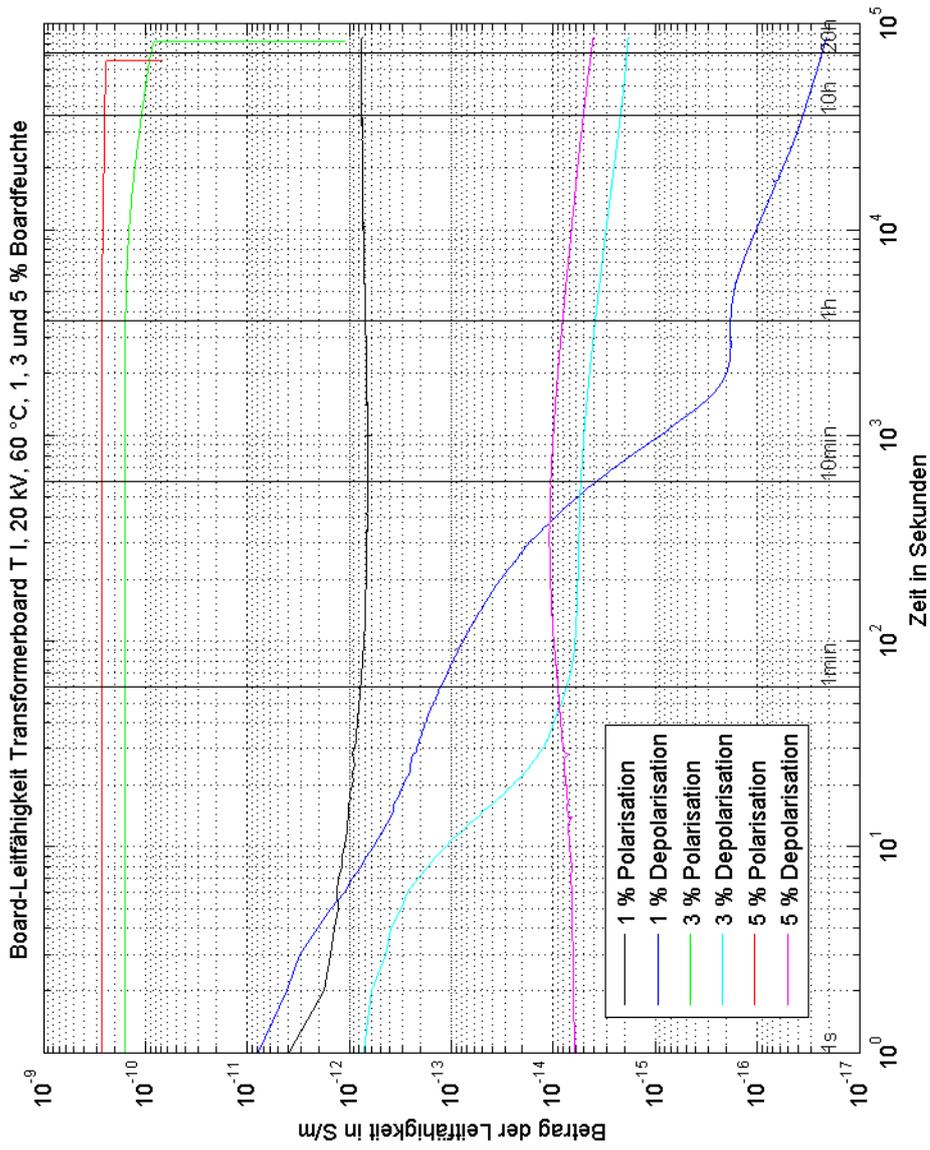


Abbildung 7.11: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 20kV, 60°C, 1, 3 und 5% Boardfeuchte

7.4.3 Einfluss der Temperatur

Die nachfolgenden Auswertungen zeigen den Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit bei konstanter Feldstärke. Abbildung 7.12 bei 1kV, Abbildung 7.13 bei 3kV, Abbildung 7.14 bei 10kV und Abbildung 7.15 bei 20kV.

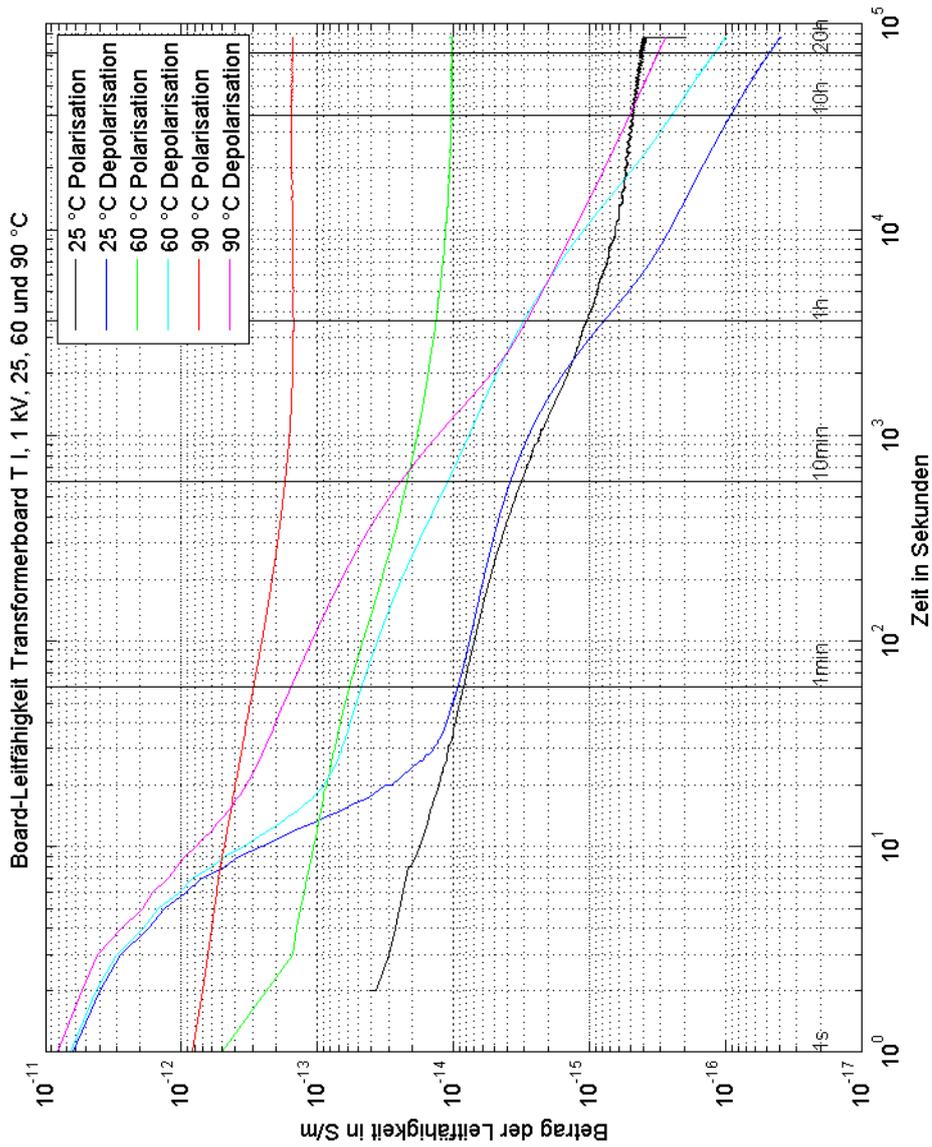


Abbildung 7.12: Board-Leitfähigkeit Transformierboard T I, 1kV, 25, 60 und 90 °C

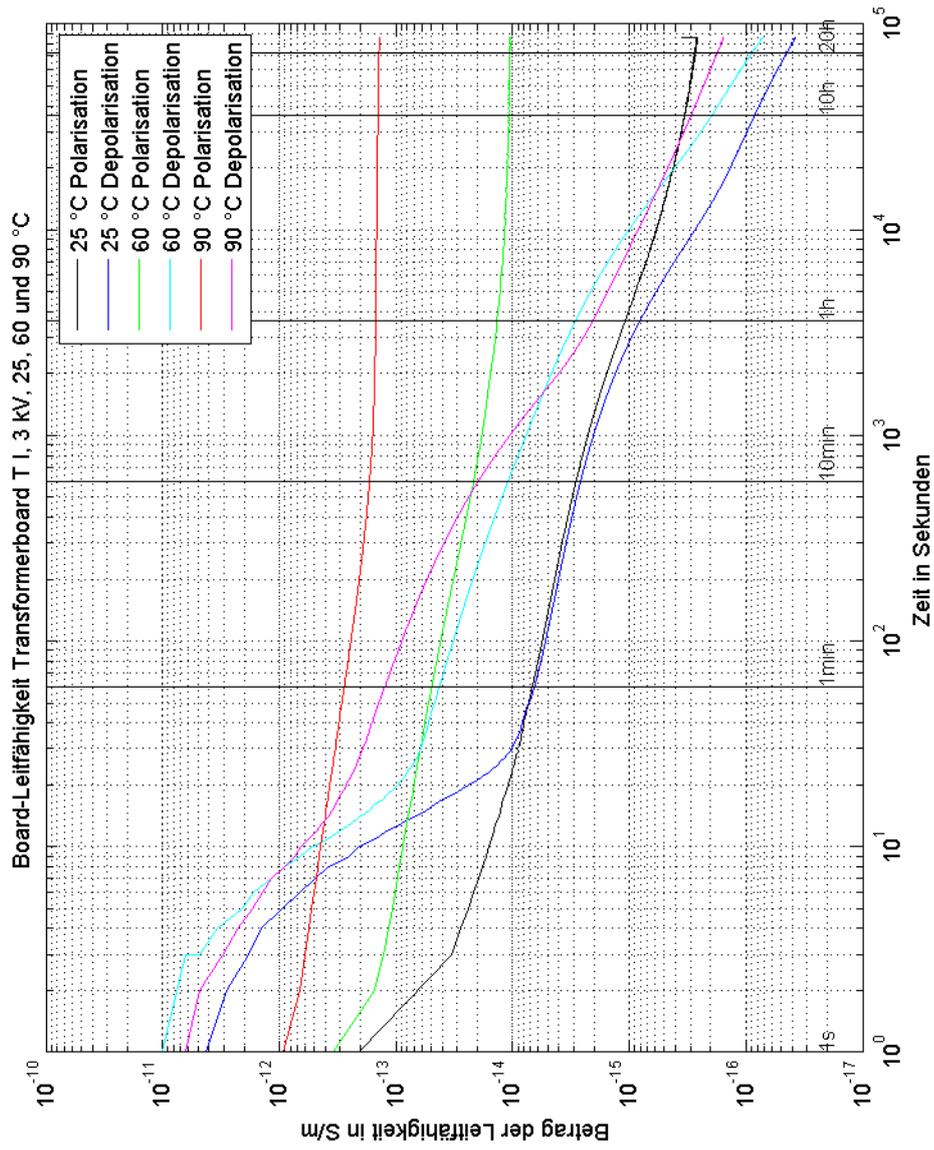


Abbildung 7.13: Board-Leitfähigkeit Transformierboard T I, 3kV, 25, 60 und 90°C

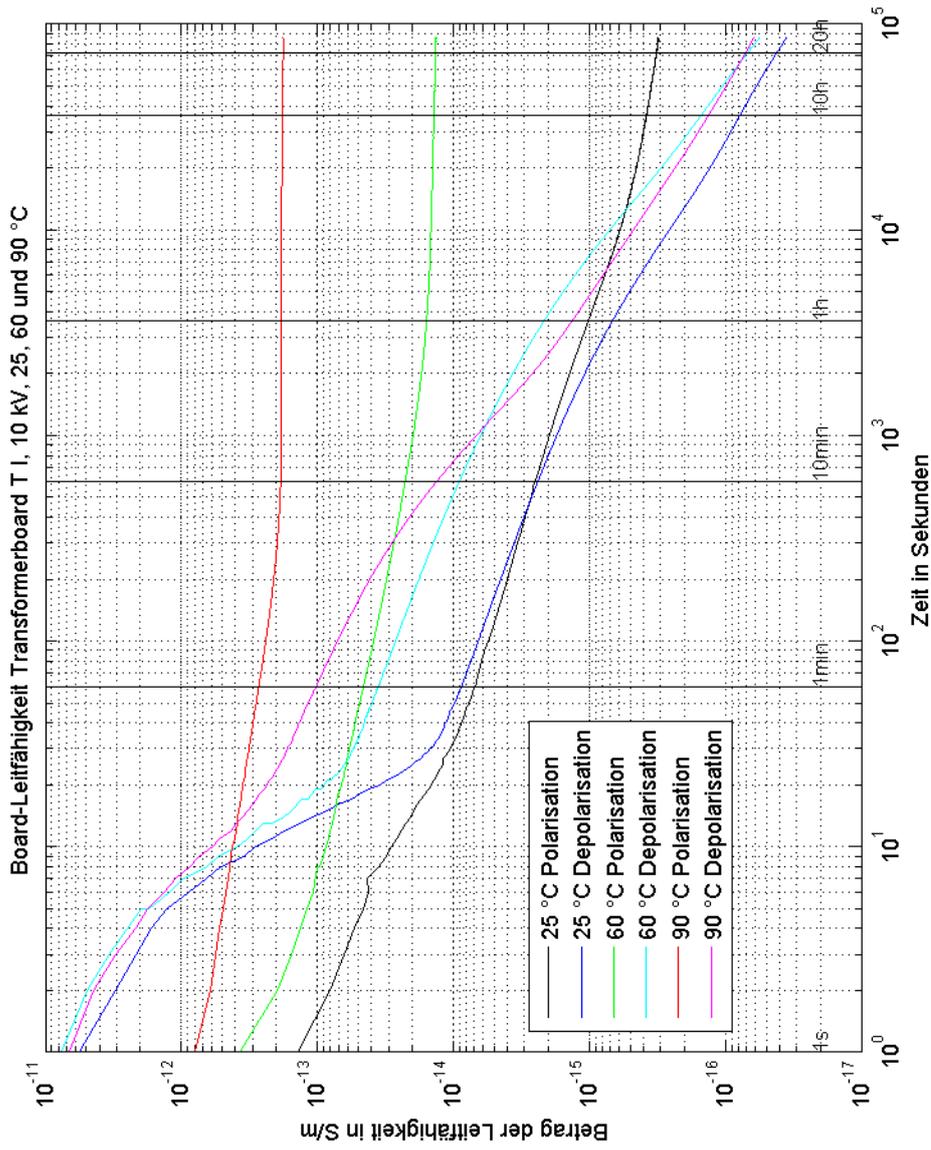


Abbildung 7.14: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 10kV, 25, 60 und 90 °C

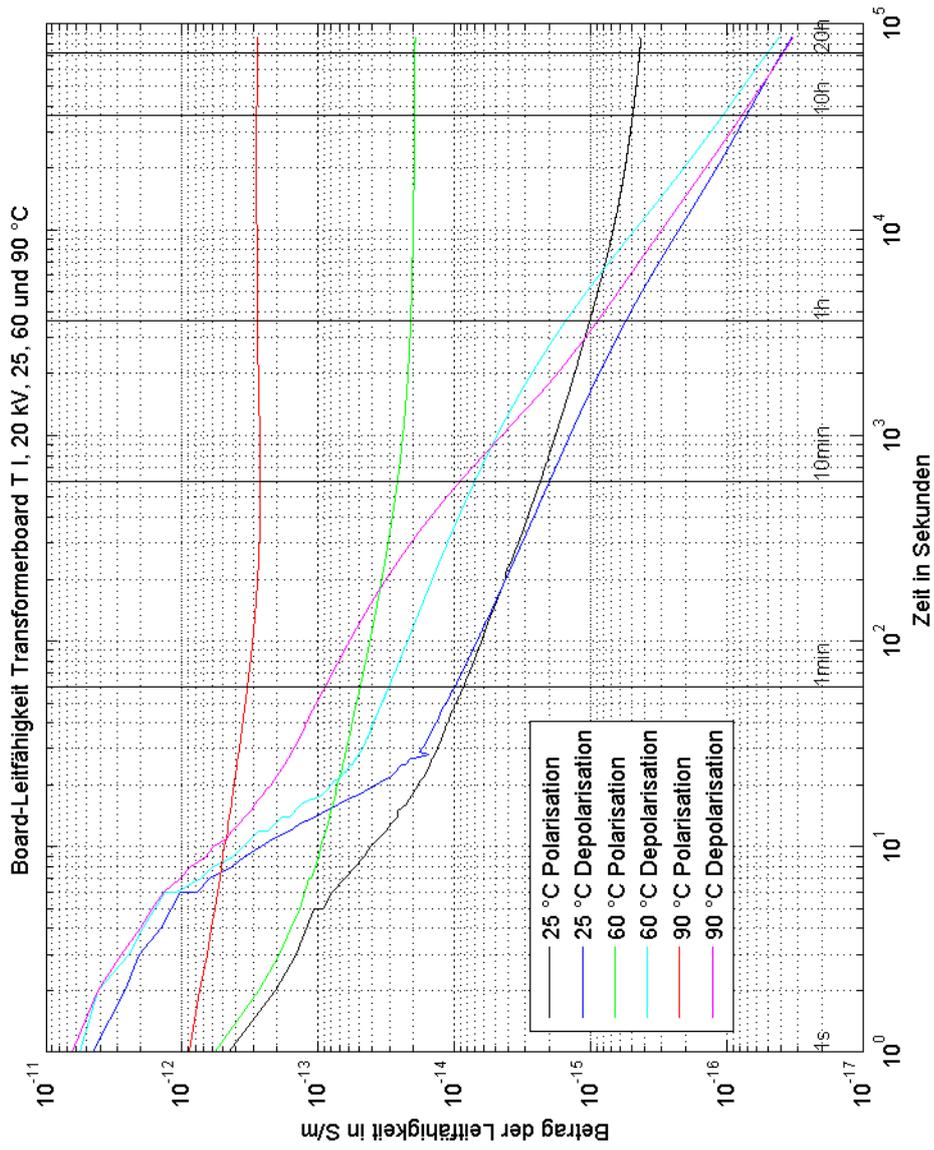


Abbildung 7.15: Board-Leitfähigkeit Transformorboard T I, 20kV, 25, 60 und 90 °C

8 Zusammenfassung

Durch die fortschreitende Elektrifizierung und dem damit verbundenen, wachsenden Bedarf an elektrischer Energie, sind Übertragungssysteme notwendig, die im Stande sind, große Energiemengen verlustarm über weite Distanzen zu übertragen. Mit der klassischen Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) stößt man aber immer häufiger an technische und wirtschaftliche Grenzen, welche man aber mit der Technologie der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) zu überwinden im Stande ist. Für die Entwicklung der Isolationssysteme solcher HGÜ-Komponenten müssen jedoch die elektrischen Vorgänge, die infolge der Gleich- und Mischfeldbeanspruchung auftreten, beachtet werden.

Nach einer Einführung in die Thematik sowie einem kurzen Exkurs zum Thema Faserstoffe in den Kapiteln 1 und 3, erfolgt im Kapitel 4 die Erarbeitung theoretischer Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit. Es werden grundlegende Leitungsmechanismen im Isolierstoff dargelegt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der Leitfähigkeit im mineralischen Isolieröl (Transformatoröl) sowie im Board, wobei ein Augenmerk auf die Gleichstromleitfähigkeit gelegt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann anhand eines Öl-Board-Isolationssystems diskutiert. Anhand dieses Isolationssystems wird auch der wesentliche Unterschied in der Feldbeanspruchung der Komponenten Öl und Board bei Wechselspannungsbeanspruchung (50Hz) sowie bei Gleichspannungsbeanspruchung dargestellt.

Bei zeitlich veränderlichen Beanspruchungen erfolgt eine kapazitive Feldverteilung entsprechend den Permittivitäten. Die Folge ist ein dielektrisches Verschiebungsfeld unter der es zu einer Feldverdrängung in das Material mit der geringeren relativen Permittivitätszahl, also dem Öl kommt. Unter Gleichspannungsbeanspruchung erfolgt jedoch eine resistive Feldverteilung entsprechend den Leitfähigkeiten, es stellt sich ein stationäres Strömungsfeld ein. Die Feldverdrängung erfolgt dabei in das Material mit der geringeren elektrischen Leitfähigkeit, also in das Board. Eine wichtige Erkenntnis ist daher, dass die Gleichspannungsbeanspruchung zu einer Feldentlastung des Öles sowie zu einer Feldbelastung der Board-Barrieren führt. Zu beachten ist, dass beim Anlegen einer Gleichspannung an eine derartige Isolieranordnung, ein kontinuierlicher Übergang vom dielektrischen Verschiebungsfeld in das stationäre Strömungsfeld erfolgt. Für den Entwicklungsingenieur sind zur Dimensionierung der elektrischen Isolation von HGÜ-Komponenten die Leitfähigkeiten der eingesetzten Materialien von Bedeutung. Während jedoch die Permittivitäten der Materialien sich über die Lebensdauer

praktisch nicht verändern, unterliegen die Leitfähigkeiten sehr vielen Einflussparametern.

Im Kapitel 5 erfolgt eine theoretische Beschreibung der Einflussparameter elektrische Feldstärke, Feuchte sowie Temperatur auf die Leitfähigkeit der Isolierstoffe Öl und Board. Es zeigt sich eine Veränderung der Leitfähigkeit um mehrere Zehnerpotenzen.

Im Kapitel 6 wird ein Einblick in die Planung und Konstruktion des Prüfkessels zur Leitfähigkeitsmessung gegeben. Nachdem die Anforderungen klar formuliert wurden, werden unterschiedliche Lösungsansätze der Konstruktion diskutiert sowie die Auswahl der Materialien und Sensorik dargelegt. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Auswahl der Hochspannungsdurchführung und die damit abgestimmte Auslegung der elektrischen Isolationskomponenten des Kessels, um Gleitentladungen sowie Durchschläge sicher auszuschließen. Abschließend erfolgt eine Untersuchung des geplanten Kessels auf seine Teilentladungsfestigkeit mittels Feldsimulationsprogramm, wofür zunächst die Teilentladungseinsetzfeldstärken der Komponenten Öl und Board erarbeitet wurden. Die gesamte Kesselkonstruktion zeigt eine Teilentladungsfreiheit bis zur maximalen, durch die Durchführung festgelegten Betriebsspannung von 20kV DC. Der Kessel ermöglicht die Bestimmung der Board- als auch Ölleitfähigkeit.

Die praktischen Leitfähigkeitsmessungen an Transformerboard-Proben, unter dem Einfluss der elektrischen Feldstärke, Temperatur sowie Boardfeuchte, werden im Kapitel 7 behandelt. Die Untersuchungen bekräftigen die theoretisch erarbeiteten Abhängigkeiten der Einflussparameter auf die elektrische Leitfähigkeit.

9 Diskussion der Messergebnisse und Ausblick

Es zeigt sich eine große Zunahme der Leitfähigkeit mit der Feldstärke im Anfangsbereich und eine fast feldstärkeunabhängige Leitfähigkeitsendwerte bei niedrigen Temperaturen (25°C), während bei hohen Temperaturen (90°C) umgekehrt ein fast feldstärkeunabhängiger Leitfähigkeitsanfangswert sowie mit der Feldstärke zunehmende Leitfähigkeitsendwerte beobachtet werden können. Der Anfangswert der Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Ölleitfähigkeit sowie den Polarisationsvorgängen im Board bestimmt (siehe Abbildung 7.1). Mit zunehmender Temperatur zeigt sich eine Zunahme der Leitfähigkeit, außerdem erreichen die Polarisationsströme schneller einen stationären Endwert. Mit zunehmender Temperatur ist eine größer werdende Differenz zwischen Polarisations- und Depolarisationsstrom erkennbar, siehe auch Kapitel 5.1.

Tendenziell zeigt sich eine starke Zunahme der Leitfähigkeit mit der Feuchte sowie der Temperatur. Mit steigender Temperatur, Feuchte und Feldstärke erreicht der Polarisationstrom sehr rasch stationäre Werte. Mit zunehmender Feuchte wird die Differenz zwischen Polarisations- und Depolarisationsstrom größer, siehe auch Kapitel 5.2.

Die Temperaturzunahme von 25°C auf 90°C hat einen Leitfähigkeitsanstieg von etwa zwei Zehnerpotenzen zur Folge. Bei höheren Temperaturen zeigt sich wieder eine rasche Stabilisierung des Leitfähigkeitsendwertes, siehe auch Kapitel 5.3.

Wie die Messergebnisse zeigen, wird die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Boards stark vom Öl beeinflusst, weshalb weitere Untersuchungen an niederdichten Proben, wie zum Beispiel Transformerboard T III, empfehlenswert sind.

Da Esterflüssigkeiten durch günstige Eigenschaften, wie hoher Flammpunkt und Umweltverträglichkeit, in Leistungstransformatoren vermehrt Einsatz finden, diese aber infolge anderer chemischer Struktur andere Isolierverhalten als Mineralöle aufweisen, macht eine Untersuchung von imprägniertem Board mit so genannten alternativen Isolierflüssigkeiten Sinn.

Symbolverzeichnis

A	Fläche in m^2
b	Beweglichkeit der Ladungsträger in $m^2/(Vs)$
c	Wasserkonzentration im Öl in ppm bzw. $\mu g/g$
c_{max}	Wassersättigungskonzentration in Öl ppm bzw. $\mu g/g$
D	dielektrische Verschiebungsdichte in As/m^2
d	Abstand, Länge, Dicke in m
d_{iS}	Innendurchmesser des Schutzringes in m
E	elektrische Feldstärke in V/m
E_0	elektrische Feldstärke der Vakuum-Anordnung in V/m
E_{Dip}	resultierendes elektrisches Dipolfeld in V/m
E_{TE}	elektrische Teilentladungseinsetzfeldstärke in V/m
E_D	elektrische Durchschlagfeldstärke in V/m
F	Feuchtigkeit des Faserstoffs in $\%$
J	elektrische Stromdichte in A/m
k	Boltzmann-Konstante, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} J/K$
m	Exponent, dimensionslos
m_{H_2O}	Masse des im Öl vorhandenen Wassers in g bzw. μg

m_{Oel}	Masse des getrockneten Öles in g
n	Ladungsträgerdichte in $1/m^3$
q	elektrische Ladung in As bzw. C
T	absolute Temperatur in K
T_{Oel}	Öltemperatur in K
U	elektrische Spannung in V
U_D	elektrische Durchschlagspannung in V
U_P	elektrische Prüfspannung in V
U_{TE}	elektrische Teilentladungseinsetzspannung in V
V_{rel}	relativer Gasgehalt in $\%$
v	Ladungsträgergeschwindigkeit in m/s
W	Aktivierungsenergie in J
w_{rel}	relative Ölfeuchte in ppm bzw. $\%$
δ	Dichte in kg/m^3 bzw. g/cm^3
δ_B	Transformerboard-Dichte in kg/m^3 bzw. g/cm^3
ε	Permittivität in $As/(Vm)$
ε_0	Permittivität des Vakuums (elektrische Feldkonstante), $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} As/(Vm)$
ε_r	relative Permittivität in $As/(Vm)$
μ	Ionenbeweglichkeit in $m^2/(Vs)$
ϱ_R	Raumladungsdichte in As/m^3 bzw. C/m^3
σ	spezifische elektrische Leitfähigkeit in S/m
σ_{\sim}	spezifische elektrische Wechselstromleitfähigkeit in S/m

σ_0 elektrische Leitfähigkeit bei Feldfreiheit in S/m

τ Transitzeit in s

Literaturverzeichnis

- [1] J. FABIAN, B. JOCHAM, B. NADER, R. WOSCHITZ, M. MUHR: *Current Challenges and Issues of Designing HVDC Converter Transformers*. CEIDP, Cancun, Mexiko, 2011, ISBN 1-4577-0983-8.
- [2] J. FABIAN, T. JUDENDORFER, A. STRAKA, R. WIND, R. WOSCHITZ, M. MUHR, CH. KRAUSE, U. PIOVAN: *Anforderungen und Beanspruchungen des Öl-Board-Isoliersystems von HGÜ-Stromrichter-Transformatoren*. ETG-Fachbericht 125 Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung, VDE Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4.
- [3] J. FABIAN: *Dielektrische Kennwerte von Isolierstoffen bei Gleichspannungsbeanspruchung*. Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2012, ISBN 978-3-85133-072-4.
- [4] R. BÄRSCH, A. KÜCHLER: *Beanspruchungen und elektrisches Verhalten von Isoliersystemen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchungen*. ETG-Fachbericht 125 Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung, VDE Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4.
- [5] R. BÄRSCH, J. KINDERSBERGER: *Nichtlineare dielektrische Funktionseigenschaften von Dielektrika*. ETG-Fachbericht 110 Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, VDE Verlag, 2008, ISBN 978-3-8007-3080-3.
- [6] M. KOCH, S. TENBOHLEN: *Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum*. ETG-Fachbericht 99 Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, VDE Verlag, 2005, ISBN 978-3-8007-2879-4.
- [7] A. KÜCHLER: *Hochspannungstechnik, 3., neu bearbeitete Auflage*. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8.
- [8] M. BEYER, W. BOECK, K. MÖLLER, W. ZAENGL: *Hochspannungstechnik*. Springer Verlag, 1986, ISBN 3-540-16014-0.
- [9] H.P. MOSER: *Transformerboard*. Birkhäuser AG, 1979.

- [10] H.P. MOSER, V. DAHINDEN: *Transformerboard II*. 1987.
- [11] M. BEYER: *Elektrische Isoliertechnik*. Springer-Verlag, 1989, ISBN 3-540-16014-0.
- [12] M. KAHLE: *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*. Springer-Verlag, 1986, ISBN 3-540-19369-3.
- [13] IEC 60243-2: *Bestimmungen für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen*. 2001.
- [14] R. PORZEL, E. NEUDERT, M. STURM: *Diagnostik der Elektrischen Energietechnik*. Expert-Verlag, 1996, ISBN 3-8169-1364-4.
- [15] CONVENOR: A. KÜCHLER, SECRETARY: U. PIOVAN, MEMBERS: I. ATANASOVA-HÖHLEIN, M. BERGLUND, G. CHEN, A. DENAT, J. FABIAN, R. FRITSCHKE, S. GUBANSKI, S. INGEBRIGTSEN, M. KADOWAKI, C. KRAUSE, A. LANGENS, S. MORI, B. NOIRHOMME, H. OKUBO, C. PERRIER, S. RÄTZKE, M. SARAVOLAC, F. SCATIGGIO, J. SCHIESSLING, P. SMITH, P. WEDIN, H. YU: *HVDC Transformer Insulation - Oil Conductivity*. Joint Working Group A2/D1.41 der Cigré.
- [16] A. KÜCHLER, F. HÜLLMANDEL, K. BÖHM: *Das dielektrische Verhalten von Öl-Papier-Isolationen unter der Wirkung von Grenzflächen-, Material- und Prüfparametern*. ETG-Fachbericht 99 Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, VDE Verlag, 2005, ISBN 978-3-8007-2879-4.
- [17] Y. DU, M. ZAHN, B.C. LESIEUTRE, A.V. MAMISHEV, S.R. LINDGREN: *Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems*. DEIS Feature Article, January/February 1999.
- [18] WEIDMANN ELECTRICAL TECHNOLOGY AG RAPPERSWIL, SCHWEIZ: <http://www.weidmann-electrical.com/de/maerkte-und-produkte/board/zellulosebasiert/kalandriertes-board>. 16. Juli 2012.
- [19] C. KUEN: *Bestimmung der Feuchtesorptionskurven von Zellulose für Transformatoren in Abhängigkeit vom Depolymerisationsgrad*. Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2008.

Anhang

- Datenblatt der Ölfeuchte- und Temperaturmesswertgeber der Serie MMT330 von Vaisala.
- Datenblatt der Hochspannungsdurchführung.
- Datenblatt Transformerboard T I.
- Konstruktionszeichnungen des Prüfkessels.

Serie MMT330 Feuchte- und Temperaturmesswertgeber für Onlinemessungen in Öl



Merkmale

- Kontinuierliche Messung des Feuchtegehalts in Öl
- Einsatz über Kugelhahn direkt im Prozess ohne Ablassen von Öl
- Vaisala HUMICAP® Sensor – bewährt seit mehr als 30 Jahren
- 10 Jahre Erfahrung mit Feuchtemessungen in Öl
- Ausgezeichnete Langzeitstabilität
- Rückführbar auf NIST (inkl. Zertifikat)
- Einfache Kalibrierung und Wartung vor Ort – kompatibel mit dem portablen Vaisala HUMICAP® Ölfeuchtemessgerät MM70

Die Vaisala HUMICAP® Ölfeuchte- und Temperaturmesswertgeber der Serie MMT330 ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung der Ölfeuchte selbst unter anspruchsvollen Prozessbedingungen.

Die Vaisala HUMICAP® Ölfeuchte- und Temperaturmesswertgeber der Serie MMT330 gewährleisten schnelle und zuverlässige Messungen des Feuchtegehalts in Ölen. Sie sind ideal zur Echtzeit-Feuchteüberwachung sowie zur Steuerung von Ölabscheidern und Öltrocknern geeignet. Dank verschiedener Sondentypen können die Messwertgeber in Schmier- und Hydrauliksystemen sowie in Transformatoren verwendet werden.

Eine zuverlässige Überwachung spart Öl und schont die Umwelt. Mit dem MMT330 lassen sich mögliche Auswirkungen eines zu hohen Feuchtegehalts einfach und wirtschaftlich überwachen.

Bewährte Vaisala HUMICAP® – Technologie

Der MMT330 arbeitet mit der neuesten Generation des Vaisala HUMICAP® Sensors, der speziell für anspruchsvolle Feuchtemessungen in flüssigen Kohlenwasserstoffen entwickelt wurde. Die herausragende chemische Beständigkeit des Sensors sorgt für präzise und zuverlässige Messungen über den gesamten Messbereich.



Über das Display lassen sich Messwerttendenzen bis zu einem Jahr zurückverfolgen

Messung der Wasseraktivität

Der MMT330 misst die Ölfeuchte in Form von Wasseraktivität (a_w) und die Öltemperatur (T). Die Wasseraktivität ist ein direkter Indikator dafür, ob eine Gefahr der Wasserabscheidung als Phase besteht. Die Messung erfolgt dabei unabhängig von Typ, Alter und Temperatur des Öls.

Berechnung des Wassergehalts

Der MMT330 kann optional die durchschnittliche Massenkonzentration von Wasser in Öl in ppm_m ausgeben. Für mineralische Transformatorenöle steht diese Umrechnung bereits zur Verfügung. Für andere Öle können die spezi-

fischen Umrechnungskoeffizienten programmiert werden, wenn die Wasserlöslichkeit des Öls bekannt ist.

Grafische Tendenz- und Verlaufsanzeige

Der MMT330 ist optional mit einem großen numerisch/grafischen Display erhältlich, auf dem sich der Prozessverlauf bequem überwachen und bis zu einem Jahr zurückverfolgen lässt.

Diverse Ausgänge

Die Gerätserie ist mit bis zu drei Analogausgängen lieferbar. Eine galvanische Trennung von Speisespannung und Analogausgängen ist ebenfalls möglich. Zur digitalen Kommunikation stehen RS-232 / RS-485 Schnittstellen und Relaisausgänge zur Verfügung.

Einfache Installation

Die Serie MMT330 bietet eine Reihe von Montagemöglichkeiten. Die Messwertgeber werden vorkonfiguriert und mit allen Einstellungen betriebsbereit geliefert.

Technische Daten

Messgrößen

Wasseraktivität

Messbereich	0...1 a _w
Genauigkeit (einschließlich Nichtlinearität, Hysterese und Wiederholbarkeit)	±0,02 (0...0,9 a _w) ±0,03 (0,9...1,0 a _w)
Ansprechzeit (T ₉₀) bei +20 °C in ruhendem Öl (mit Edelstahlfilter)	10 min
Sensor	Vaisala HUMICAP®

Temperatur

Messbereich	
MMT332	-40...+180 °C
MMT337	-40...+180 °C
MMT338	-40...+180 °C
Genauigkeit bei +20 °C, typ.	±0,2 °C
Sensor	Pt 100 (IEC 751 1/3 Kl. B)

Betriebsbedingungen

Betriebstemperaturbereich	
Messsonden	wie Messbereiche
Elektronik	-40...+60 °C
mit LC-Anzeige	0...+60 °C
Druckeinsatzbereiche	siehe Sondenspezifikation

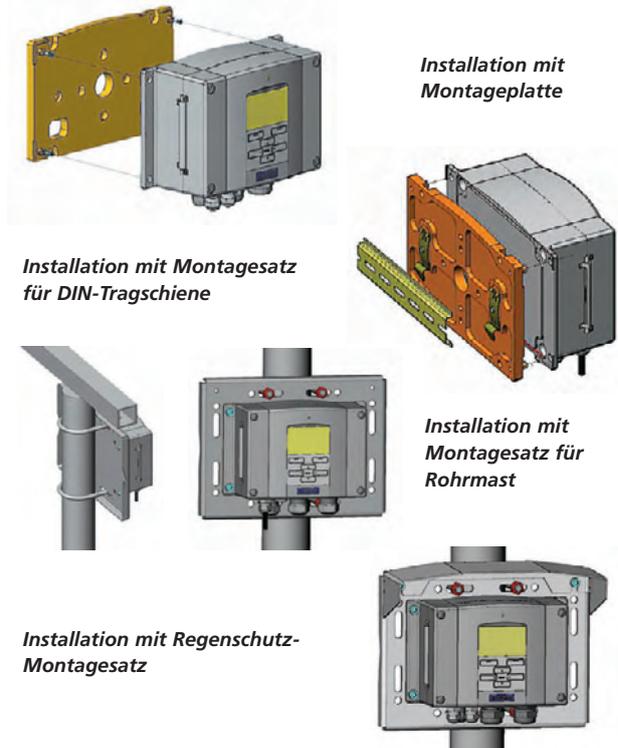
Ein- und Ausgänge

Betriebsspannungsbereich	10...35 VDC, 24 VAC
mit optionalem Netzmodul	100...240 VAC 50/60 Hz
Stromaufnahme (+20 °C, U _b = 24 VDC)	
Mit RS-232C	≤ 25 mA
Mit Ausgang 2 x 0...1 V / 0...5 V / 0...10 V	≤ 25 mA
Mit Ausgang 2 x 0...20 mA	≤ 60 mA
Mit Anzeige und Hintergrundbeleuchtung	+ 20 mA
Analogausgänge (2 Standard, 3. optional)	
Stromausgang	0...20 mA, 4...20 mA
Spannungsausgang	0...1 V, 0...5 V, 0...10 V
Genauigkeit der Analogausgänge bei +20 °C	±0,05 % v.Ew.
Temperaturabhängigkeit d. Analogausgänge	±0,005 % / °C v.Ew.
Externe Lasten	
Bürde für Stromausgänge	< 500 Ω
Spannungsausgang 0... 1 V	> 2 kΩ
Spannungsausgang 0... 5 V / 0... 10 V	> 10 kΩ
Max. Aderquerschnitt	0,5 mm ²
Serielle Schnittstelle	RS-232C, RS-485 (optional)
Relaisausgänge (optional)	0,5 A, 250 VAC
Digitalanzeige	LCD mit Hintergrundbeleuchtung, grafische Tendenzanzeige aller Größen
Menüsprachen	Deutsch, Englisch, Französisch, Spanisch, Japanisch, Schwedisch, Russisch, Finnisch

Allgemeine Daten

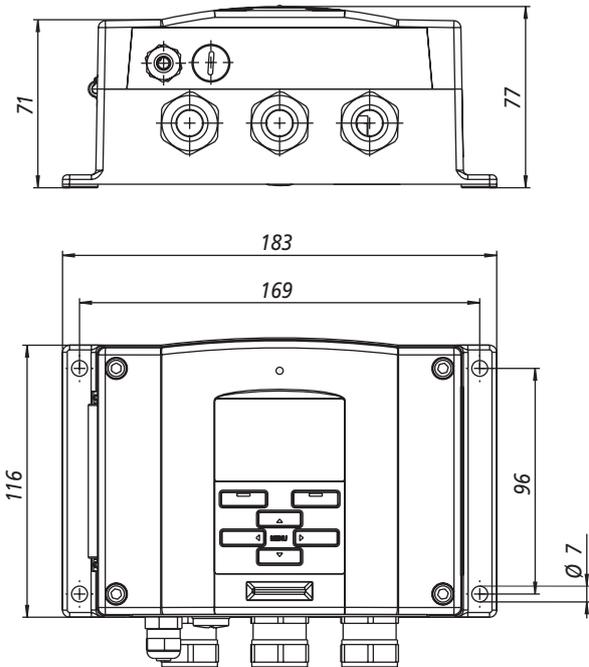
Anschlussmöglichkeiten	
Kabelverschraubung	M20 x 1,5 für Kabel mit Ø 8...11 mm
Rohrtülle (optional)	M20 x 1,5 / 1/2" NPT
Einbaubuchse / Kabelkupplung (optional)	M12, 8-polig
Anschlusskabel 5 m, schwarz (optional)	M12, 8-polig
Kabelkupplung mit Schraubklemmen (optional)	M12, 8-polig
Sondenkabeldurchmesser	5,5 mm
Gehäusematerial	G-AlSi 10 Mg (DIN 1725)
Gehäuseschutzart	IP65
EMV	gem. EN61326-1:1997 + Anh1:1998 + Anh2:2001

Installationsoptionen



Abmessungen

in mm



HUMICAP® ist ein eingetragenes Warenzeichen von Vaisala. Änderungen der einzelnen Spezifikationen möglich.
© Vaisala Oyj





Die Sonde des MMT332 ist zur Flanschmontage in Hochdruckerwendungen gedacht.

MMT332 kleine druckfeste Sonde mit Flansch

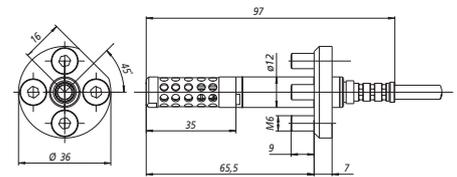
Technische Daten

Druckeinsatzbereich	0...250 bar
Sensorkopf-Durchmesser	12 mm
Sensorkabellänge	2 m, 5 m oder 10 m
Sensorschutz	Filter aus rostfreiem Edelstahl
Montageflansch	Ø 36 mm

Abmessungen

in mm

Flansch im Querschnitt



Die Sonde des MMT337 bietet sich für beengte Einbausituationen an. Sie wird mittels optionaler Swagelok-Verschraubung installiert.

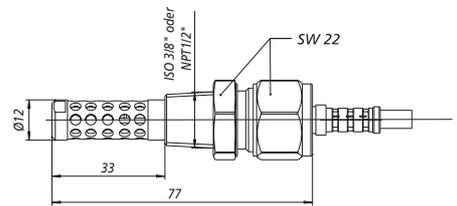
MMT337 zur Montage für beengte Einbausituationen

Technische Daten

Druckeinsatzbereich	0...10 bar
Sensorkopf-Durchmesser	12 mm
Sensorkabellänge	2 m, 5 m oder 10 m
Sensorschutz	Filter aus rostfreiem Edelstahl
Montage	
Verschraubung	R 3/8" ISO
Verschraubung	NPT 1/2"

Abmessungen

in mm



Die Sonde des MMT338 ist für die Montage in Druckräumen gedacht, aus denen die Sonde bei laufendem Prozess entfernt werden muss. Die Einbautiefe ist variabel.

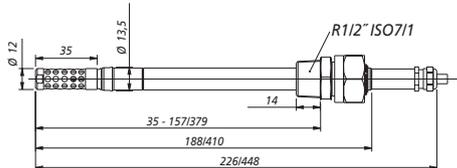
MMT338 kleine, druckfeste und variable Sonde

Technische Daten

Druckeinsatzbereich	0...40 bar
mit Kugelhahn	0...20 bar
Einbautiefe	41...149 / 371 mm
Sensorkabellänge	2 m, 5 m oder 10 m
Sensorschutz	Filter aus rostfr. Edelstahl
Montage	
Passkörper	R1/2" ISO
Passkörper	NPT 1/2"
Kugelhahn Inst.-satz	BALLVALVE-1
Probenahmezelle	DMT242SC2

Abmessungen

in mm



Das portable Vaisala HUMICAP® Ölfeuchtemessgerät MM70 ist ideal für eine Vor-Ort-Überprüfung der Messwertgeber geeignet.



Einsatz der MMT330 Serie bei der Online-Überwachung von Transformatorenöl

SHV-20kV-Durchführung

Stecker atmosphärenseitig

Technische Daten

■ Magnetisch ja

Material

■ Gehäuse Edelstahl 1.4301
 ■ Kontakt Nickel
 ■ Isolator Aluminiumkeramik

Temperaturbereich

■ Ohne Flansch -269 °C bis 450 °C
 ■ Auf KF-Flansch -25 °C bis 205 °C
 ■ Auf CF-Flansch -269 °C bis 450 °C

Stromstärke

■ 16,5 A

Zubehör

Atmosphärenseitiger Stecker

■ Magnetisch ja
 ■ Temperaturbereich -20 °C bis 125 °C
 ■ Stromstärke 20 A

Einzelne Kontakte mit Senkschraube

■ Leiterdurchmesser 2,4 mm
 ■ Kontaktmaterial Beryllium-Kupfer
 ■ Temperaturbereich -269 °C bis 200 °C
 ■ Stromstärke 25 A
 ■ Verpackungseinheit 10 Stück

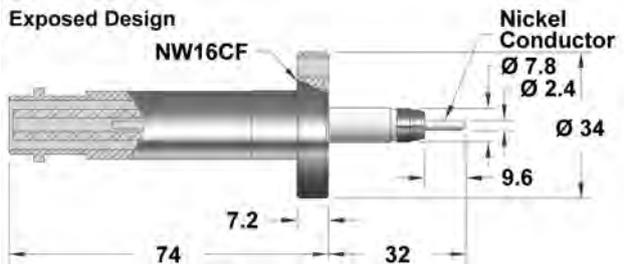
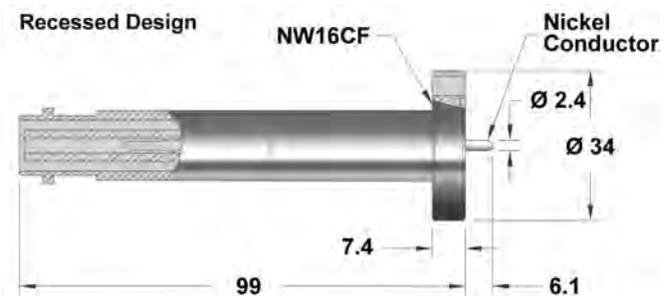
Einzelne Klemme mit Schlitzschraube

■ Leiterdurchmesser 2,4 mm
 ■ Kontaktmaterial Beryllium-Kupfer
 ■ Temperaturbereich -269 °C bis 400 °C
 ■ Stromstärke 25 A
 ■ Verpackungseinheit 10 Stück

Ohne Flansch



Auf CF-Flansch



SHV-20kV-Durchführung

Stecker atmosphärenseitig

Ohne Flansch



Art.-Nr.	Druck, 20 °C (bar)	Gehäuseart
W-SHV20-SH-SE-CE-NI	17	exposed
W-SHV20-LG-SE-CE-NI	17	recessed

Auf KF-Flansch



Art.-Nr.	Flansch	Druck, 20 °C * (bar)	Gehäuseart
KF25-SHV20-SH-SE-CE-NI	DN25KF	7	exposed
KF25-SHV20-LG-SE-CE-NI	DN25KF	7	recessed

Auf CF-Flansch



Art.-Nr.	Flansch	Druck, 20 °C (bar)	Gehäuseart
CF16-SHV20-SH-SE-CE-NI	DN16CF	17	exposed
CF16-SHV20-LG-SE-CE-NI	DN16CF	17	recessed

Atmosphärenseitiger Stecker



Art.-Nr.	Spannung (kV)
PLUG-SHV20	20

Einzelne Kontakte

Art.-Nr.	Bezeichnung
EK-S-CB24	Kontakt mit Senkschraube
EK-LK-CB24	Klemme mit Schlitzschraube

50.1 Technische Daten / Eigenschaften

50.1.1 Technische Daten von TRANSFORMERBOARD T I

Eigenschaft	Dickenbereich	Einheit	Messwert
Dichte	< 1.6 mm	g/cm ³	1.2
	> 1.6 - 3.0 mm	g/cm ³	1.1
	> 3.0 mm	g/cm ³	1.0
Zugfestigkeit MR	< 1.6 mm	MPa	105
	> 1.6 - 3.0 mm	MPa	97
	> 3.0 mm	MPa	85
Zugfestigkeit QR	< 1.6 mm	MPa	76
	> 1.6 - 3.0 mm	MPa	72
	> 3.0 mm	MPa	66
Dehnung MR	-	%	7.5
Dehnung QR	-	%	8.5
Schrumpfung MR	-	%	0.7
Schrumpfung QR	-	%	0.9
Schrumpfung Dicke	-	%	4.1
Spaltfestigkeit	-	N/30mm	340
Feuchtigkeitsgehalt	-	%	< 8.0
Aschegehalt	-	%	0.3
Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs	-	mS/m	2.3
pH des wässrigen Auszugs	-	-	7.0
Ölaufnahme	< 1.6 mm	%	14
	> 1.6 - 3.0 mm	%	22
	> 3.0 mm	%	28
Elektrische Festigkeit in Öl	< 3.0 mm	kV/mm	56
	≥ 3.0 mm	kV/mm	43

Die technischen Daten für TRANSFORMERBOARD sind typische Ergebnisse unserer Routineprüfungen welche in WEIDMANN-Laboratorien nach IEC 60641-2 und IEC 60243-1 durchgeführt wurden. Diese typischen Werte sind keine Spezifikation unserer Produkte.

Technische Daten / Eigenschaften

B 50.01 - 1/5 d

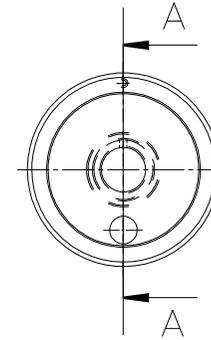
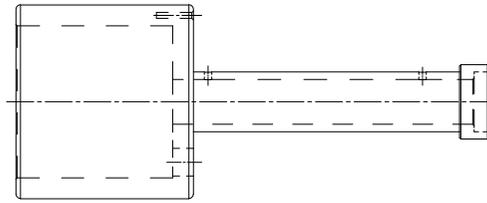
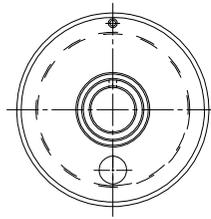
Edition	Replaces	Folder
Mai 2010	April 03	Compendium / Deutsch

WEIDMANN ELECTRICAL TECHNOLOGY AG

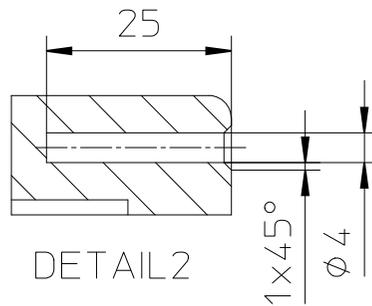
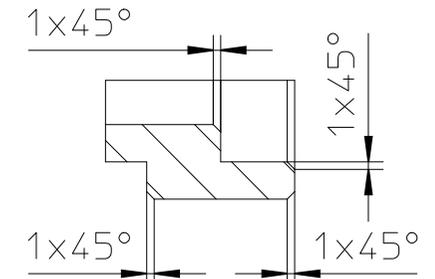
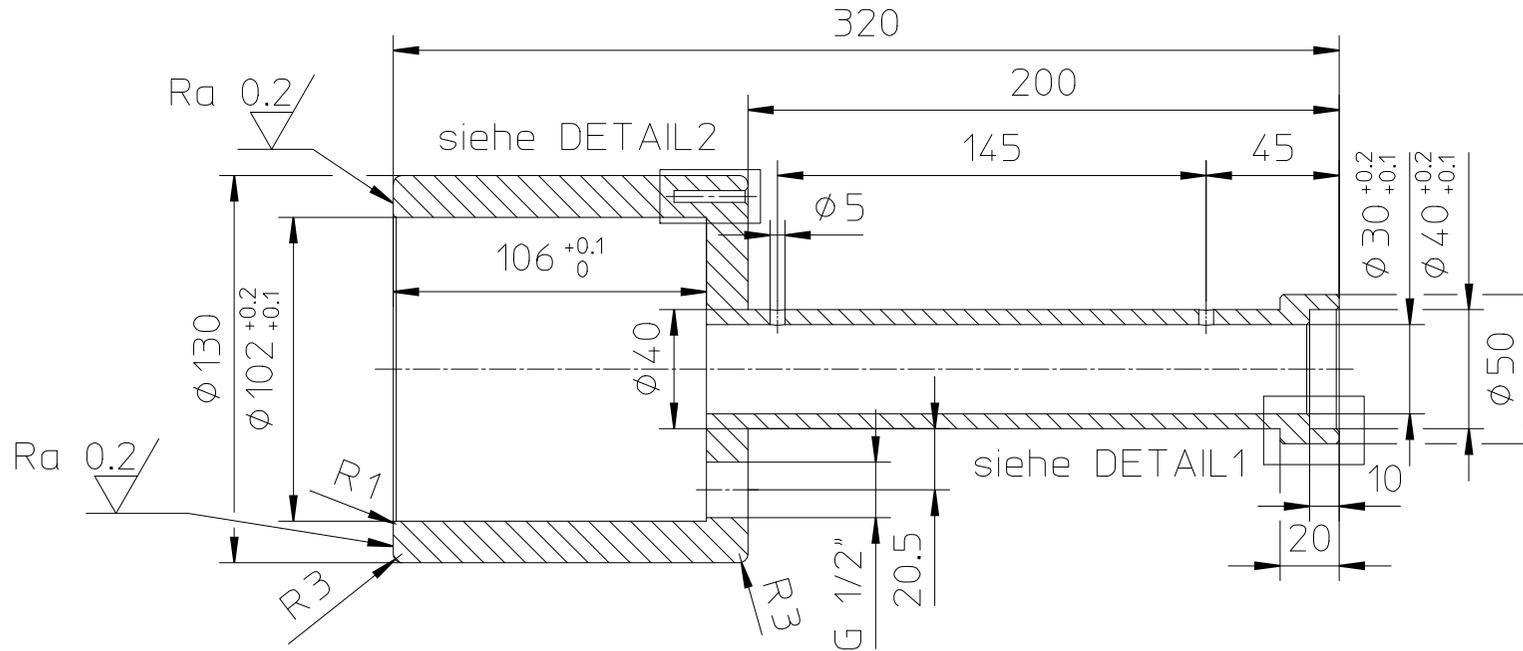
Neue Jonastrasse 60, 8640 Rapperswil, Switzerland

T +41 55 221 46 30, F +41 55 221 46 31, www.weidmann-electrical.com

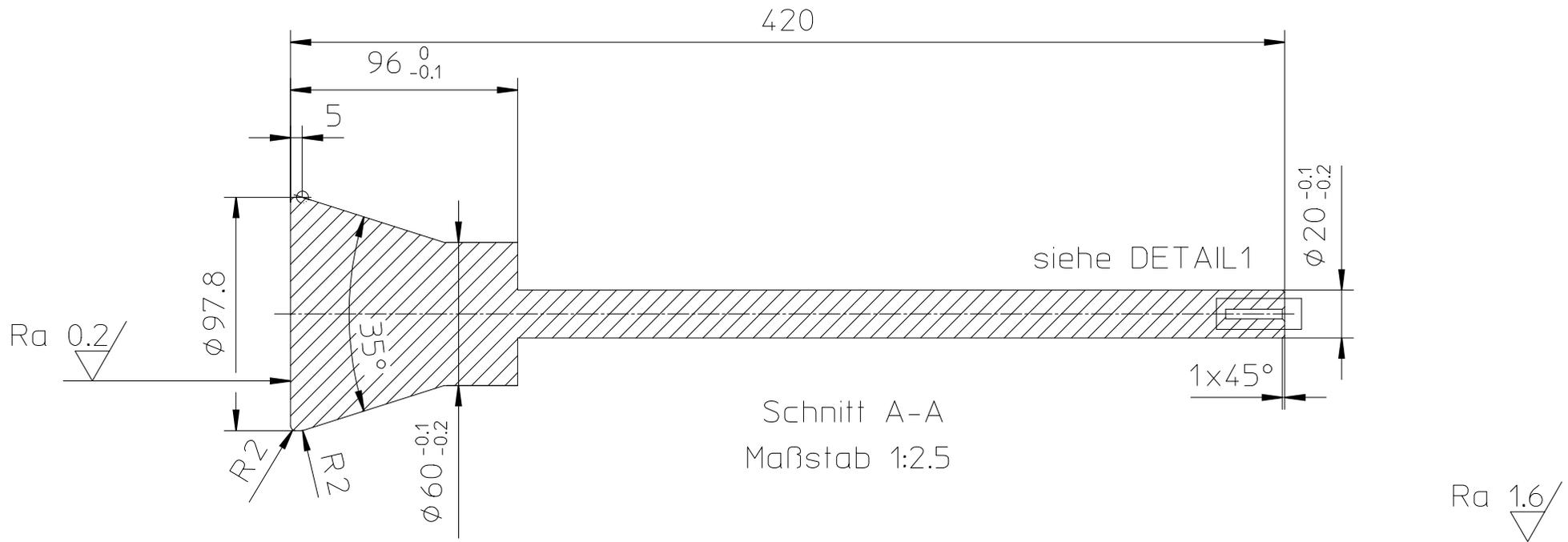
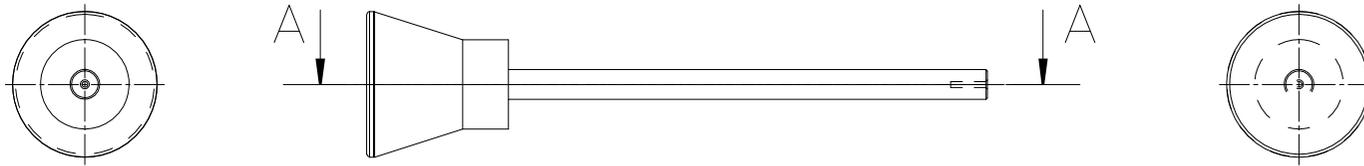
A Member of the WICOR Group



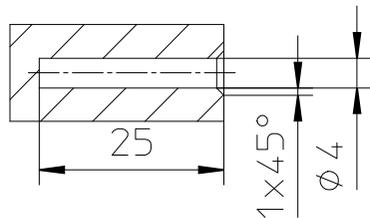
Schnitt A-A
Maßstab 1:2.5



USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:5	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 26.12.10		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER		SHEET	
								Schutzring		1	
INDEX DESCRIPTION				DATE		NAME		I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	
										OF 1	

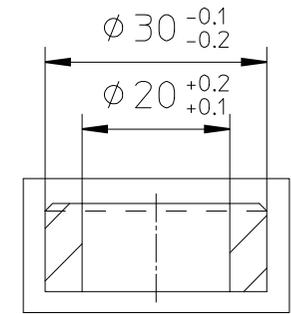
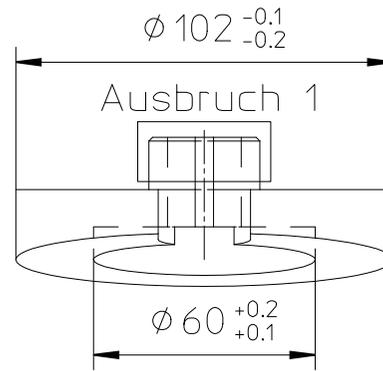
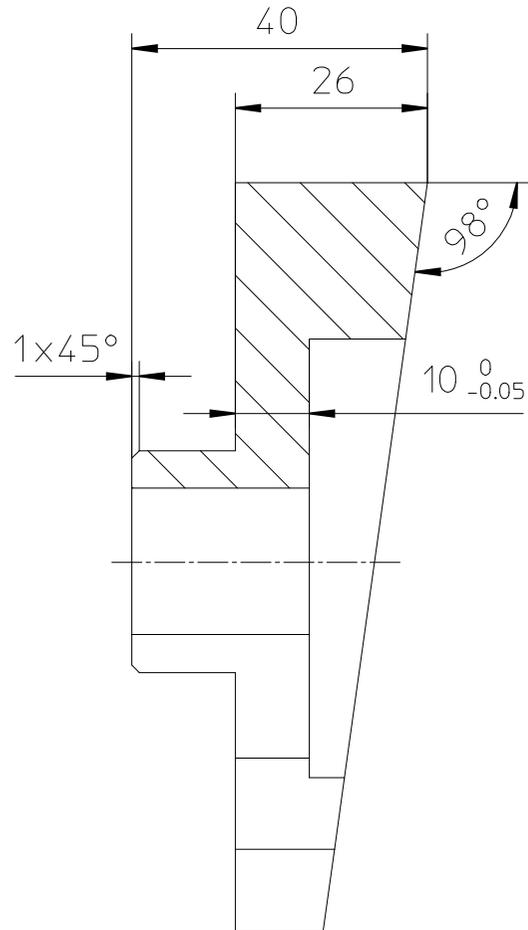


DETAIL1
Maßstab 1:1

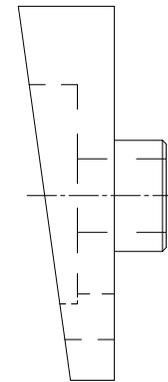
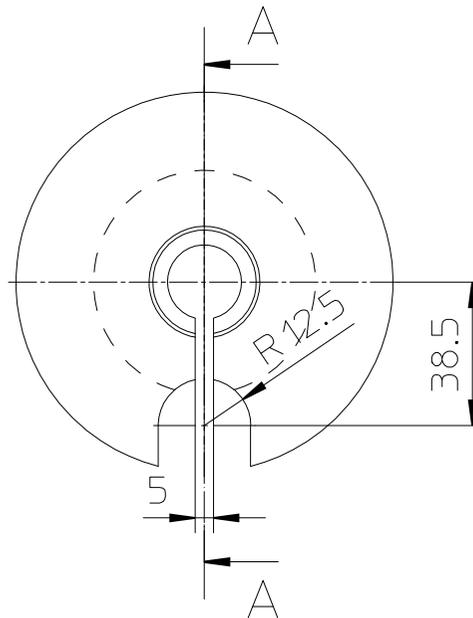


USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:5	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 20.11.10		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET
								Messelektrode			1
								I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL						OF 1	

Schnitt A-A
Maßstab 1:1

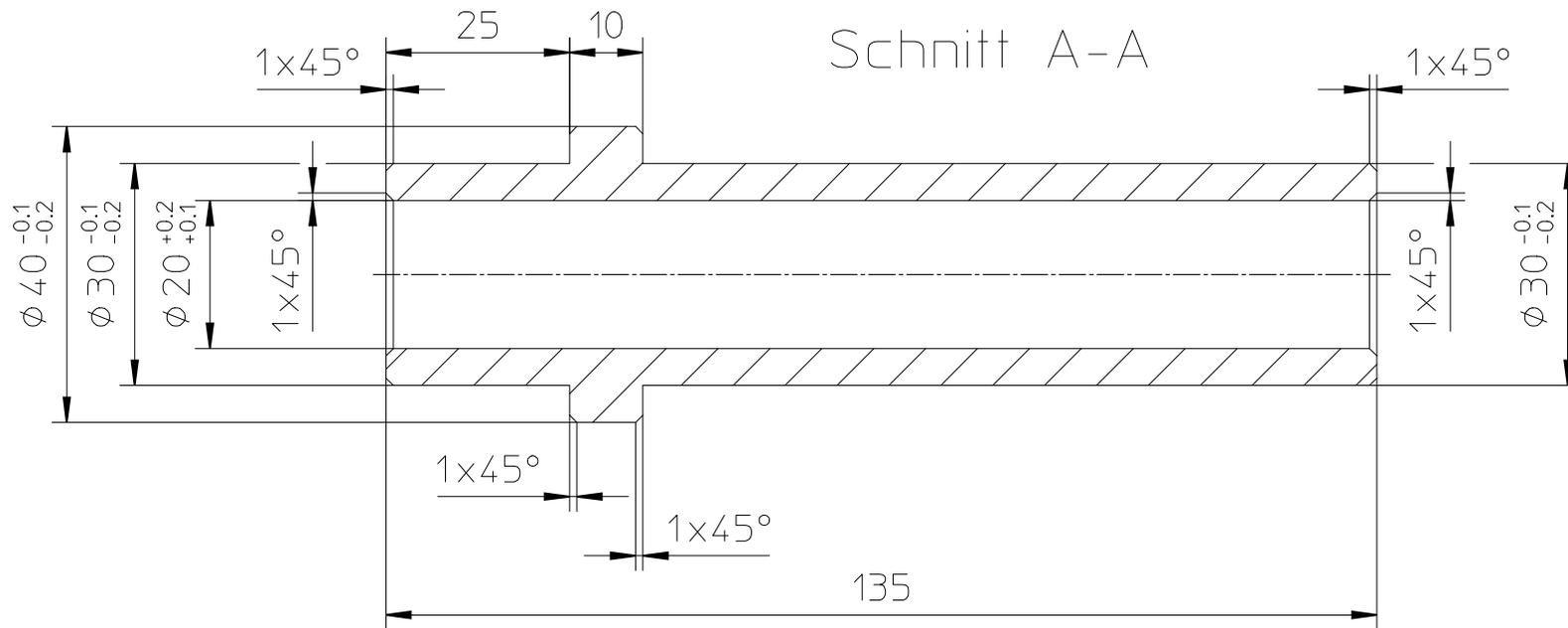
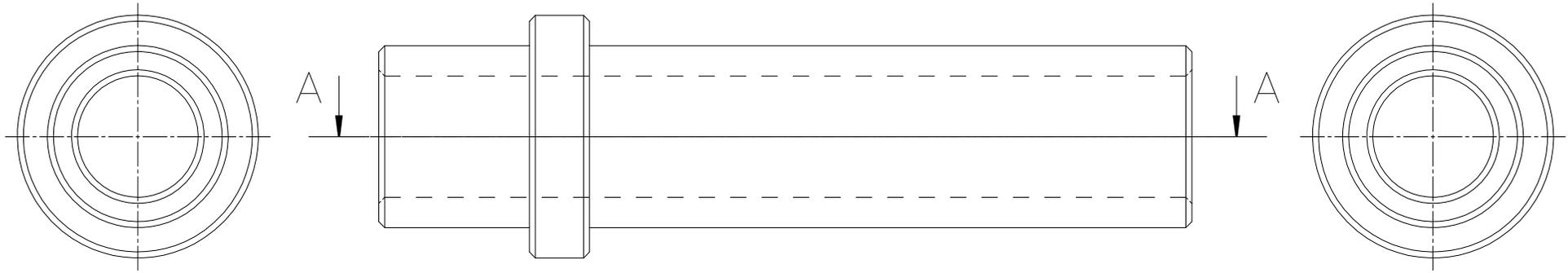


Ausbruch 1
Maßstab 1:1

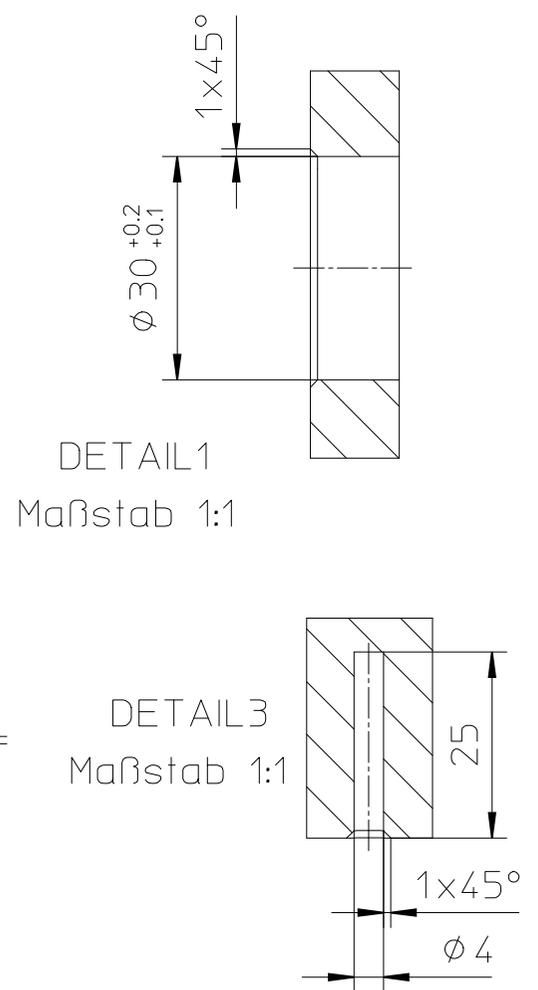
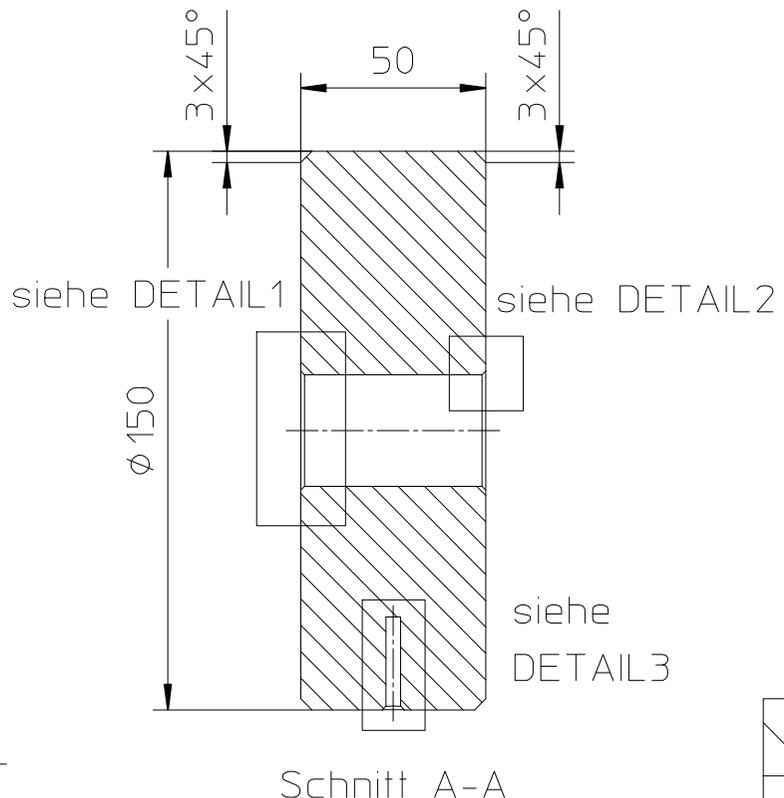
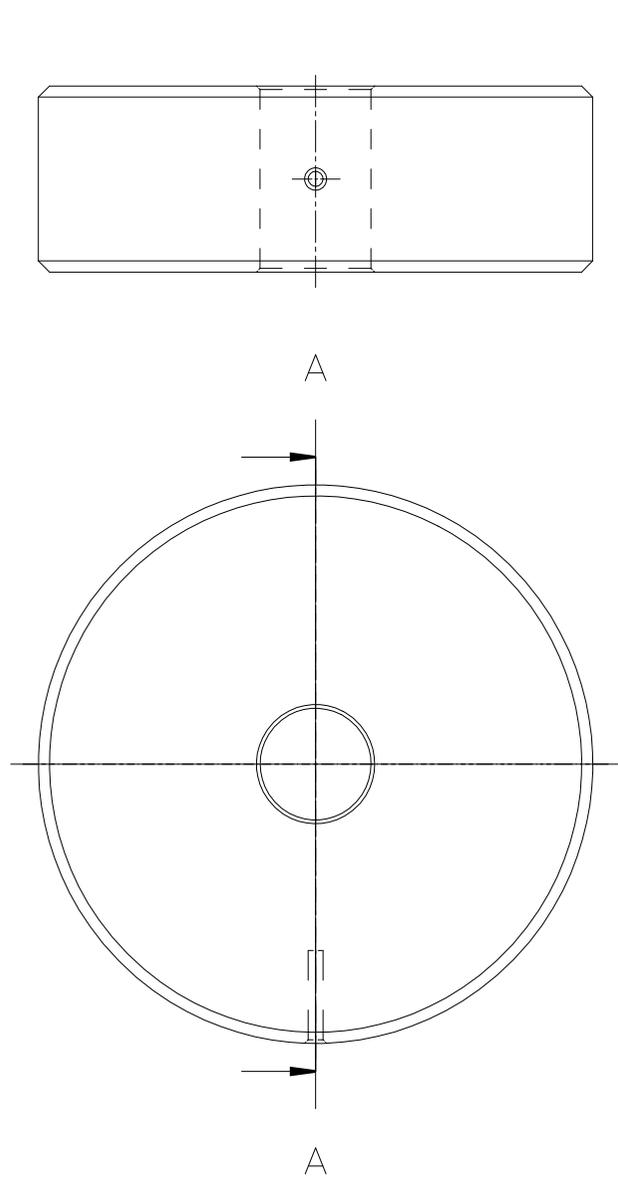


Ra 1.6/

USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:2	
								MATERIAL Teflon			
				DATE 20.11.10		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER Distanz			SHEET 1
											OF 1
INDEX	DESCRIPTION			DATE	NAME	ORIGINAL		I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.

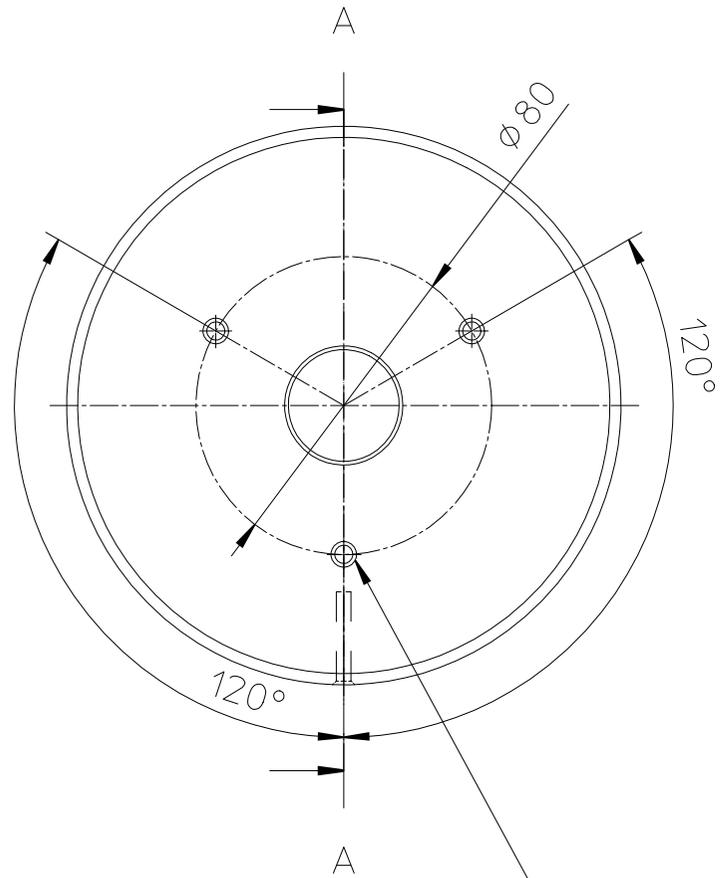
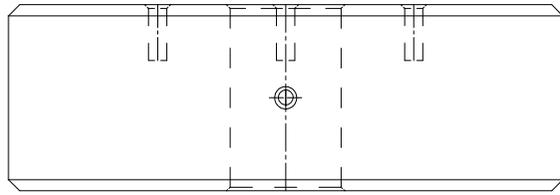


USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:1		
								MATERIAL Teflon				
				DATE 20.11.10		NAME NADER		DESCRIPTION				
				DRAWN								
				APPR.								
				RLS.								
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET	
								Masseaufnehmer			1	
								I.EXCH.F.			OF 1	
INDEX DESCRIPTION				DATE		NAME		ORIGINAL		I.EXCH.TH.		

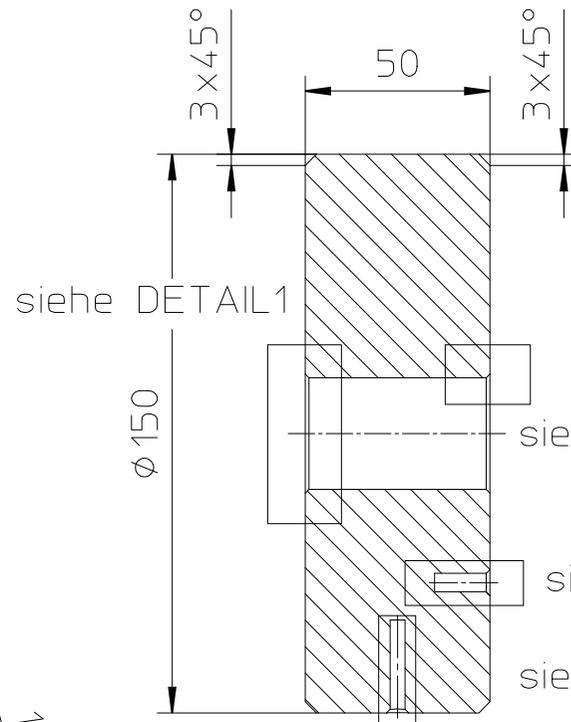


Ra 1.6/

USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:2	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 02.12.10		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER Beschwerungsmasse			SHEET 1
											OF 1
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.			



alle drei Bohrungen sind gleich



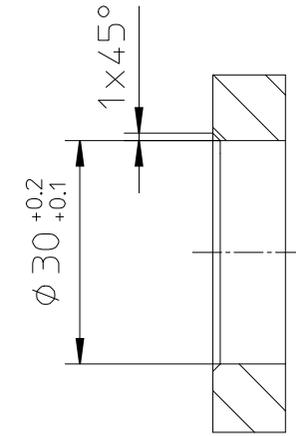
Schnitt A-A

Ra 1.6

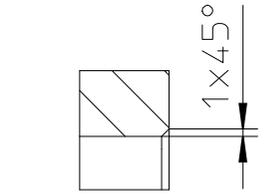
siehe DETAIL2

siehe DETAIL3

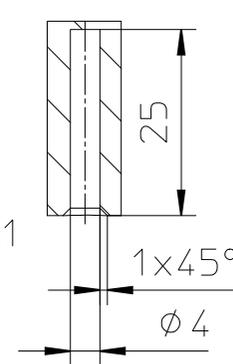
siehe DETAIL4



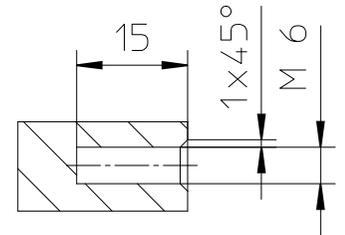
DETAIL1
Maßstab 1:1



DETAIL2
Maßstab 1:1



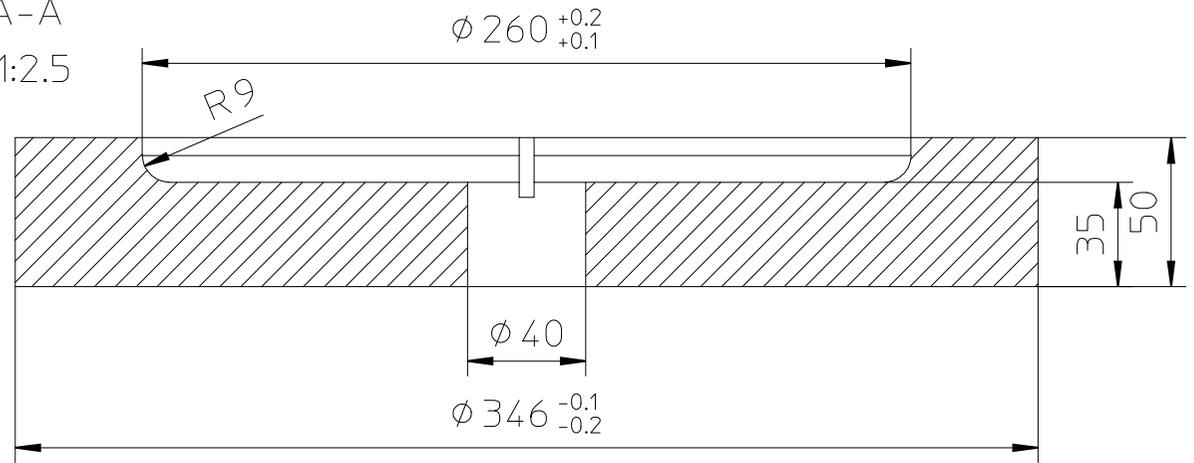
DETAIL4
Maßstab 1:1



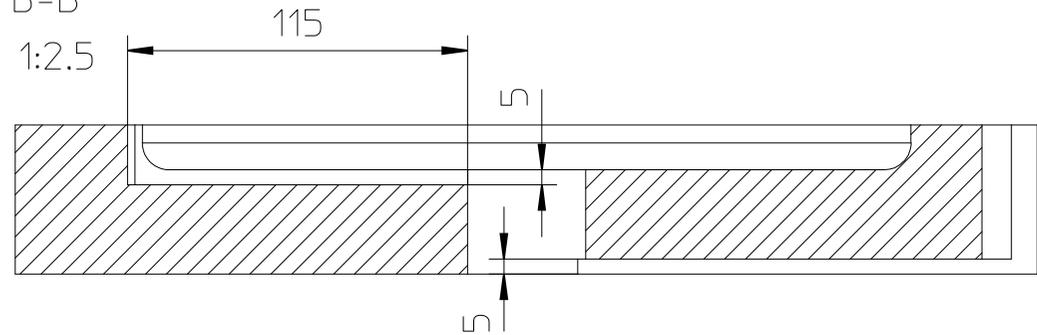
DETAIL3
Maßstab 1:1

USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:2	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 02.12.10		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET
								Masse mit Schirmaufnahme			1
INDEX DESCRIPTION				DATE		NAME		I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	
										OF 1	

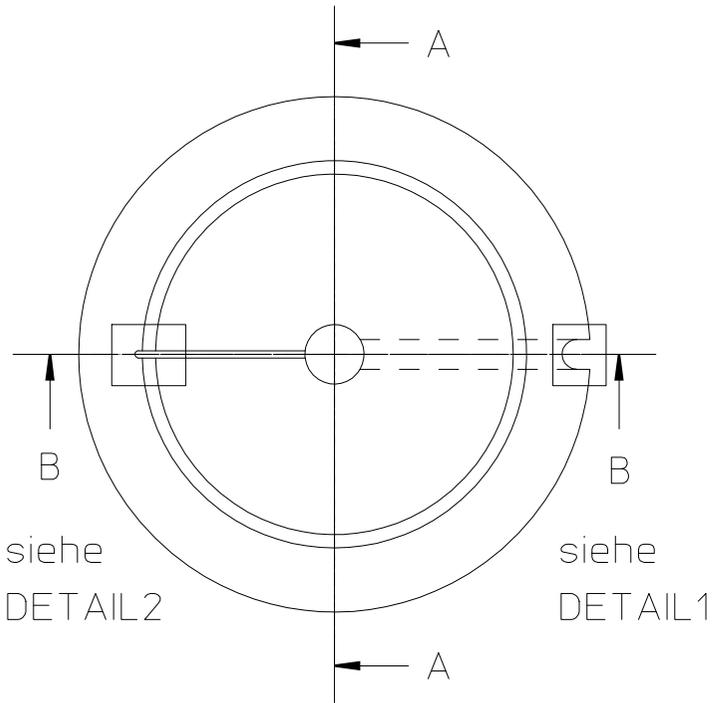
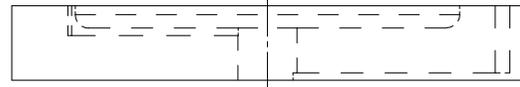
Schnitt A-A
Maßstab 1:2.5



Schnitt B-B
Maßstab 1:2.5

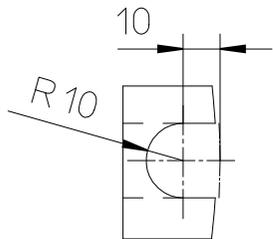


Ra 1.6/

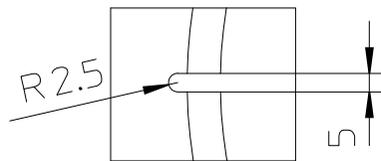


siehe
DETAIL2

siehe
DETAIL1

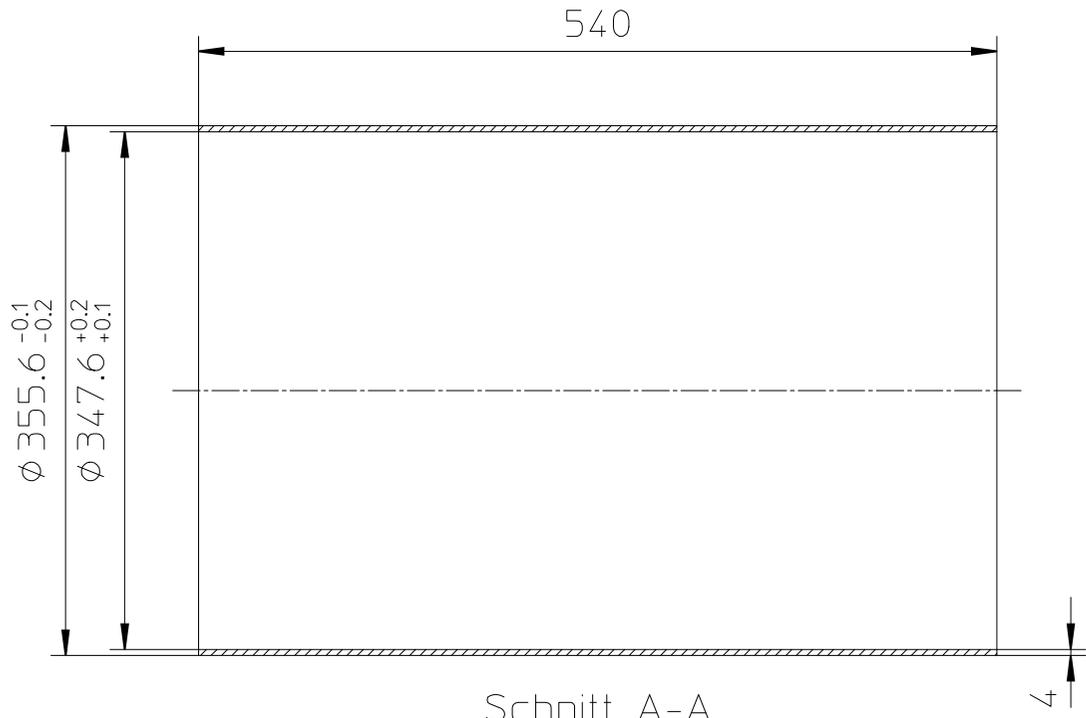
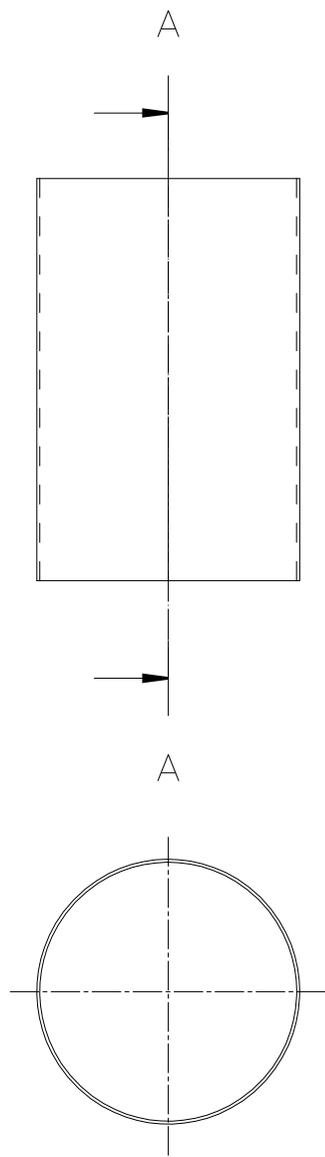


DETAIL1
Maßstab 1:2



DETAIL2
Maßstab 1:2

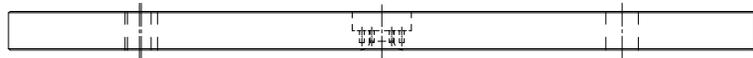
USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:5		
								MATERIAL Teflon				
				DATE 05.02.11		NAME NADER		DESCRIPTION				
				DRAWN								
				APPR.								
				RLS.								
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET 1	
								Spannungselektrodenaufnahme			OF 1	
INDEX DESCRIPTION		DATE		NAME		ORIGINAL		I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.	



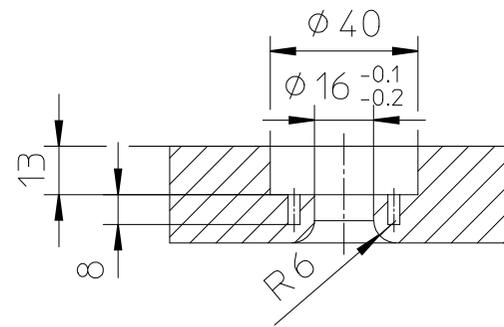
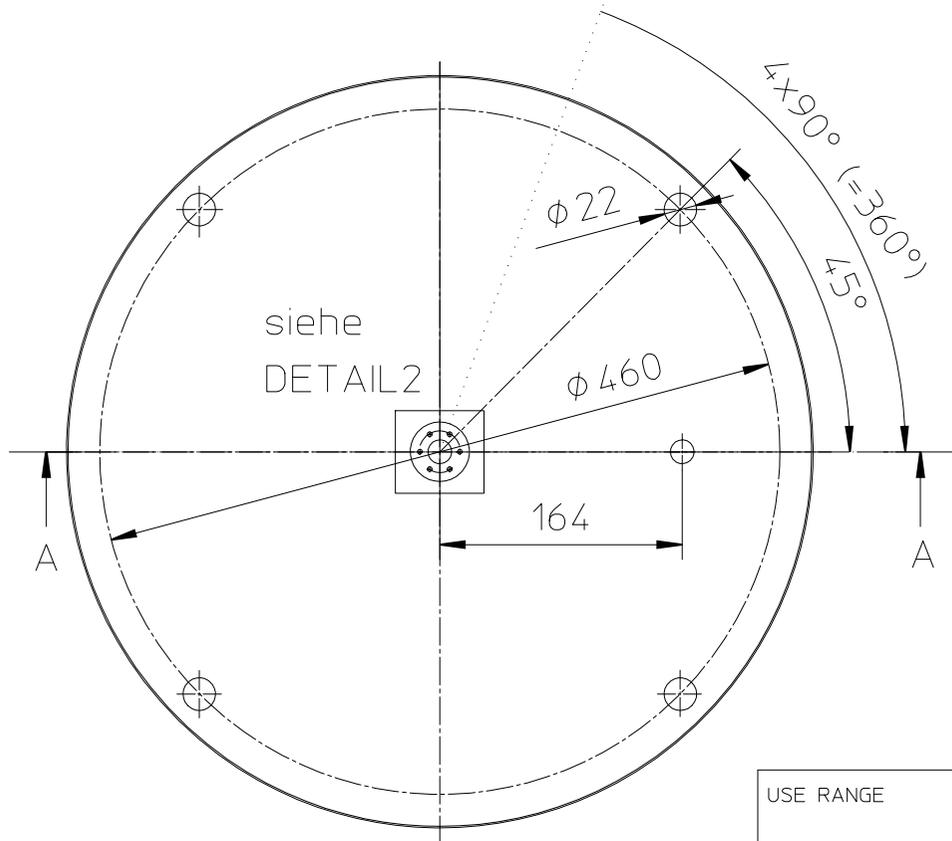
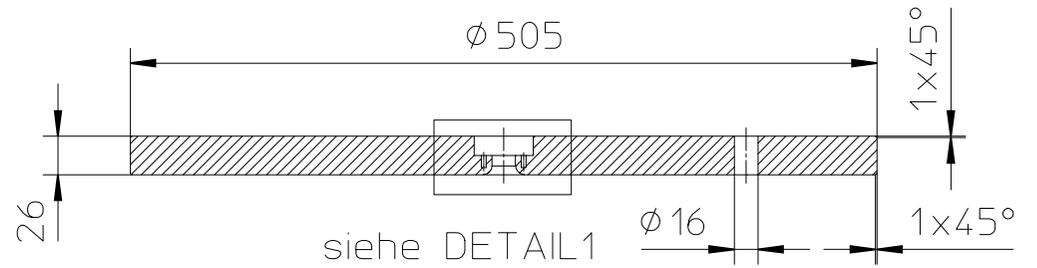
Schnitt A-A
Maßstab 1:5

Ra 3.2/

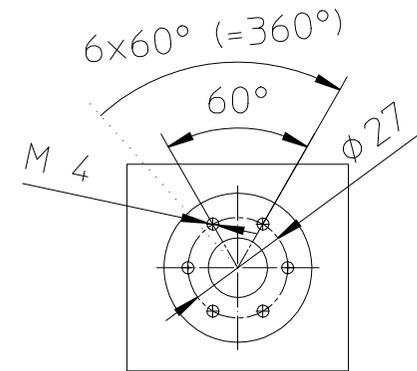
USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:10	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 05.02.11		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER Kessel-Rohr			SHEET 1
											OF 1
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL			I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.	



Schnitt A-A



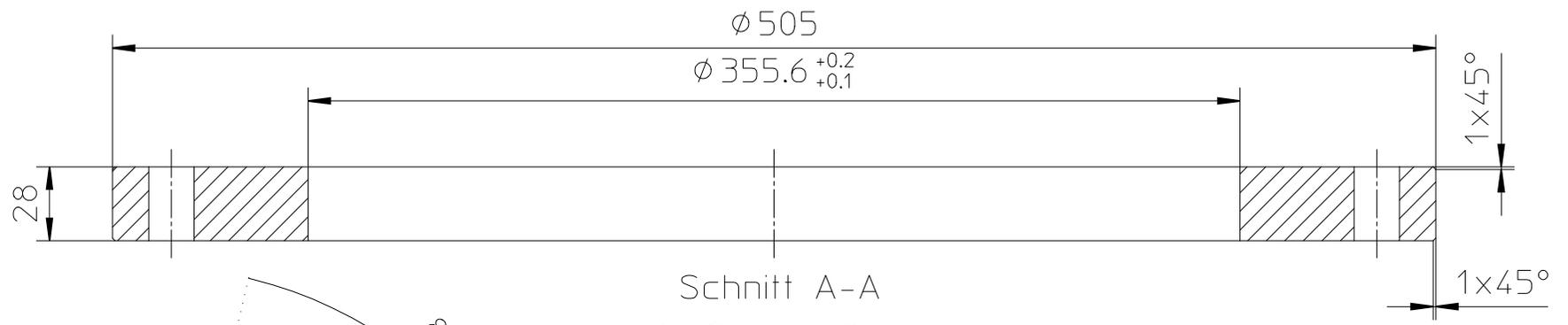
DETAIL1
Maßstab 1:2



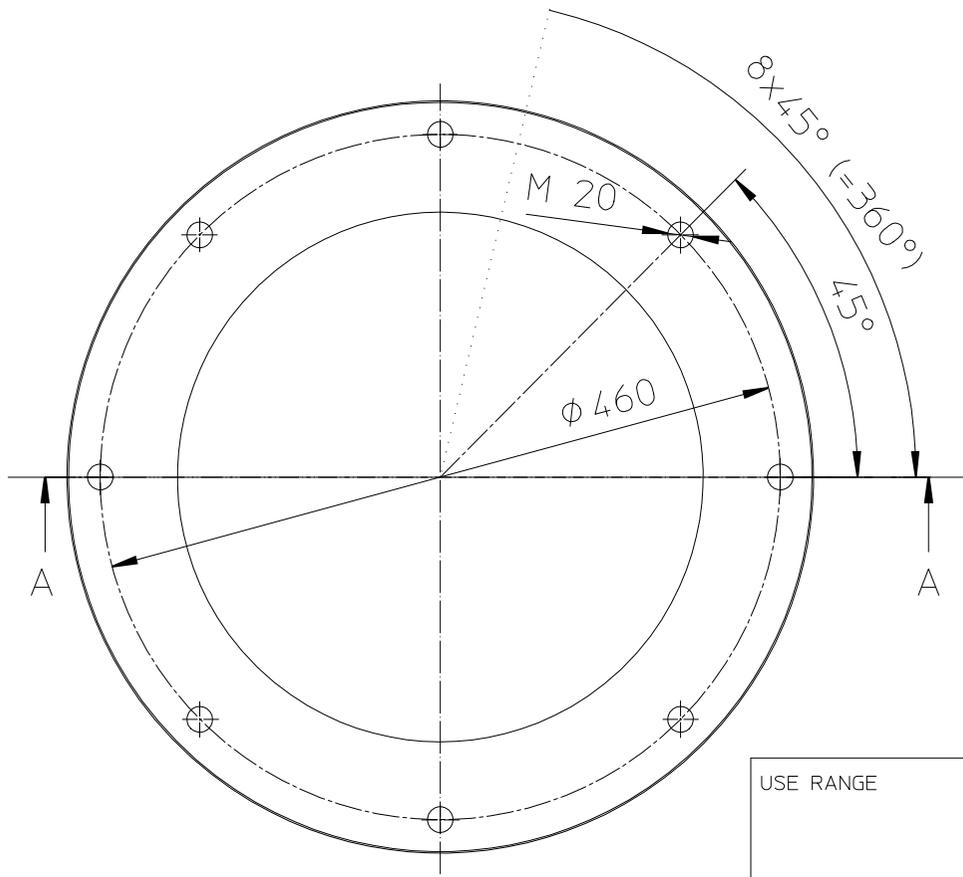
DETAIL2
Maßstab 1:2

Ra 3.2

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:5	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL			
								nichtrostender Stahl			
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN 05.02.11		NADER					
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER		SHEET	
								Kessel-Flansch unten		1	
INDEX DESCRIPTION				DATE		NAME		I.EXCH.F.		OF 1	

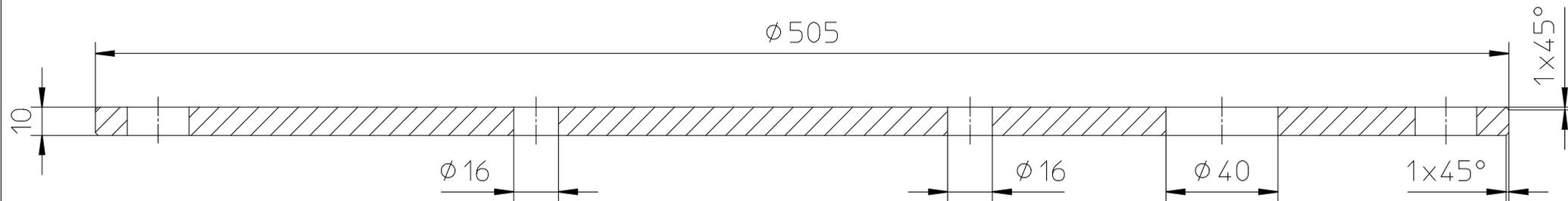


Schnitt A-A
Maßstab 1:2.5

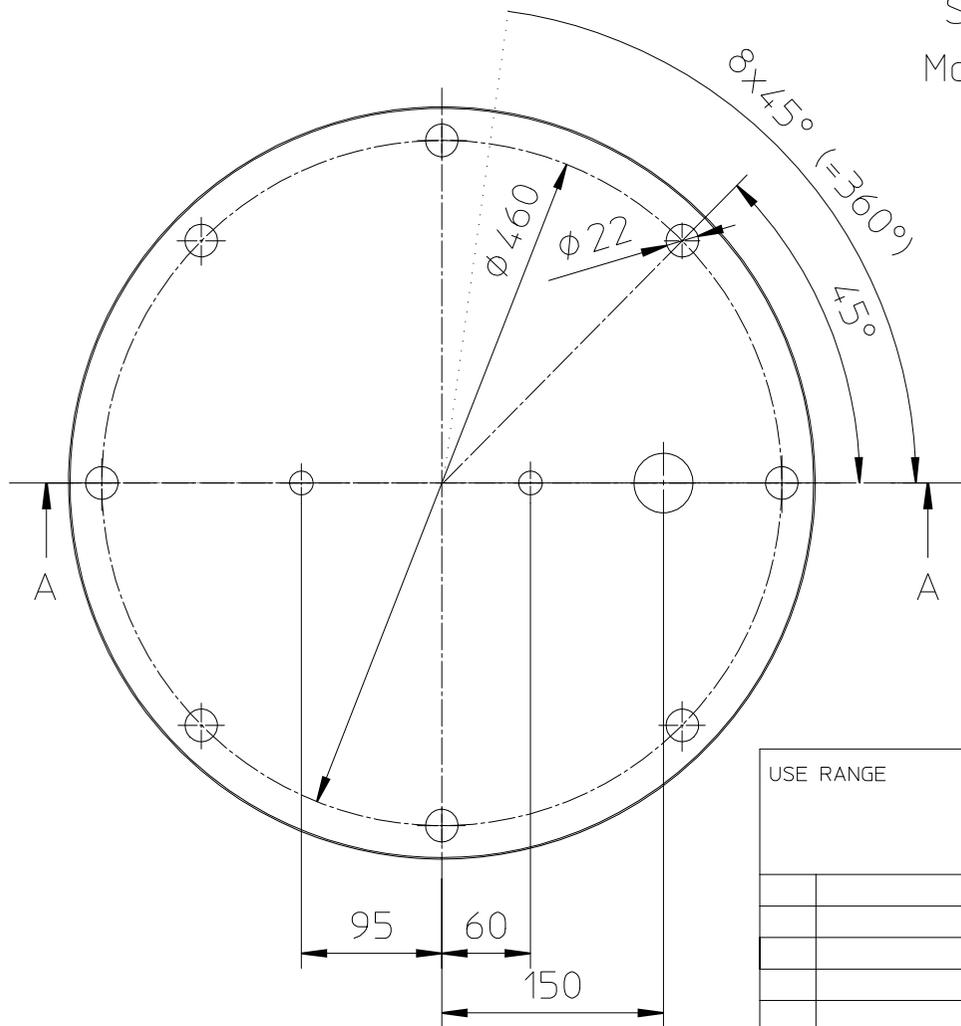


Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:5	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL			
								nichtrostender Stahl			
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN 05.02.11		NADER					
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET
								Kessel-Rohrflansch			1
											OF 1
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.			

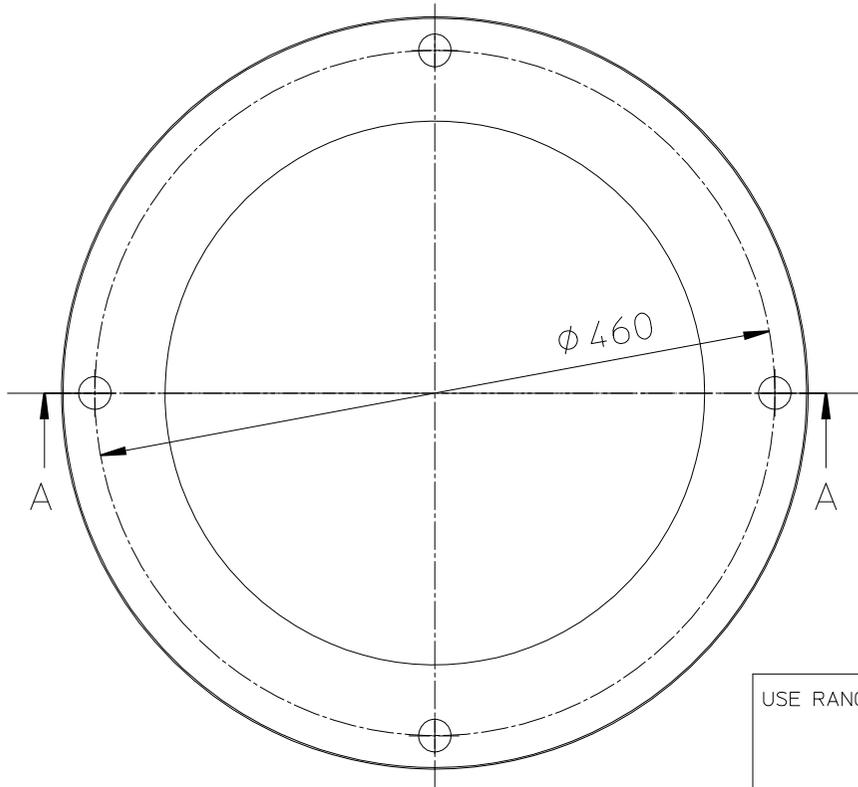
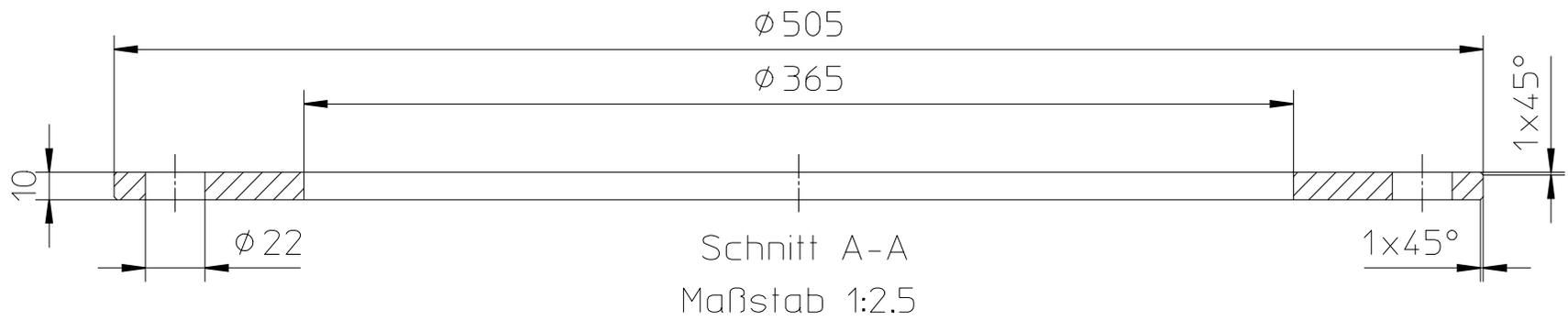


Schnitt A-A
Maßstab 1:2



Ra 3.2

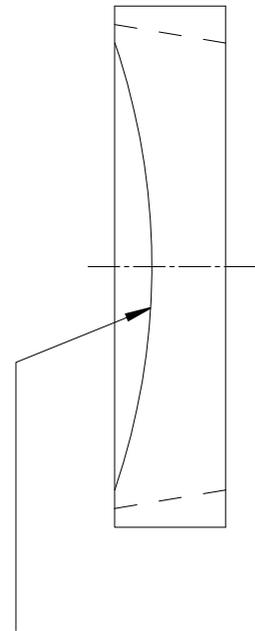
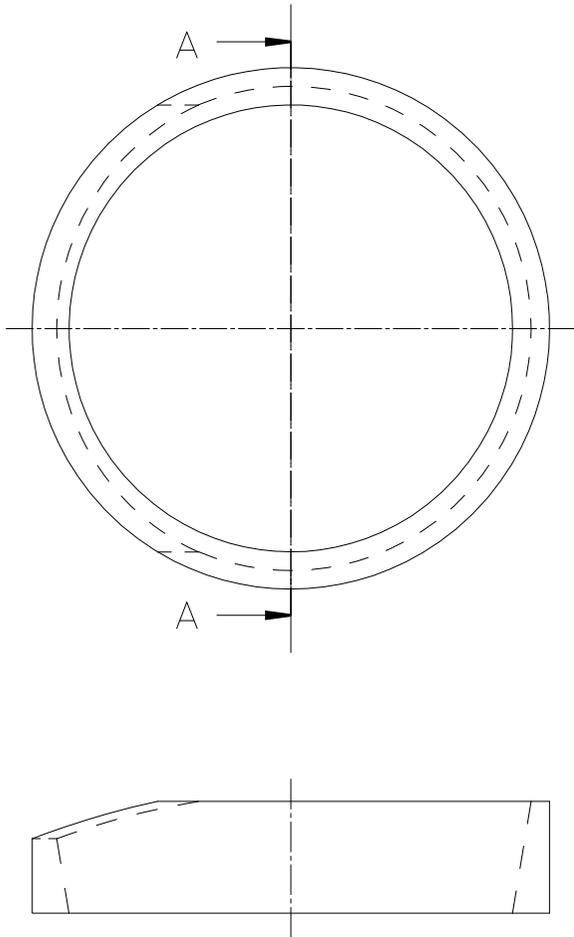
USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:5	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL			
								nichtrostender Stahl			
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN 05.02.11		NADER					
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			
								Kessel-Deckel			
								SHEET 1			
								OF 1			
INDEX DESCRIPTION		DATE		NAME		ORIGINAL		I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	



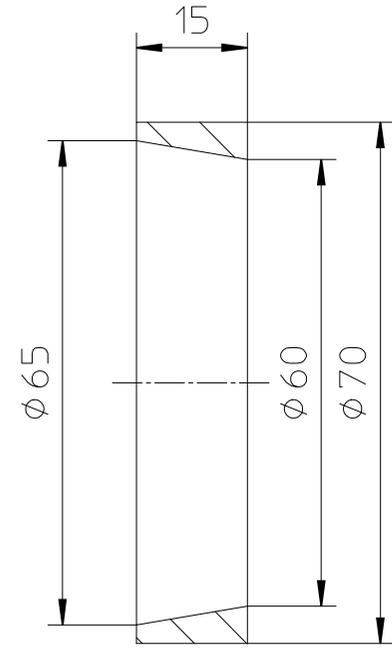
Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:5	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL			
								nichtrostender Stahl			
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN 05.02.11		NADER					
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET
								Gestell-Flansch			1
								I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	
INDEX	DESCRIPTION			DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.	I.EXCH.TH.			

OF 1



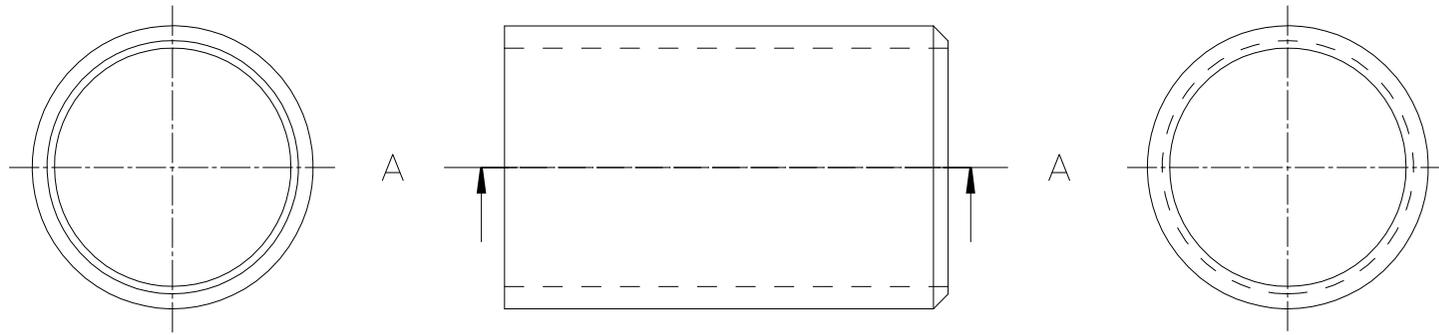
Einkerbung nach Bedarf
beim Zusammenbau



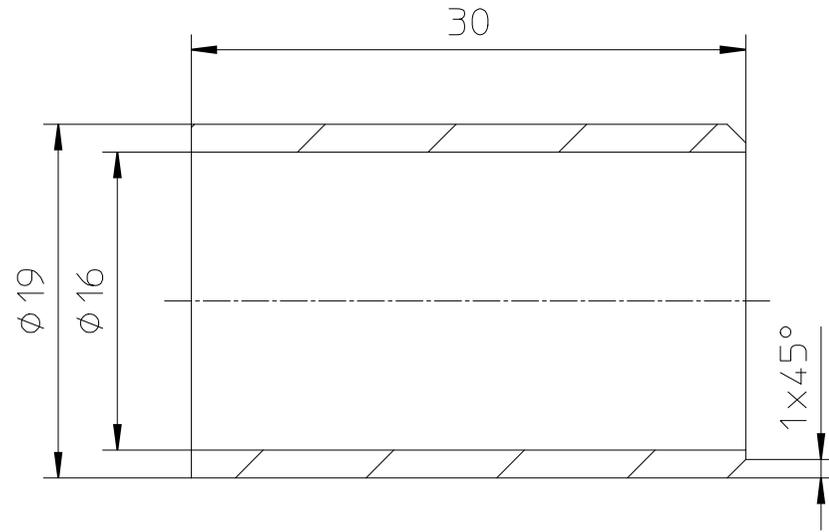
Schnitt A-A

Ra 3.2

USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 1:1	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
								DESCRIPTION			
				DRAWN		DATE		NAME			
				APPR.		05.02.11		NADER			
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			
								Zentrierung			
								SHEET 1 OF 1			
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.			

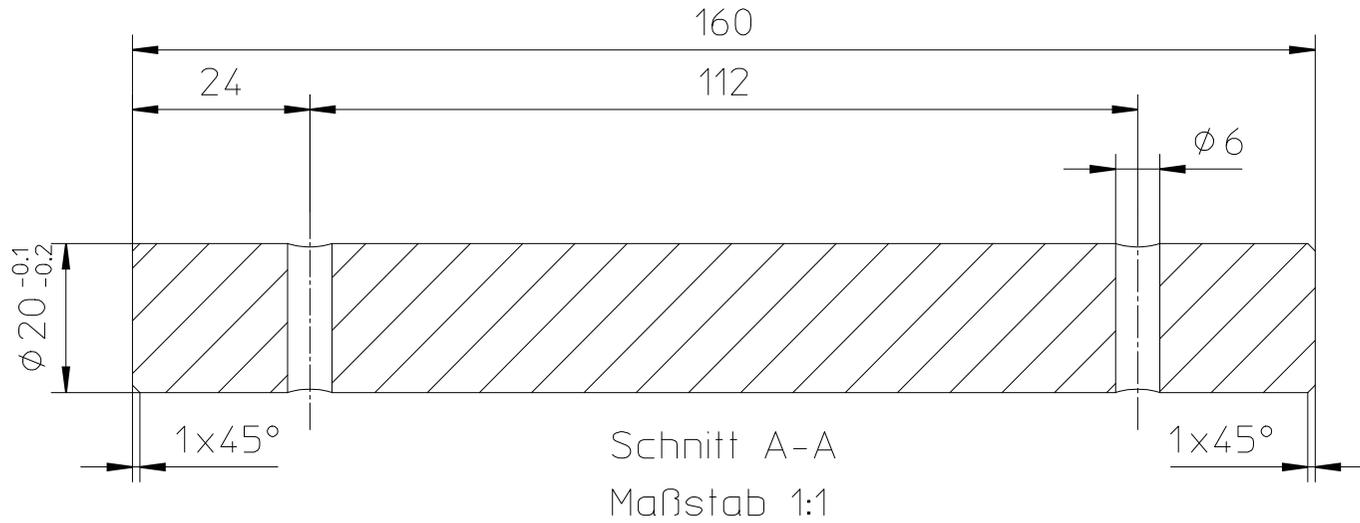
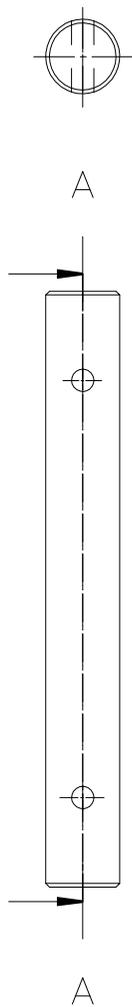


Schnitt A-A
Maßstab 2.5:1



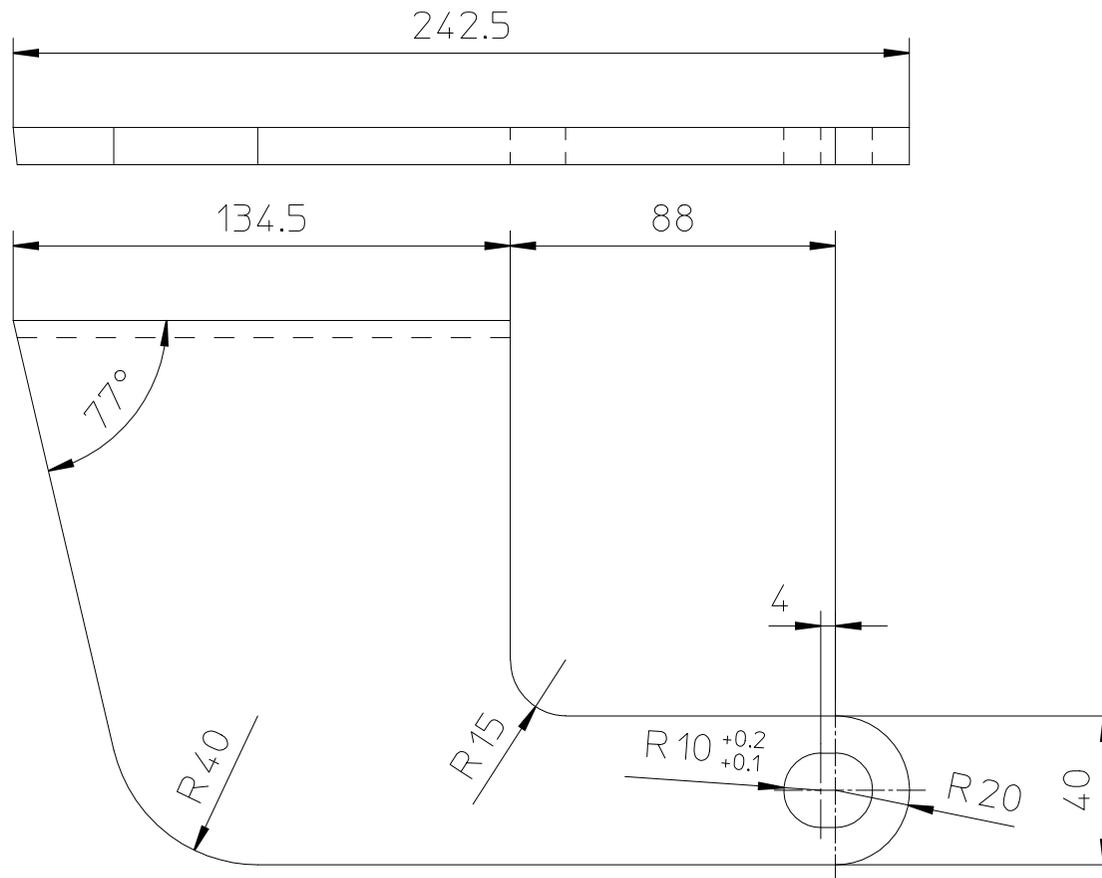
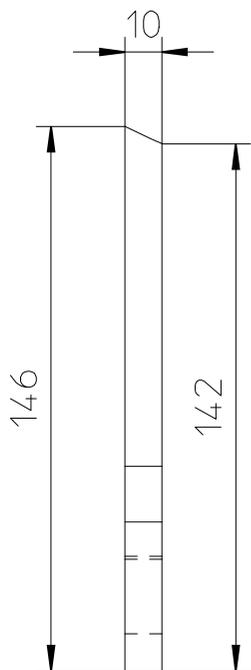
Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE DIN 2768 mK		SURFACE DIN 1302		ARCHIVE		SCALE 2:1	
								MATERIAL nichtrostender Stahl			
				DATE 05.02.11		NAME NADER		DESCRIPTION			
				DRAWN							
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER Stutzen			SHEET 1
											OF 1
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL			I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.	



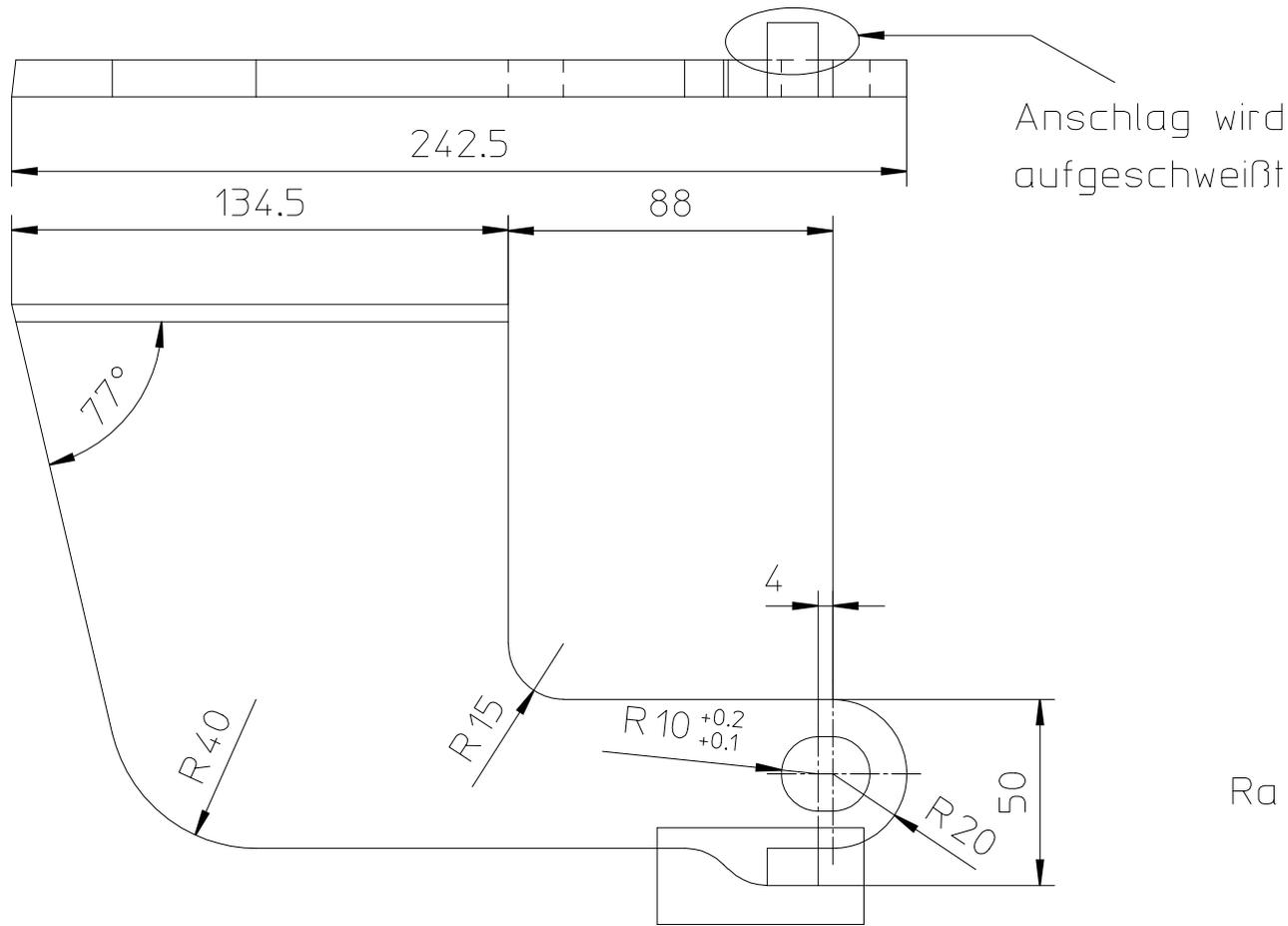
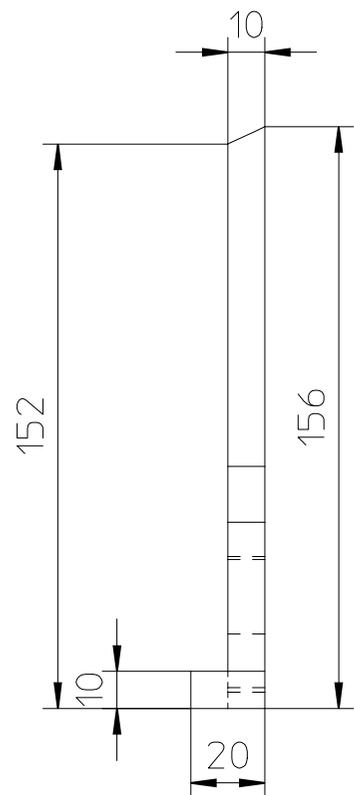
Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:2		
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL				
								nichtrostender Stahl				
				DATE		NAME		DESCRIPTION				
				DRAWN 12.02.11		NADER						
				APPR.								
				RLS.								
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET	
								Bolzen			1	
											OF 1	
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.				



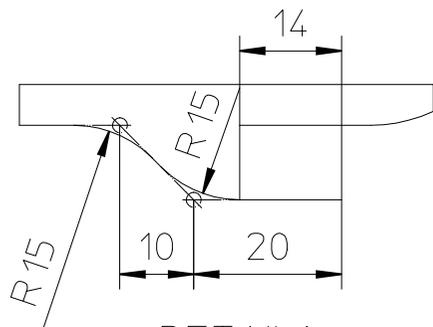
Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:2		
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL				
								nichtrostender Stahl				
				DATE		NAME		DESCRIPTION				
				DRAWN		NADER						
				APPR.								
				RLS.								
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET	
								Scharnierbügel			1	
											OF 1	
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL				I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.		



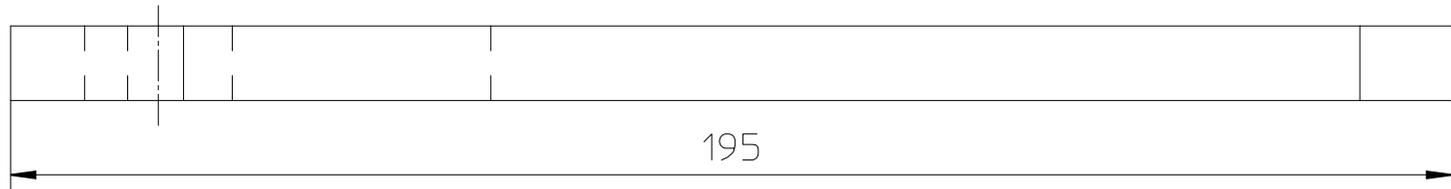
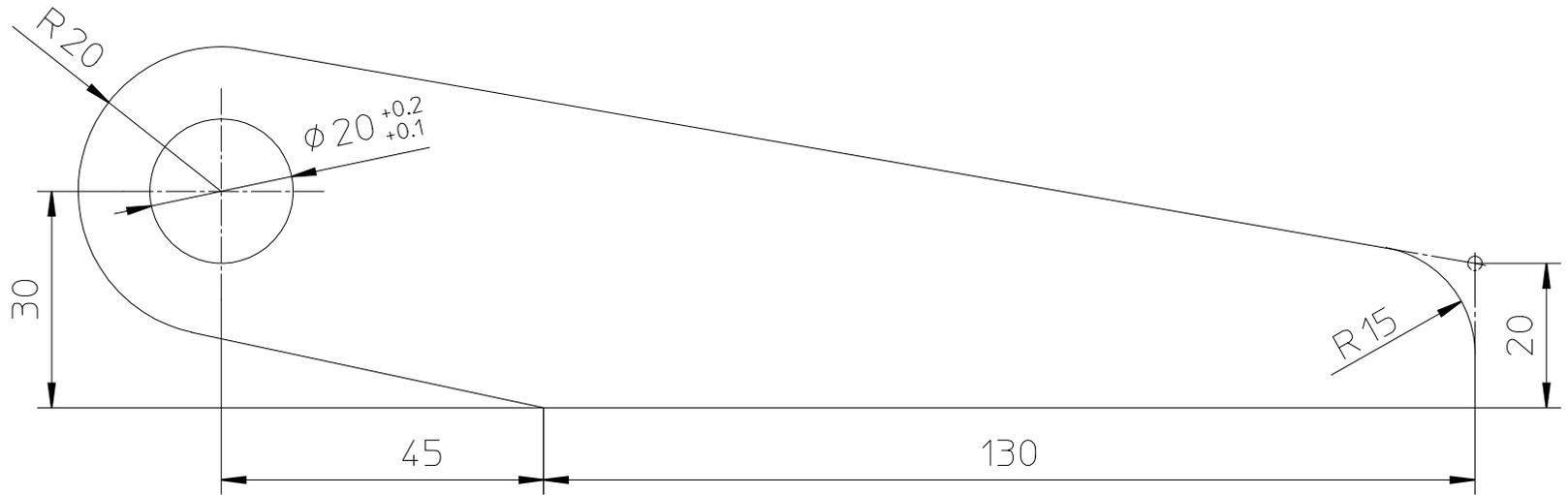
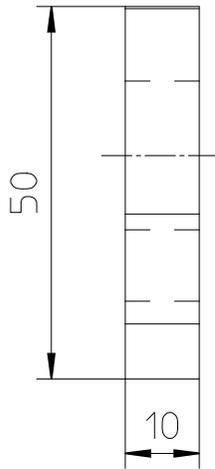
Ra 3.2

siehe DETAIL1



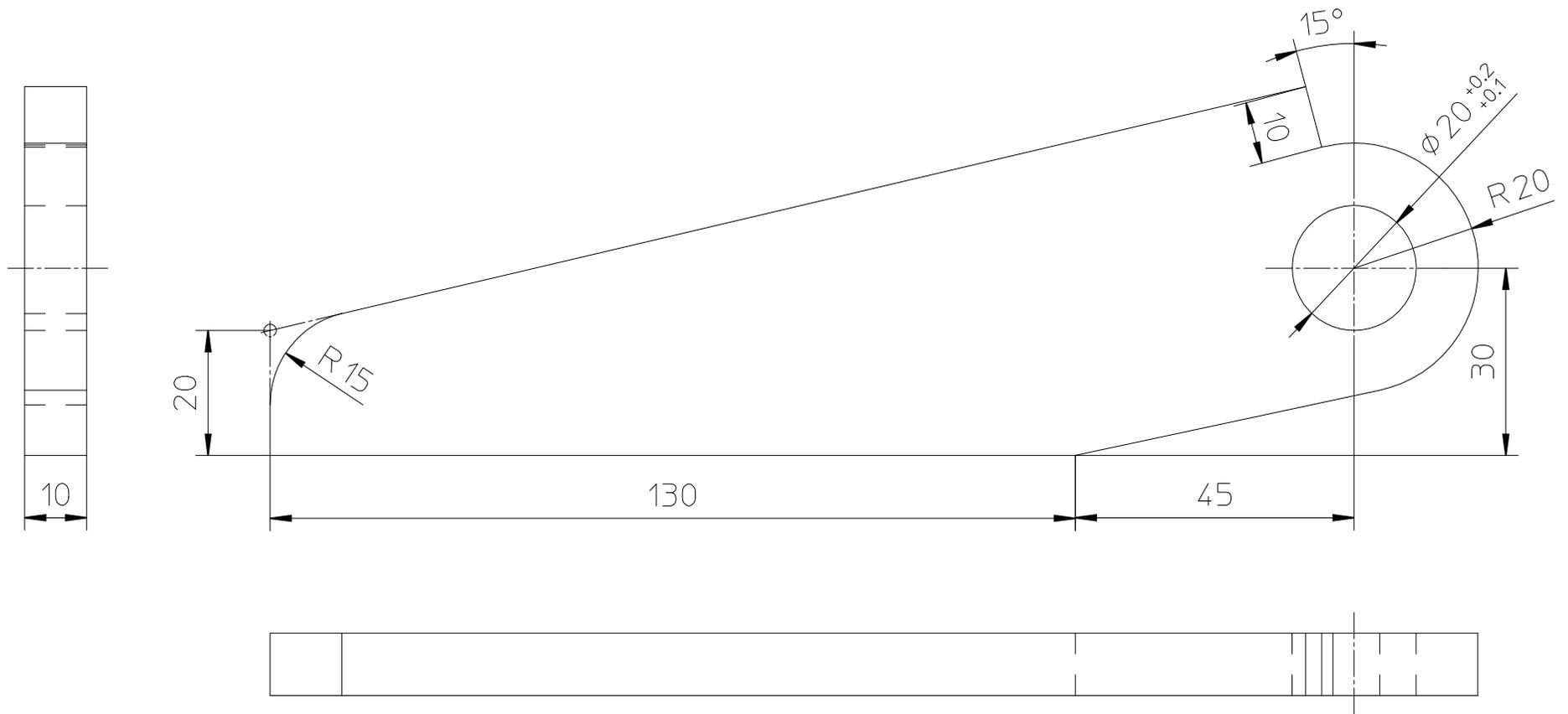
DETAIL1
Maßstab 1:1

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:2	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL			
								nichtrostender Stahl			
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN 12.02.11		NADER					
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER		SHEET	
								Scharnierbügel mit Stopper		1	
INDEX DESCRIPTION				DATE		NAME		I.EXCH.F.		I.EXCH.TH.	
										OF 1	



Ra 3.2/

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:1		
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL				
								nichtrostender Stahl				
				DATE		NAME		DESCRIPTION				
				DRAWN 12.02.11		NADER						
				APPR.								
				RLS.								
				TU Graz				DRAWING-NUMBER			SHEET	
								Scharnierlasche			1	
											OF 1	
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	I.EXCH.F.			I.EXCH.TH.				



$Ra\ 3.2$

USE RANGE				TOLERANCE		SURFACE		ARCHIVE		SCALE 1:1	
				DIN 2768 mK		DIN 1302		MATERIAL		nichtrostender Stahl	
				DATE		NAME		DESCRIPTION			
				DRAWN		12.02.11		NADER			
				APPR.							
				RLS.							
				TU Graz				DRAWING-NUMBER		SHEET	
								Scharnierlasche mit Stopper		1	
										OF 1	
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL				I.EXCH.F.	I.EXCH.TH.		