

# Überwachung und Steuerung einer Transformatortrocknung mittels dielektrischer Antwort

Autor:

David Schmidt

14. Dezember 2018



Hochschule Magdeburg Stendal

Fakultät für Elektrotechnik

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Maik Koch

Zweiter Gutachter: Dr.-Ing. Martin Anghuber

Betreuer: Heiko Kuchelmeister

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Erklärung	II
Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	IX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit . . . . .	4
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Wasser im Transformator</b>	<b>6</b>
2.1 Grundlagen zur Feuchtigkeit . . . . .	6
2.2 Aufbau der Öl-Papier-Isolierung . . . . .	11
2.3 Wasserquellen in Transformatoren . . . . .	18
2.4 Negative Effekte durch relative Feuchte . . . . .	24
2.5 Messen der Feuchtigkeit . . . . .	26
2.6 Trocknung des Leistungstransformators . . . . .	28
<b>3 Dielektrische Antwort</b>	<b>34</b>
3.1 Der Verlustfaktor . . . . .	34
3.2 Polarisierung . . . . .	35
3.3 Polarization and Depolarization Currents (PDC) . . . . .	40
3.4 Frequency Domain Spectroscopy (FDS) . . . . .	44
3.5 Auswertung der dielektrischen Antwort . . . . .	47
3.6 Messen einer Transformatortrocknung . . . . .	50
<b>4 Realisierung</b>	<b>54</b>
4.1 Planung . . . . .	54

4.2	Das Lösungskonzept . . . . .	55
4.3	Automatisierung der Trocknung . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Messungen und Auswertung</b>	<b>70</b>
5.1	Trocknung eines 25 MVA-Aktivteils . . . . .	70
5.2	Trocknung eines 1600 kVA-Aktivteils . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Ansätze für weitere Optimierungsmöglichkeiten</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>79</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>81</b>

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die diese Masterarbeit ermöglicht haben. Als Erstes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Maik Koch und Herrn Dr.-Ing. Martin Anghuber für die Beratung in allen Fragen rund um die dielektrische Antwort und dafür, dass sie die Überprüfung dieser Arbeit übernehmen.

Ich danke meinem Betreuer Herrn Heiko Kuchelmeister, der mich während der Arbeit mit seinem Wissen über Transformatortechnik und der Trocknung großartig unterstützt hat. Die zahlreichen fachlichen und auch privaten Diskussionen waren für mich sehr motivierend.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Theodor Schmied für die Programmierung der SPS und starke Unterstützung bei allen Fragen rund um die Automation.

Ich danke meinem guten Freund Martin Johr für die erste Korrekturlesung und für die Hilfe bei der Programmierung mit Autohotkey.

Auch möchte ich meiner Familie für die Unterstützung danken. Ohne die Motivation durch meine Freundin Jenny, meinen Bruder Christian und meine Eltern wäre ich jetzt nicht an diesem Punkt. Meinem Sohn möchte ich dafür danken, dass er mich zwischen der Arbeit aufgeheitert hat und mir gezeigt hat, wofür ich hier stehe.

Danke!

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, David Schmidt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig, ohne unerlaubte Hilfe und nur mit den angegebenen Quellen angefertigt habe. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

David Schmidt

Magdeburg, 01.12.2018

# Abkürzungsverzeichnis

<b>DF</b>	dissipation factor dt.:Verlustfaktor
<b>FDS</b>	frequency Domain spektroskopie
<b>OIP</b>	Ölimprägniertes Papier
<b>PDC</b>	polarization and depolarization current
<b>AHK</b>	Autohotkey
<b>SPS</b>	Speicherprogrammierbare Steuerung

# Formelzeichenverzeichnis

$W$	Wassergehalt in % oder <i>ppm</i>
$m_{H_2O}$	Wassermasse
$m_d$	Trockenmasse
$m_{as}$	Gesamtmasse
$P$	Druck in <i>mbar</i>
$p$	Partialdruck
$p_s$	Sättigungsdampfdruck
$RH$	Relative Feuchtigkeit
$RS$	Relative Sättigung
$a_w$	Wasseraktivität
$T$	Temperatur
$\psi$	Wasserpotential
$Q$	Wärme
$C$	Kapazität
$\varepsilon$	Permittivität
$\alpha$	Polarisierbarkeit
$I_R$	ohmscher Strom
$I_C$	kapazitiver Strom
$p_{Dip}$	Dipolmoment

---

$P_{pol}$	Polarisation
$Q$	elektrische Ladung
$\tan \delta$	Verlustfaktor
$J_l$	Leitungsstromdichte
$J_v$	Verschiebungsstromdichte
$\chi$	Suszeptibilität
$H(t)$	Magnetisches Feld
$E(t)$	Elektrisches Feld
$D(t)$	Elektrische Flussdichte
$i_{pol}$	Polarisationsstrom
$i_{depol}$	Depolarisationsstrom
$U$	elektrische Spannung
$t$	Zeit
$\sigma$	elektrischer Leitwert
$\omega$	Kreisfrequenz

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Feuchtigkeit im Transformator (Quelle: Siemens) . . . . .	2
1.2	Lebensdauer von Transformatoren in Abhängigkeit ihrer Feuchtigkeit [Koc08] . . . . .	2
2.1	Öl mit $T = 70\text{ °C}$ , $W_S = 500\text{ ppm}$ , $W_{\text{Öl}} = 200\text{ ppm}$ , $a_W = 0,4$ . . . . .	9
2.2	Öl mit $T = 30\text{ °C}$ , $W_S = 300\text{ ppm}$ , $W_{\text{Öl}} = 200\text{ ppm}$ , $a_W = 0,67$ . . . . .	9
2.3	Öl mit $T = 30\text{ °C}$ , $W_S = 150\text{ ppm}$ , $W_{\text{Öl}} = 200\text{ ppm}$ , $a_W = 1,3$ und freiem Wasser . . . . .	10
2.4	Molekularer Aufbau der Zellulose [Küc05] . . . . .	12
2.5	Bindung von Wassermolekülen in Zellulose [KT06] . . . . .	13
2.6	Allgemeine Ad- und Desorptions-Isotherme [GSV08] . . . . .	14
2.7	Gemessene Sorptionsisotherme zweier verschiedener Zellulosen bei unterschiedlicher Temperatur [GSV08] . . . . .	15
2.8	Bestandteile Transformatorenöl [Küc05] . . . . .	16
2.9	Wassersättigung für neues Isolieröl, gealtertes Öl und Silikonöl [KT06] . . . . .	17
2.10	Wassergehalt in Isolieröl und Zellulose im Gleichgewichtszustand bei verschiedenen Temperaturen [Küc05]. . . . .	18
2.11	Gesteigerter Wasseranteil als Funktion der Anzahl der Depolymerisationen unterschiedlicher Literaturquellen (Chain scissions) [GSV08] . . . . .	19
2.12	Depolymerisationerwärmung durch Hot-Air-Vakuum Trocknung [Str00] . . . . .	20
2.13	Wasserquellen während des normalen Betriebes . . . . .	22
2.14	Wasseraufnahme einer 3mm dicken Papierisolierung bei 20°C [GSV08] . . . . .	23

---

2.15	Alterungsvorgänge im Isolationssystem des Transformators . . . . .	25
2.16	Blasenbildung in einer Pore [Koc06] . . . . .	25
2.17	Durchschlagsfeldstärke in Isolieröl als Funktion der Gewichtsfeuchte in ppm (links) oder als Funktion der relativen Feuchte (rechts) [Koc06]	26
2.18	Funktionsweise eines Kapazitiven Dünnsfilmsensors [Koc06] . . . . .	27
2.19	offenes Aktivteil bei Firma Miebach kurz vor der Trocknung . . . . .	28
2.20	Prozessbeschreibung eines Hot Air Trocknungsverfahrens für Trans- formatoren [Str00] . . . . .	29
2.21	Aufbau eines Hot-Air-Vakuum-Ofens [Str00] . . . . .	30
2.22	Partialdruck des Wassers im Papier in Abhängigkeit der Temperatur während der Papier-Trocknung [Str00] . . . . .	32
3.1	Ersatzschaltbild eines verlustbehafteten Kondensators mit Zeigerdia- gramm. . . . .	34
3.2	Elektronenpolarisation [Sch16] . . . . .	36
3.3	Ionenpolarisation in Gitterstrukturen [Sch16] . . . . .	37
3.4	Dipolmoment der Ionenpolarisation [Fas05] . . . . .	37
3.5	Ionenpolarisation, ungeordnete Dipole links, ausgerichtete Dipole rechts [Sch16] . . . . .	38
3.6	Grenzflächenpolarisation [Sch16] . . . . .	39
3.7	Aufbau einer PDC Messung [Zae03] . . . . .	42
3.8	Verlauf des Polarisations- und Depolarisationsstromes [Zae03] . . . . .	44
3.9	Durch Überlagerung der dielektrischen Eigenschaften der einzelnen Isolationsmaterialien ergibt sich die gesamte dielektrische Antwort der Isolierung [Koc08] . . . . .	47
3.10	Dielektrische Antwort einer Öl-Papier-Isolierung [Koc08] . . . . .	48
3.11	Dielektrische Antwort der Zellulose [RAK12] . . . . .	48
3.12	Darstellung der Isolationsgeometrie als Kondensator, bestehend aus zwei Materialien mit Hilfe des XY-Modells [Koc08]. . . . .	49
3.13	Dielektrische Antwort von nicht imprägnierter Zellulose mit verschie- denen Wassergehalten bei 20°C [RAK12] . . . . .	50

---

3.14	Erweiterung der Isolationsgeometrie um Luft beziehungsweise Vakuum. . . . .	51
3.15	Schematische Darstellung des Messaufbaus [RAK12] . . . . .	52
3.16	Dielektrische Antwort sowie die ausgewerteten Restfeuchten während der Trocknung eines Verteiltransformators [RAK12] . . . . .	53
4.1	Konzept zur Automatisierung des Ofens . . . . .	55
4.2	S7-1200 CPU 1214C und Analog-Signalmodul SM 1231 RTD . . . . .	58
4.3	Analog-Signalmodul SM 1231 RTD mit Zweileitermessung zur Temperaturmessung [Sie10] . . . . .	59
4.4	PT-100 Temperaturmesswiderstand in der Papierisolierung während der Trocknung . . . . .	60
4.5	vereinfachte Darstellung der Ansteuerung der S5-100U-Eingänge durch die S7-1200-Ausgänge . . . . .	61
4.6	vereinfachtes Petrinetz des Trocknungsprogrammes . . . . .	62
4.7	vereinfachte Darstellung der strukturierten Programmierung des Trocknungsprogrammes . . . . .	64
4.8	das DIRANA von der Firma Omicron bestimmt den Feuchtegehalt von Leistungstransformatoren [Omi18] . . . . .	66
4.9	Auswahl des Leistungstransformators mit 2 Wicklungen als Prüfobjekt	66
4.10	Einstellen der Messpunkte der FDS-Messung und Dauer der PDC-Messung . . . . .	67
4.11	Userinterface zur Konfigurierung der S7 und zum Starten der vollautomatischen Trocknung . . . . .	69
5.1	Messung der dielektrischen Antwort einmal mit und einmal ohne Durchführung . . . . .	70
5.2	Kurzschluss der Unterspannungsseite des 25 MVA Aktivteils . . . . .	71
5.3	Kurzschluss der Oberspannungsseite des 25 MVA Aktivteils . . . . .	71
5.4	erste geloopte Messung: Trocknung des 25 MVA Aktivteils . . . . .	72
5.5	Verlauf der Trocknung des 25 MVA Aktivteils . . . . .	72

---

5.6	Treibende Druckpotentiale $\Delta p_1$ und $\Delta p_2$ . Ursprüngliche Quelle: [Str00], Eingezeichnete Potentiale durch den Autor dieser Masterarbeit . . . . .	73
5.7	Polarisationsstrom der PDC-Messung bei Stunde 68 . . . . .	74
5.8	erste vollautomatische Trocknung eines 1600 kVA Aktivteils . . . . .	75
5.9	Verlauf der Trocknung des 1600 kVA Aktivteils . . . . .	76
5.10	Polarisationsstrom der ersten dielektrischen Antwortmessung des 1600 kVA Aktivteils . . . . .	77

# 1. Einleitung

## **Feuchtigkeit im Transformator**

Vor der Energiewende wurde Deutschland hauptsächlich durch etwa 300 Großkraftwerke mit jeweils über 100 Megawatt Leistung zentral versorgt. Sinnvoll verortet befanden sich diese großen Erzeugungseinheiten nah an Orten hohen Energiebedarfs. Die erzeugte Leistung wurde auf hohen Spannungsebenen eingespeist und über die untergeordneten Spannungsebenen an die Bedarfsorte verteilt. Seit mehr als einer Dekade wandelt sich die Energieversorgung jedoch von einer kaskadisch angeordneten Versorgungshierarchie zu einer dezentralen, auf mehrere Spannungsebenen verteilten Energieerzeugung, welche sowohl nah als auch fern großer Verbrauchszentren liegt. In Zukunft wird die Versorgung somit durch mehr als 12 Millionen dezentrale Einspeisepunkte gewährleistet. In diesem Zuge verändert sich das Anforderungsprofil der Energieversorgungsnetze. Durch immer mehr Einspeisung kleiner dezentraler Erzeugungseinheiten in den untergeordneten Spannungsebenen kommt es zu einer Rückspeisung in den überlagerten Spannungsebenen und einer situativ erheblichen Mehrbelastung der Netzkomponenten.

Als Bindeglied der einzelnen Spannungsebenen ist der Transformator eines der wesentlichen Schlüsselemente des elektrischen Netzes. Durch die Wandlung der Spannungshöhe ermöglicht er die Übertragung der elektrischen Energie über mehrere Spannungsebenen und gewährleistet damit einen wirtschaftlichen Energietransport über große Distanzen.

Mit einer Millioneninvestition bei Neuanschaffung, ist der Transformator häufig das teuersten Betriebsmittel. Aus diesem Grund wird stets eine möglichst lange Lebensdauer angestrebt.

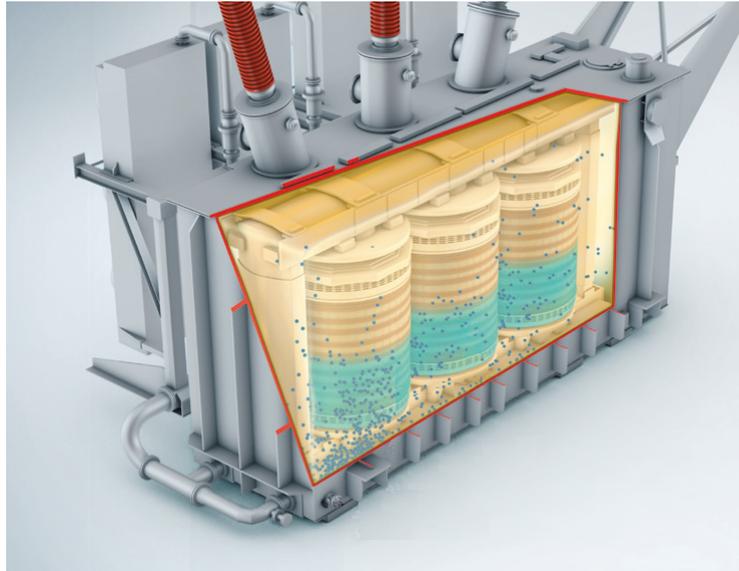


Abbildung 1.1: Feuchtigkeit im Transformator (Quelle: Siemens)

Als Isolierung der meisten Leistungstransformatoren hat sich die Öl-Papier-Isolierung durchgesetzt. Der Feuchtigkeitsgehalt dieser Isolierung ist dabei einer der wichtigsten Parameter zur Einschätzung der verbleibenden Lebensdauer (siehe Abbildung 1.2).

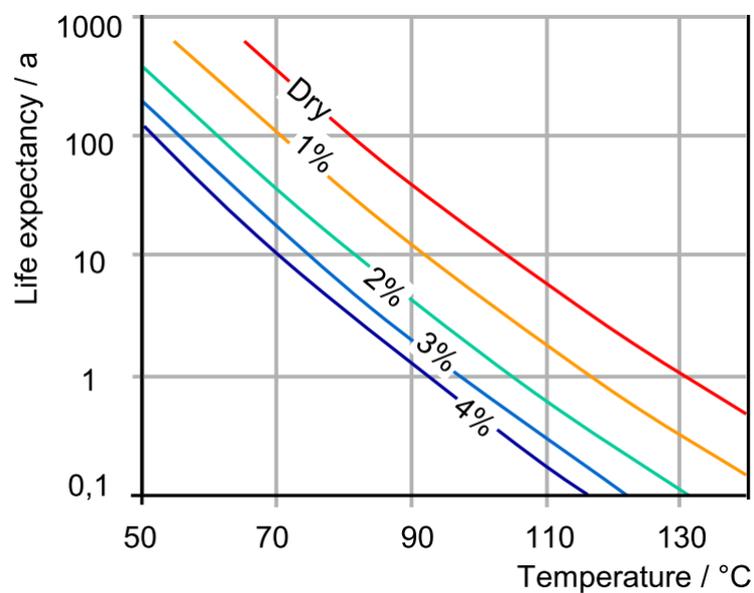


Abbildung 1.2: Lebensdauer von Transformatoren in Abhängigkeit ihrer Feuchtigkeit [Koc08]

Viele ältere ölgefüllte Betriebsmittel sind mit Wasser verunreinigt. Das führt zu einer beschleunigten Alterung der Zellulose durch Hydrolyse. Dabei zerfallen die langen

Zelluloseketten. Die Folgen sind eine noch stärkere Alterung, eine Reduzierung der Durchschlagsfestigkeit und eine Reduzierung der mechanischen Festigkeit. Die Konsequenzen sind Fehler im Transformator und ein gesteigertes Ausfallrisiko.

Im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes führte der stärkere ökonomische Trend zur Umstellung von einer Zeit-basierten auf eine Zustands-basierte Instandhaltung. Dadurch wurde die Etablierung neuer Monitoringsysteme zur Diagnoseprüfung und Zustandsbewertung notwendig.

Ein zentraler Analysemechanismus ist die dielektrische Antwortmessung. Diese lässt eine Bestimmung des Wassergehalts einer Feststoffisolierung aus Papier zu.

Aus Isolationsgründen befindet sich zwischen den Wicklungen der Ober- und Unterspannungsseite des Transformators der größte Teil der Öl-Papier-Isolierung. Im Rahmen des Messverfahrens wird der frequenzabhängige Verlustfaktor sowie der Polarisationsstrom dieser Isolierung bestimmt. Anschließend werden die Messergebnisse mit einer Datenbank abgeglichen und die Feuchtigkeit des Transformators berechnet.

Transformatoren, deren Diagnose ein erhöhtes Ausfallrisiko birgt, werden als Präventivmaßnahme in einer Transformatorwerkstatt instand gesetzt. Dafür wird zunächst das Öl abgelassen und die Aktivteile freigesetzt. Anschließend werden verschiedene Reparaturmaßnahmen durchgeführt. Währenddessen nimmt die Papierisolierung Feuchtigkeit aus der Umgebung auf, welche es durch Trocknung wieder zu entfernen gilt. Dabei die angemessene Trocknungszeit für den Transformator zu finden, erweist sich als schwierig. Denn jeder Transformator ist mit all seinen Eigenheiten und seinem Vorleben im weiteren Sinne ein Unikat.

Bisher beruht die Trocknungszeit nach der Revision meistens auf Erfahrungen. Eine Überprüfung der restlichen Feuchtigkeit ist oft erst nach der Trocknung möglich. Wenn bei der endgültigen Qualitätskontrolle der erlaubte Wassergehalt überschritten wird, muss unter hohem Zeit- und Kostenaufwand nachgetrocknet werden. Aus diesem Grund wird der Transformator meist länger getrocknet, als es notwendig ist, was einen größeren Primärenergiebedarf und erhöhte Wartezeiten für den Netzbetreiber zur Folge hat.

Eine Optimierung des Messverfahrens stellt somit ein immenses Verbesserungspotential für die Lebensspanne der eingesetzten Transformatoren dar und ist daher von zentralem Interesse für die Netzbetreiber. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Optimierung eines entsprechenden Trocknungsverfahrens erzielt. Das genaue Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Das Hauptgebiet der Firma Miebach Elektrotechnik GmbH & Co. KG in Magdeburg ist die Werksinstandsetzung von Transformatoren und E-Spulen. Nach der Revision wird das Aktivteil des Transformators meist getrocknet. Dafür wird es in einen Vakuumofen gefahren und bis auf ca. 60 °C erhitzt. Anschließend wird der Ofen evakuiert. Infolge der Erwärmung und Druckabsenkung diffundiert das Wasser aus der Papierisolierung.

Diese Vakuumtrocknung wurde bisher von dem Anlagenfahrer manuell gesteuert. Ziel dieser Arbeit ist es den Trocknungsvorgang zu automatisieren und mit Hilfe eines Monitoringsystem auf Basis der dielektrischen Antwortmessung zu optimieren.

Aufgaben im Detail:

1. Literaturrecherche
2. Untersuchung der Vorgänge durch Wasser im Transformator
3. Untersuchung der Vorgänge während der Trocknung
4. Beschreibung der dielektrischen Antwortmessung zur Bestimmung des Wassergehalts
5. Anwendung der dielektrischen Antwort für das Monitoring während der Trocknung
6. Programmierung und Installation einer Speicherprogrammierbaren Steuerung
7. Verknüpfung der dielektrischen Antwortmessung und der Steuerung mittels Autohotkey
8. Überwachen und Auswerten der Trocknung eines Aktivteils
9. Schriftliche Dokumentation und Auswertung aller Ergebnisse, sowie der einzelnen Vorgehensweisen

## 1.2 Struktur der Arbeit

Zunächst soll eine Literaturrecherche betrieben werden. Zweck ist es die Vorgänge, welche durch Wasser im Transformator ausgelöst werden, zu untersuchen. Daraus abgeleitet soll der Trocknungsvorgang erklärt werden. Des Weiteren soll die dielektrische Antwort für die Feuchtigkeitsmessung der Trocknung untersucht werden.

Kapitel 2 fasst die Ergebnisse der Literaturreche zur Feuchtigkeit im Transformator zusammen und beschreibt den Trocknungsvorgang. Anschließend wird in Kapitel 3 das dielektrische Antwortmessverfahren als Monitoringsystem für die Trocknung beschrieben.

In Kapitel 4 wird die Realisierung des Projektes umschrieben. Dabei wird zunächst ein Lösungskonzept für die Verknüpfung aller Komponenten, welche für die Automatisierung notwendig sind, vorgestellt. Anschließend wird das Programm für die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) beschrieben. Im Anschluss wird die Verknüpfung der SPS mit der dielektrischen Antwortmessung durch Autohotkey erörtert. In Kapitel 5 werden die Messergebnisse durch die dielektrische Antwort ausgewertet. Anschließend werden, auf Basis dieser Auswertung und der Literaturrecherche, mögliche Ansätze zur weiteren Optimierung des Trocknungsvorganges untersucht. Schließlich folgt eine wirtschaftliche Betrachtung. Schließlich werden in Kapitel 7 die Ergebnisse zusammengefasst und präsentiert.

# 2. Wasser im Transformator

## 2.1 Grundlagen zur Feuchtigkeit

### Absolute und relative Feuchtigkeit

Für die Betrachtung der Feuchtigkeit ist es notwendig einheitliche Bezeichnungen und Einheiten zu verwenden, daher sollen folgend die Grundlagen auf Basis der Literatur der Cigre vorgestellt werden:

Wenn Wasser in einem Material gebunden ist, dann ist der Wassergehalt oder die Gewichtsfeuchte  $W$  gleich dem Verhältnis zwischen der Wassermasse  $m_{H_2O}$  und der Materialmasse  $m$ . Zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Zellulose wird der Massegehalt des Wassers in % der Masse und zur Bestimmung der Feuchtigkeit des Öls wird der Massegehalt des Wassers in *ppm* (parts per million) angegeben. Je nach Betrachtung wird die Wassermasse  $m_{H_2O}$  ins Verhältnis zur Gesamtmasse  $m_{as}$  oder zur Trockenmasse  $m_d$  gesetzt [GSV08]:

$$\text{ISO 287 für nicht imprägniertes Papier:} \quad W_{Pa} = \frac{m_{as} - m_d}{m_{as}} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

$$\text{IEC 60814 für Öl-imprägniertes Papier:} \quad W_{OIP} = \frac{m_{as} - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

$$\text{IEC 60814 für Öl in ppm:} \quad W_{\text{Öl}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{as}} \cdot 1.000.000 \quad (2.3)$$

### Sättigungspunkt

Um prüfen zu können wie viel Wasser noch gelöst werden kann oder ob sich bereits freies Wasser, in dem Öl befindet wird neben dem Wassergehalt in *ppm* auch der Sättigungspunkt  $W_s$  benötigt.

Wasser kann nur in polaren Lösungsmitteln gelöst werden. Reines Isolieröl besteht aus apolaren, gesättigten Kohlenwasserstoffen. Technisch reines Isolieröl kann aufgrund von polaren Aromaten und Verunreinigungen eine kleine Menge an gelöstem Wasser aufnehmen. Die maximale Menge, die Öl in gelöster Form enthalten kann, wird als ihr Sättigungspunkt bezeichnet. Dieser hängt zusätzlich von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehört die Zusammensetzung der Grundbausteine des Öls,

ob es mineralisch oder synthetisch ist und welche Additive, Emulgatoren und Oxidationsmittel verwendet wurden. Durch Temperaturwechsel und Aufnahme neuer Substanzen infolge chemischer Reaktionen ändert sich der Sättigungspunkt eines Isolieröls während der Alterung. Der polare Anteil nimmt zu und das Öl kann mehr Wasser lösen [Vai09] .

In Formel 2.3 wurde der Wassergehalt in *ppm* oder % angegeben, doch damit ist keine Aussage über den Sättigungspunkt getroffen. Um Sättigungspunkt und Wassergehalt in Abhängigkeit zueinander darzustellen, ist die Einführung der relativen Sättigung und der Wasseraktivität nötig. Doch zunächst soll der Wasserdampfdruck als eine treibende Kraft vorgestellt werden.

### Wasserdampfdruck /Partialdruck

Der Wasserdampfdruck oder auch Partialdruck  $p$  des Wassers ist eine intrinsische Eigenschaft des Wassers und erhöht sich mit der Temperatur und der relativen Stoffmenge des Wassers innerhalb eines idealen Gases. Der Partialdruck kann als Verhältnis des Produktes von Stoffmenge  $n_i$  und Gesamtdruck  $P$  zur Gesamtstoffmenge  $n_{gesamt}$  beschrieben werden:

$$p = \frac{n_i \cdot P}{n_{gesamt}} \quad (2.4)$$

An der Oberfläche von kochendem Wasser ist der Wasserdampfdruck gleich dem Luftdruck  $P$ . Er kann auch als Teildruck des Luftdrucks  $P$  betrachtet werden. Alle Teildrücke aufaddiert ergeben in einem idealen Gas den Gesamtdruck  $P$ . In Öl oder Zellulose gelöstes Wasser hat ebenfalls einen Partialdruck.

### Sättigungsdampfdruck

Der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck  $p_S$  gibt an bei welchem Partialdruck sich der gasförmige und flüssige bzw. feste Aggregatzustand eines Stoffes im Gleichgewicht befinden. Bei Wasser ist es jener Druck, bei dem das Wasser verdampft.

### Relative Feuchtigkeit

Die relative Feuchtigkeit (englisch: relativ humidity  $RH$ ) ist definiert über das Verhältnis von Partialdruck  $p$  zu Sättigungsdampfdruck  $p_S$  in Gasen:

$$RH = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

### Relative Sättigung

Für Feststoffe gibt die relative Sättigung  $RS$  das Verhältnis von Wassergehalt  $W$  zum Sättigungspunkt  $W_s$  an:

$$RS = \frac{W}{W_s} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

Unter Gleichgewichtsbedingungen ist die relative Sättigung  $RS$  zusätzlich gleich dem Verhältnis von Partialdruck  $p$  des in der Flüssigkeit oder dem Feststoff enthaltenen Wassers zum Sättigungsdampfdrucks  $p_s$  dieses Wassers:

$$RS = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \% \quad (2.7)$$

### Wasseraktivität

Eine weitere wichtige Größe ist die Wasseraktivität  $a_w$  mit:

$$a_w = \frac{p}{p_s} \quad (2.8)$$

und damit auch:

$$a_w \cdot 100 \% = RH \quad (2.9)$$

Es ist ein Maß für die Verfügbarkeit des Wassers zur Anlagerung (Hydratation) von Wassermolekülen. Gleichzeitig gibt die Wasseraktivität  $a_w$  genau wie die relative Feuchtigkeit immer die Differenz zum Sättigungspunkt an.

### Freies Wasser

Ist der Sättigungspunkt erreicht, wird bei weiterer Erhöhung des Wassergehalts oder Absenkung des Sättigungspunktes das Wasser in einer Schicht vom Öl abgeschieden.

Da die meisten Öle eine geringere Dichte als Wasser aufweisen, lagert sich diese Wasserschicht unterhalb des Öls ab. Es entsteht eine Emulsion. Die Schäden, verursacht durch freies Wasser, werden in Abschnitt 2.4 aufgezeigt.

### Anwendung von Wassergehalt, Sättigungspunkt und Wasseraktivität

In folgendem Beispiel soll die Bedeutung der Wasseraktivität bzw. der relativen Sättigung verdeutlicht werden:

In einem alten Transformator befindet sich 70 °C warmes Öl mit einem Wasseranteil  $W_{\text{Öl}} = 200 \text{ ppm}$  der Sättigungspunkt liegt bei dieser Temperatur bei 500 ppm (Abbildung 2.1).

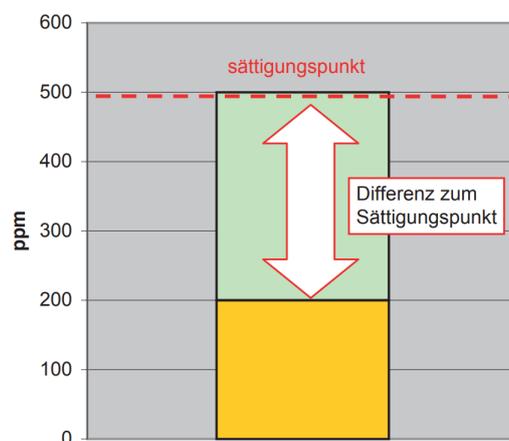


Abbildung 2.1: Öl mit  $T = 70 \text{ °C}$ ,  $W_S = 500 \text{ ppm}$ ,  $W_{\text{Öl}} = 200 \text{ ppm}$ ,  $a_W = 0,4$

Fällt die Temperatur durch einen Lastabwurf um 40 K auf 30 °C, fällt auch die Menge Wasser, die das Öl aufnehmen kann. Es fällt der Sättigungspunkt auf 300 ppm (Abbildung 2.2).

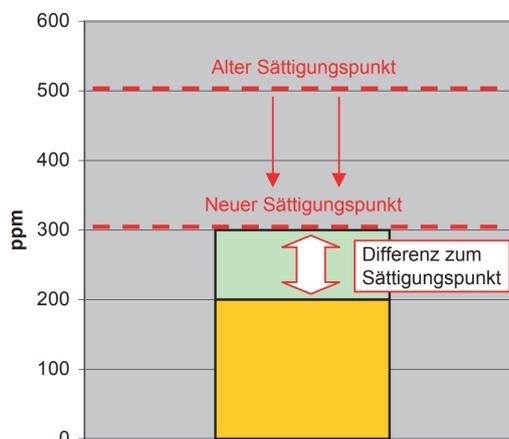


Abbildung 2.2: Öl mit  $T = 30 \text{ °C}$ ,  $W_S = 300 \text{ ppm}$ ,  $W_{\text{Öl}} = 200 \text{ ppm}$ ,  $a_W = 0,67$

Die Differenz zum Sättigungspunkt hat sich auf 100 *ppm* verringert. Wenn der Betreiber der Anlage jetzt eine *ppm*-Messungen vornehmen würde, würde er keine Veränderung des Wassergehaltes feststellen. Er würde den Transformator weiter betreiben, obwohl der Wassergehalt nur noch 100 *ppm* vom Sättigungspunkt entfernt ist. (siehe Abbildung 2.2). Das Risiko der Bildung von freiem Wasser wäre jetzt signifikant höher.

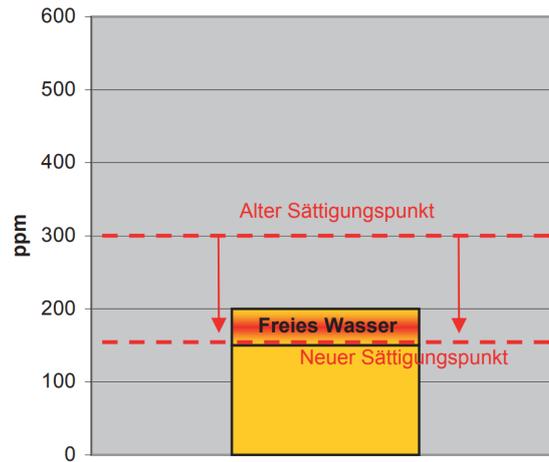


Abbildung 2.3: Öl mit  $T = 30 \text{ °C}$ ,  $W_S = 150 \text{ ppm}$ ,  $W_{\text{Öl}} = 200 \text{ ppm}$ ,  $a_W = 1,3$  und freiem Wasser

Wenn der Sättigungspunkt infolge chemischer Veränderung des Öls weiter auf  $W_S = 150 \text{ ppm}$  abfällt, kann das Öl 50 *ppm* des Wassers nicht mehr aufnehmen. Es entsteht freies Wasser mit all seinen negativen Folgen.

### Wasserpotential

Um zu verstehen, warum das Wasser per Diffusion durch die Isolierung wandert, ist es notwendig den Begriff des Wasserpotentials  $\Psi$  einzuführen. Das Wasserpotential ist ein auf Druck skaliertes thermodynamisches Potential. Es ist ein Maß für die Arbeit, die geleistet werden muss, um bei konstantem Druck und konstanter Temperatur ein Einheitsvolumen Wasser aus einem Referenzzustand dem System zuzuführen. Koch und Tenbohlen [KT06] schreiben, dass  $\Psi$  auch als Funktion der Wasseraktivität  $a_W$  und der Temperatur  $T$  mit der Gaskonstanten  $R$  und der Molekülmasse des Wassers  $M_W$  wie folgt beschrieben werden kann:

$$\Psi = \frac{R \cdot T}{M_W} \cdot \ln(a_W) \quad (2.10)$$

Wird in Formel 2.10 die Formel 2.8 eingesetzt ergibt das:

$$\Psi = \frac{R \cdot T}{M_W} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_s}\right) \quad (2.11)$$

Es geht hervor, dass zwischen zwei Orten unterschiedlicher Wasserpotentiale  $\Psi$  bei gleicher Temperatur das Wasser durch den größeren Partialdruck vom größeren zum kleineren Wasserpotential wandert. Ist der Partialdruck danach überall gleich, entsteht ein Gleichgewichtszustand.

Daraus lässt sich schließen, dass Feststoffe wie die Zellulose aber auch Flüssigkeiten wie Öl und Gase wie Luft bei konstanter Temperatur so lange Wasser austauschen bis ein Gleichgewicht der relativen Feuchtigkeit bzw. Sättigung eintritt:

$$\frac{p}{p_s} \cdot 100 \% = \frac{W}{W_S} = RH = RS \quad (2.12)$$

Ist dieses Gleichgewicht erreicht, ist die Entropie für dieses System maximal.

## 2.2 Aufbau der Öl-Papier-Isolierung

Öl-Papier-Isoliersysteme sind in der Hochspannungstechnik weit verbreitet. Sie werden nicht nur im Transformator, sondern auch in Hochspannungsdurchführungen, Kabeln, Messwandlern oder Kondensatoren angewendet. Nach Zink [Zin13] sind die Hauptanwendungen für das Papier:

- Träger- bzw. Strukturmaterial mit mechanischen Aufgaben
- Unterteilung eines größeren Ölspaltes in mehrere kleine Ölspalte
- Abstandshalter zur definierten Trennung potentialführender Leiter
- als „Imprägnierdocht“, welcher vollständig und frei von Hohlräumen von Isolieröl durchdrungen werden kann

Dabei wird das Papier nicht alleine, sondern immer als ölprägniertes Papier OIP verwendet, denn nur durch das Imprägnieren des Papiers mit Öl kann die sehr hohe elektrische Festigkeit von über  $100 \text{ kV/mm}$  erreicht werden. Auf diese Weise sollen vor allem Teilentladungen und elektrischer Durchschlag vermieden werden. Ein weiterer Vorteil des Öls ist sein Einsatz als Kühlmittel, da es mit Hilfe der Zirkulation für eine bessere Wärmeverteilung im Transformator sorgt.

### Aufbau Zellulose

Das Isolierpapier besteht zu 90 % aus reiner, ungebleichter Zellulose. Damit ist es ein natürliches Makromolekül, bestehend aus langen Glukose-Ketten (siehe Abbildung 2.4).

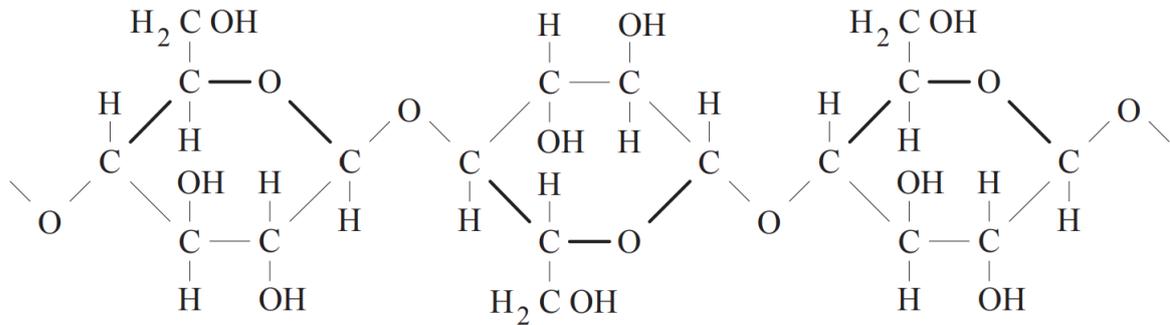


Abbildung 2.4: Molekularer Aufbau der Zellulose [Küc05]

Über die Sauerstoffbrücken sind die einzelnen Glukoseeinheiten verkettet. Diese Ketten können bei besonders hochwertigen Papieren, wie der Alpha-Zellulose, einen Polymerisationsgrad von 2000 Gliedern haben. Eine gute Papierisolierung besitzt einen Polymerisationsgrad von 1200 – 1000 Gliedern [Küc05].

### Wasseraufnahme der Zellulose

Zellulose ist aufgrund seiner polaren Hydroxylgruppen an der Glukose (OH-Verbindungen in Abbildung 2.4) stark hygroskopisch und damit in der Lage große Mengen an Wasser zu binden. Abhängig von der Gewichtsfeuchte  $W$  tritt das Wasser in unterschiedlichen Formen auf, wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist [KT06]:

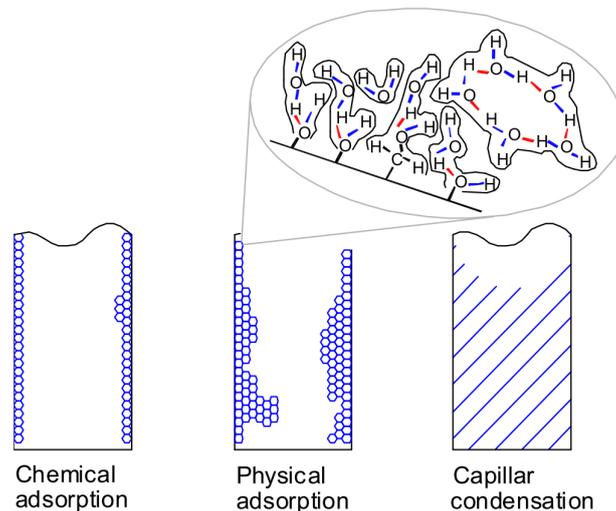


Abbildung 2.5: Bindung von Wassermolekülen in Zellulose [KT06]

- Die Wassermoleküle werden bei sehr kleinem Wassergehalt über Wasserstoffbrückenbindungen fest an die aktiven OH-Gruppen chemisch gebunden und damit absorbiert. Dadurch sind die Wassermoleküle nicht mehr verfügbar.
- Ab  $W = 1-2\%$  halten nur relativ schwache Van-der-Waals- und Kapillarkräfte das Wasser im Zelluloseverbund (Abbildung 2.5 links)
- Durch physikalische Adsorption wird das Wasser im Zelluloseverbund gehalten (Abbildung 2.5 mitte)
- In den Kapillaren kann kondensiertes Wasser auftreten (Abbildung 2.5 rechts)

### Sorptionsisotherme der Zellulose

Sorptionsisotherme stellt bei konstantem Druck und konstanter Temperatur das Verhältnis von relativer Sättigung  $RS$  bzw. des Partialdrucks  $p$  zur Gewichtsfeuchte  $W$  dar. Es ist von der Zusammensetzung oder Qualität des Materials abhängig.

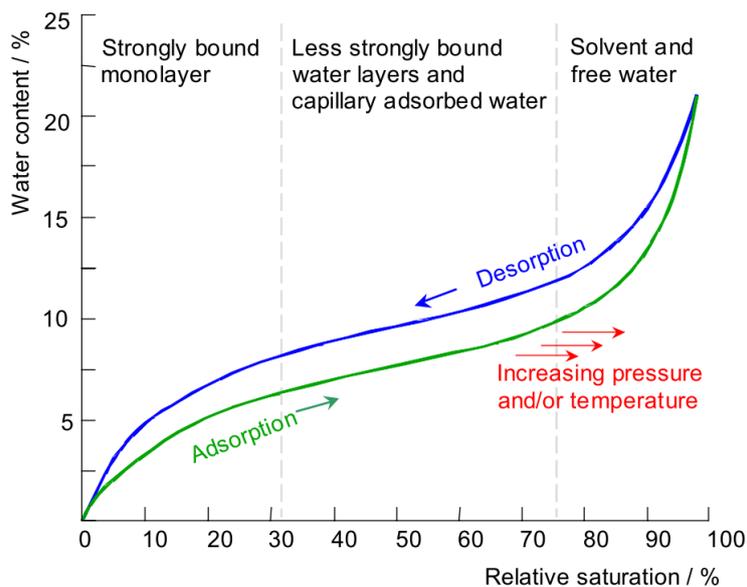


Abbildung 2.6: Allgemeine Ad- und Desorptions-Isotherme [GSV08]

Die S-Kurvenform aus Abbildung 2.6 soll die typische Wasseraufnahme von Zellulose zeigen. Bei einer sehr kleinen relativen Sättigung lagert sich das Wasser an der Oberfläche der Zellulose, dank starker Bindungen an die Hydroxylgruppen an (chemische Adsorption). Diese chemische Adsorption sorgt für einen sehr steilen Anstieg des Wassergehaltes. Sind alle Hydroxylgruppen belegt, so lagert sich nachfolgendes Wasser nur langsam an dem bereits vorhanden Wasser mittels physischer Adsorption an (Abbildung 2.6 Mitte). Sind die inneren Oberflächen der Zellulose mit Wasser vollständig belegt, kommt es zur starken Wasseranreicherung in den Kapillaren (Abbildung 2.6 rechts).

In der Praxis ist die S-Kurvenform der realen Sorptionsisotherme weniger stark ausgebildet (Siehe Abbildung 2.7)

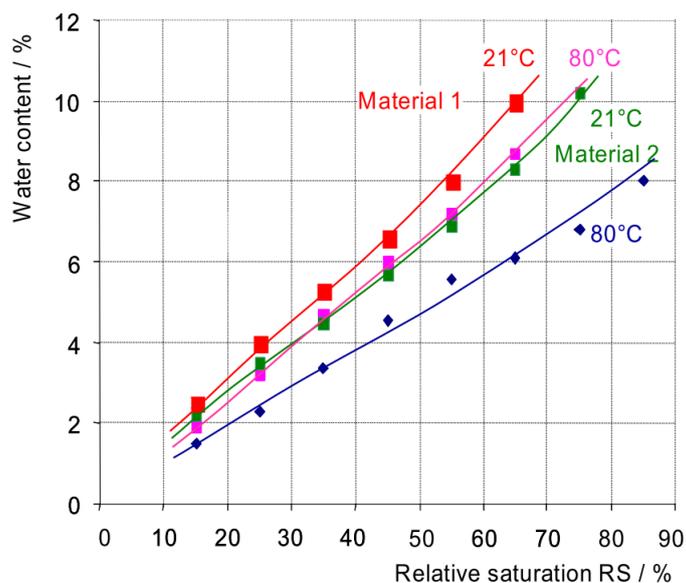


Abbildung 2.7: Gemessene Sorptionsisotherme zweier verschiedener Zellulosen bei unterschiedlicher Temperatur [GSV08]

### Aufbau Isolieröl

Isolieröle oder auch Transformatorenöle sind am häufigsten Mineralöle. Sie werden bei den meisten ölfüllten Betriebsmitteln verwendet. Sie dienen der Füllung von Transformatoren, Imprägnierung von Ölkabeln, Kondensatoren, Messwandlern und Durchführungen. Gewonnen werden sie aus Erdöl durch Raffination, Hydrierung und dem Zusatz von Inhibitoren [Küc05]. Die Grundbestandteile sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

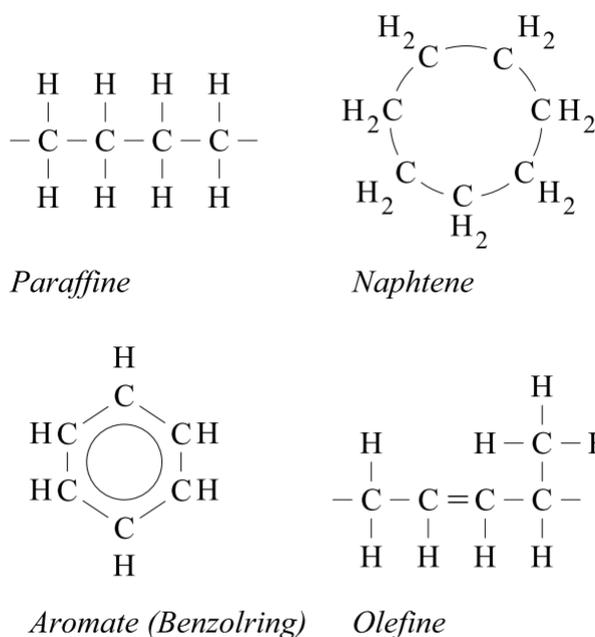


Abbildung 2.8: Bestandteile Transformatoröl [Küc05]

### Wasseraufnahme und Sättigungspunkt des Öls

Da technische Öle auch immer durch Raffinerie oder Partikel aus der Zellulose und durch Alterung Verunreinigungen enthalten, lassen sich Bindungen, an denen Wasser aufgenommen werden kann, nicht vermeiden. Das Wasser wird über Wasserstoffbrückenbindungen an Aromate, Alkohole und Säuren gebunden. Zusätzlich wird es von Teilchen wie den Zellulosefasern absorbiert. Des Weiteren kommt es beim Überschreiten des Sättigungspunktes  $W_S$  in Form von Tröpfchen bzw. freiem Wasser im Öl vor. In Abbildung 2.9 soll die relative Sättigung von realen Ölen in Abhängigkeit der Temperatur aufgezeigt werden.

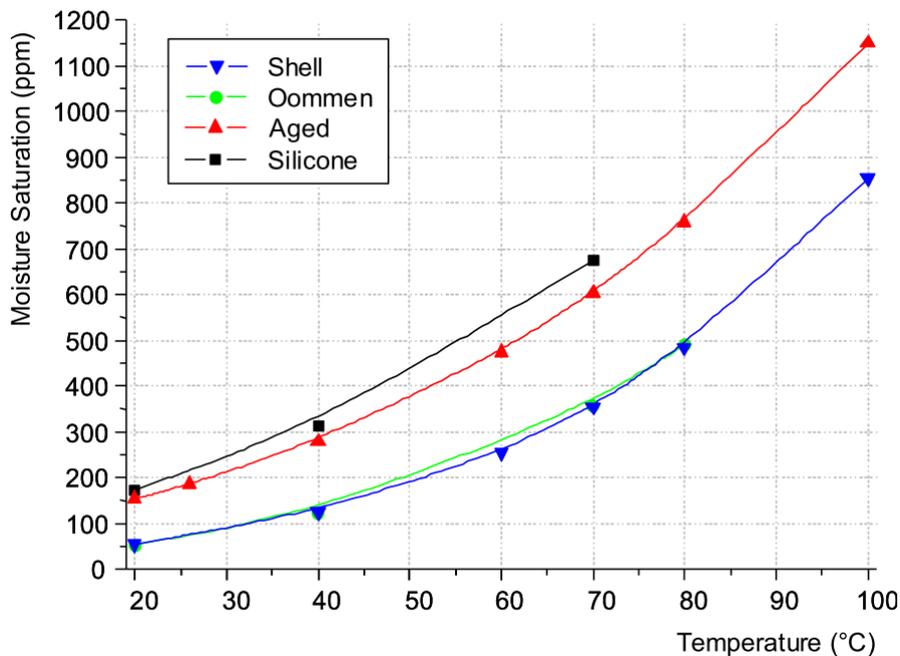


Abbildung 2.9: Wassersättigung für neues Isolieröl, gealtertes Öl und Silikonöl [KT06]

### Gleichgewicht der relativen feuchte zwischen Öl und Papier

Im Betrieb kann der Transformator als System aus unterschiedlich massiven und unterschiedlich warmen Isolationskomponenten betrachtet werden. Dazwischen befindet sich das Isolieröl, welches Wasser zwischen den Komponenten transportiert. Der Transport dieses Wassers, angetrieben durch die unterschiedlichen Wasserpotentiale, findet so lange statt, bis es zu einem Ausgleich der relativen Feuchtigkeiten kommt. Dabei wird der Teilchendichtestrom gleich Null. [BL05] .

Dieses Feuchtigkeitsgleichgewicht (moisture equilibrium) wird auch in Formel 2.12 beschrieben und ist ein thermodynamisches Gleichgewicht, welches unter folgenden drei Bedingungen theoretisch erreicht wird:

- **thermisches Gleichgewicht:** Wenn überall die gleichen Temperaturen herrschen
- **mechanisches Gleichgewicht:** Wenn überall der gleiche Druck vorliegt
- **chemisches Gleichgewicht:** Wenn die Gesamtreaktion ruhend erscheint und keine Veränderung erkennbar ist. (Dennoch laufen Hin- und Rückreaktionen in beide Richtungen weiterhin gleich schnell)

Diese Bedingungen können in einem realen Transformator nur zeitlich und räumlich begrenzt erreicht werden, da es zum Beispiel durch die warmen Spulen und die kalte

Außenwand immer eine ungleiche Verteilung der Temperatur gibt.

Interessant ist hier, dass bei steigender Temperatur das Isolieröl durch einen steigenden Sättigungspunkt mehr Wasser aufnehmen kann (siehe Abbildung 2.9) und zeitgleich der Sättigungspunkt der Zellulose sinkt und diese weniger Wasser aufnehmen kann (Siehe Abbildung 2.7). Kommt es dann zu einem Feuchtigkeitsgleichgewicht an einem Ort, ergibt sich daraus die in Abbildung 2.10 dargestellte Verteilung des Wassers.

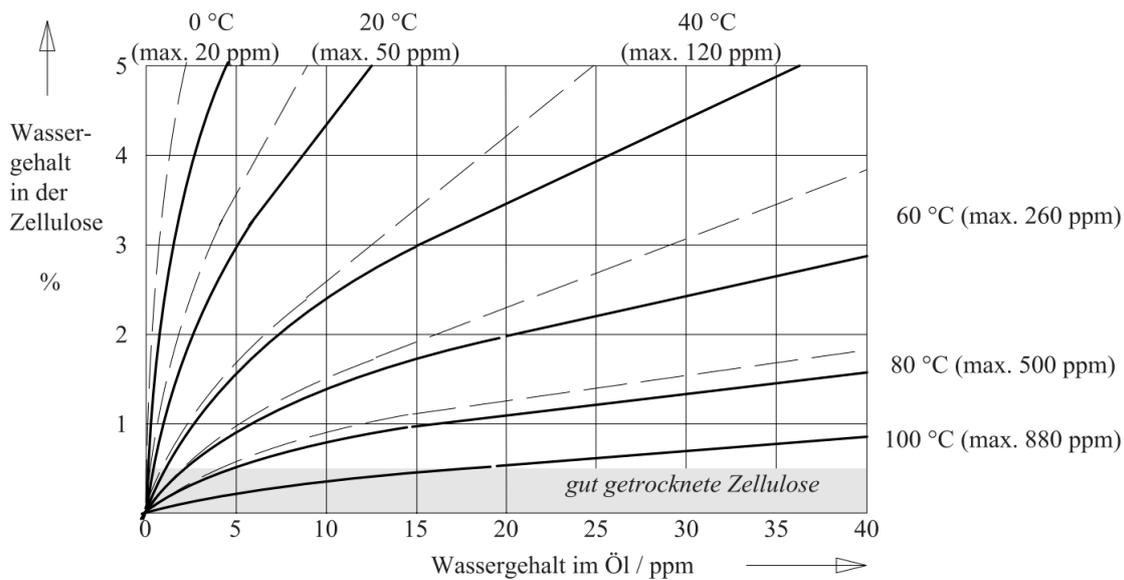


Abbildung 2.10: Wassergehalt in Isolieröl und Zellulose im Gleichgewichtszustand bei verschiedenen Temperaturen [Küc05].

Dabei ist offensichtlich, dass der weitaus größte Teil des Wassers, in der Zellulose gehalten wird.

## 2.3 Wasserquellen in Transformatoren

Es gibt drei Quellen, welche zu Wassereinlagerungen in Transformatoren führen:

- Wasser  $W_{Start}$ , welches nach der Herstellung im Transformator als Restfeuchtigkeit verblieben ist
- Wasser  $W_{Alterung}$ , welches durch Alterung freigesetzt wird
- Wasser  $W_{Extern}$ , welches von außen in den Transformator gelangt

Es gilt:

$$W_{gesamt} = W_{Start} + W_{Alterung} \pm W_{Extern} \quad (2.13)$$

### Restfeuchtigkeit

Nach der Herstellung kann Restfeuchtigkeit in massiveren Isolationskomponenten verbleiben. Diese Komponenten brauchen etwas länger als der Pressspan und das Papier, zum Trocknen und werden daher nicht vollständig getrocknet. Des Weiteren befinden sie sich tief im Inneren des Aktivteils und werden erst als letztes erwärmt. Üblicherweise sind das Holz- oder Kunststoffelemente sowie harzgetränkte Komponenten in dem Stufenschalter, aber auch der Halterungen der Isolationen für den Kern. Über die Zeit diffundiert dieses Wasser über das Isolieröl in die dünnen Strukturen der Isolierung. Erwärmt sich das Öl, so kann es mehr Wasser aufnehmen (siehe Wasseraufnahme des Öls). Dadurch kommt es erst im Betrieb des Trafos dazu, dass Wasser auf die anderen dünneren Komponenten weiter gegeben wird [GSV08].

### Zerfall des Papiers und Öls durch Alterung

Die Alterung der Zellulose führt zur Depolymerisation der Molekülketten und zur Bildung von Nebenprodukten wie Wasser. Je nach Literatur gibt es unterschiedliche Angaben über die entstehende Wassermenge pro Depolymerisation (siehe Abbildung 2.1).

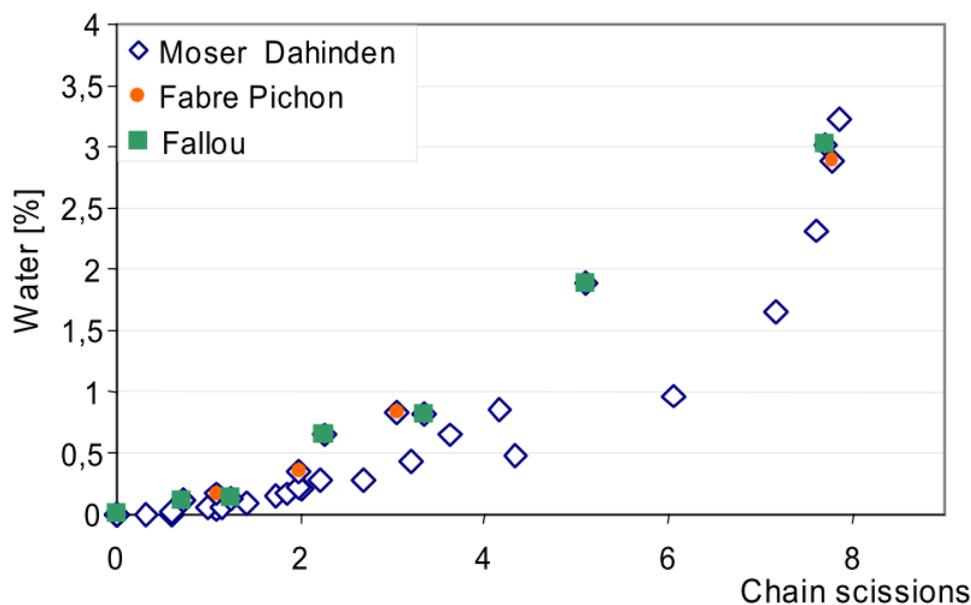


Abbildung 2.11: Gesteigerter Wasseranteil als Funktion der Anzahl der Depolymerisationen unterschiedlicher Literaturquellen (Chain scissions) [GSV08]

Depolymerisation entsteht durch Sauerstoff (oxidative Depolymerisation), Wasser (hydrolitische Depolymerisation) und zu hohen Temperaturen (thermische Depolymerisation) im Tank. In Langzeittests hat sich der Wasseranteil bei Temperaturen von 125 °C bis 160 °C von 1,5 % auf bis zu 2,8 % erhöht. Demzufolge sind die Orte oder Hotspots, an denen sich das meiste Wasser durch Alterung über die Zeit bildet, nahe den heißen Windungen. Andere Reaktionsprodukte der thermischen Depolymerisation sind Glucose, Wasser, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid. Bei der oxidativen Depolymerisation entstehen neben den aufgespaltenen Glucose-Ringen und Wasser auch Säuren und Ketone. Diese Stoffe können vom Isolieröl absorbiert werden und dessen Eigenschaften negativ beeinflussen. Unter anderem wird es dabei polar und kann dadurch mehr Wasser anlagern[HT04].

### Depolymerisation durch Trocknung

Durch die anfänglich starke Erwärmung kommt es in Folge des vorhandenen Wassers und Sauerstoffs zur Depolymerisation. In Abbildung 2.12 wird die Depolymerisationerwärmung eines 250 MVA Aktivteils dargestellt.

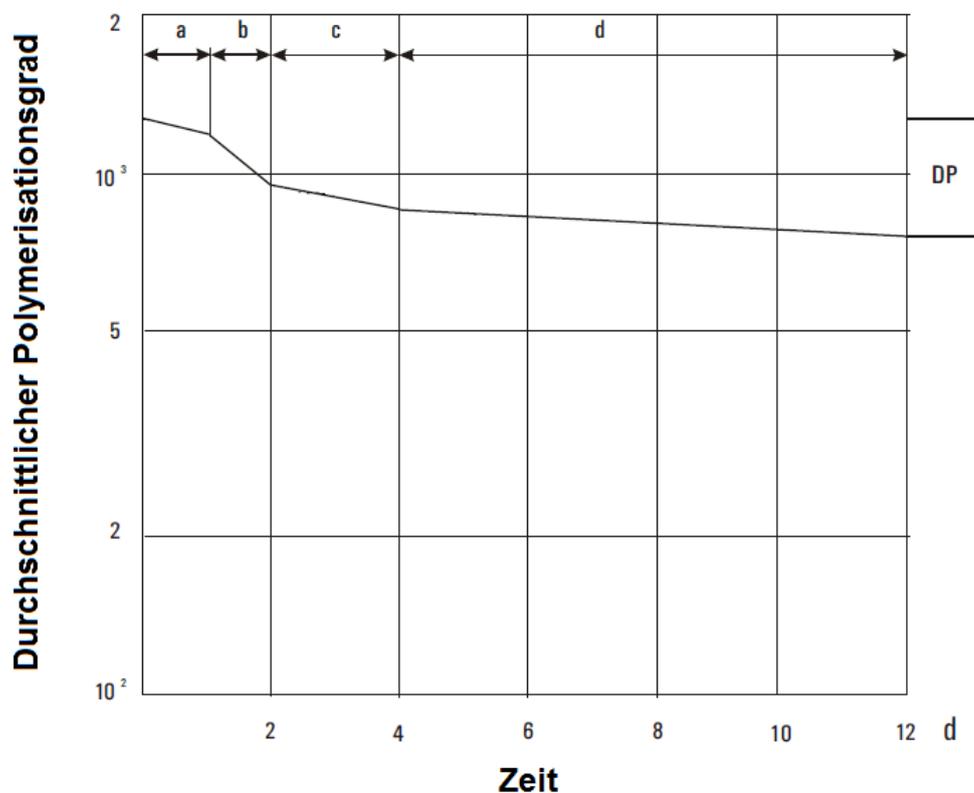


Abbildung 2.12: Depolymerisationerwärmung durch Hot-Air-Vakuum Trocknung [Str00]

- a = Heizphase
- b = Erreichen der maximalen Temperatur
- c = Vakuumfahrt
- d = Feinvakuum

Aus diesem Grund ist ein Transformator, der möglichst trocken geblieben war, besser als ein Transformator, der nass gewesen war und wieder getrocknet wurde.

### **Wasser von Außen während des Betriebes**

Die Hauptquelle der Wasserkontamination eines Transformators ist das Wasser aus der Luft. Doch wie kommt dieses in den Transformator? Verantwortlich hier für sind folgende drei Hauptmechanismen:

- **Eintritt von Wassermolekülen in den Tank durch Knudsen-Diffusion**  
Die Knudsen-Diffusion beschreibt Prozesse, bei welchem leichte Gase durch Teile des Tanks diffundieren (Viscous flow). Der Effekt ist allerdings praktisch vernachlässigbar.  
Über die Ränder der Hochspannungsdurchführungen gelangen grade einmal 1 – 5 g Wasser pro Jahr und über lose Dichtungen 30 – 40 g pro Jahr in den Transformator [GSV08].
- **Eindringen der Feuchtigkeit auf Grund von Druckschwankungen zwischen der Atmosphäre und dem Tankinneren**  
Durch Regen sammeln sich auf dem Transformator größere Mengen Wasser. Im Falle eines Lastabwurfes kommt es zur Abkühlung und damit verbundenem Druckabfall im Trafoinneren. Der damit entstandene Unterdruck ermöglicht das Eindringen größerer Mengen Regenwassers.
- **Wassereintritt durch Atmung des Transformators**  
Während des Betriebes des Transformators ändert sich aufgrund wechselnder Temperaturen das Volumen des Öls. Den zusätzlichen Raum stellen Ölausdehnungsgefäße zur Verfügung. Diese haben wie in Abbildung 2.13 links zu sehen eine Luftleitung mit Trocknungsvorlage. Diese begrenzen, aber verhindern nicht die Wasseraufnahme [HT04].

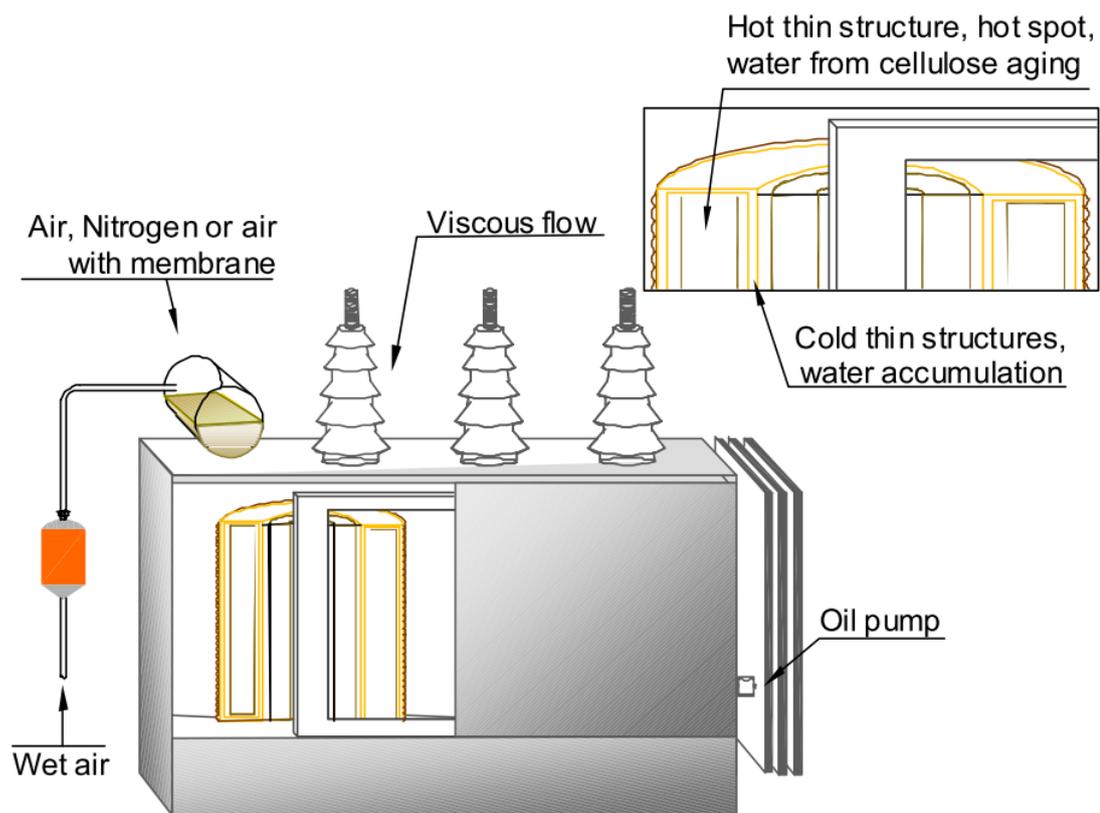


Abbildung 2.13: Wasserquellen während des normalen Betriebes

### Wasser von Außen während Installations- und Reparaturarbeiten

Insbesondere bei Installations- und Reparaturarbeiten absorbiert die Isolierung bei direktem Luftkontakt Wasser. Griffin et al. [GSV08] geben dies als stärkste Wasserquelle für Transformatoren an.

Zum Beispiel nimmt eine 0,5 mm dicke Isolation mit einer Oberfläche von  $1000\text{m}^2$  bei direktem Luftkontakt mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75% bei  $20^\circ\text{C}$  nach 16 Stunden ca. 13,5 kg Wasser auf. Die Luftfeuchtigkeit ist der stärkste Einflussfaktor (siehe Abbildung 2.14).

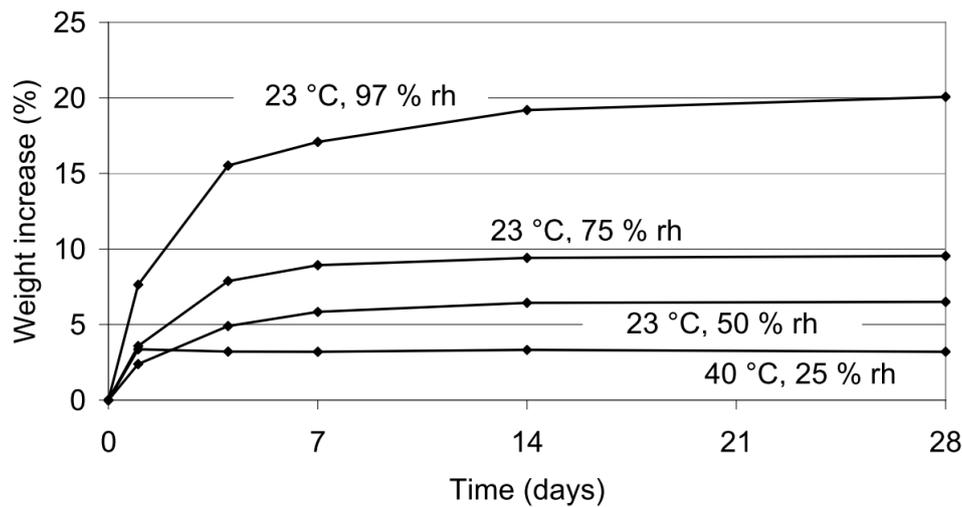


Abbildung 2.14: Wasseraufnahme einer 3 mm dicken Papierisolierung bei 20 °C [GSV08]

Erfahrungen zeigen, dass um 90 % des Wassers, welche eine Isolation bei 20 °C aufnimmt, zu trocknen, die Isolation vier mal so lange bei 80 °C im Ofen stehen muss. Daher ist der Schutz vor der Wasseraufnahme sehr wichtig und nach Victor Sokolov Et al. [Van08] kann dieser wie folgt verbessert werden:

- Aufrechterhaltung einer niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft. Dafür kann das Aktivteil mit Plastikfolie umschlossen werden und diese kann mit trockener Luft befüllt werden.
- Bei langen Liegezeiten, sollten massive Isolationskomponenten gesondert gelagert werden.
- Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sollten überwacht werden
- An Orten mit hoher relativen Luftfeuchtigkeit sollte die Feuchtigkeit von dünnen Isolationskomponenten überwacht werden.

### Stufen der Wasserkontamination

Basierend auf den potentiellen Gefahren durch Wasser im Transformator von Abschnitt 2.4, wurde eine Klassifizierung der relativen Sättigungen  $RS$  der Transformatorisolierung erstellt. Diese soll helfen mit Hilfe der Feuchtigkeit das Risiko abzuschätzen [GSV08]

- **Stufe 1: "good"**

Der Transformator ist trocken: Die Gewichtsfeuchte  $W$  der Isolation liegt bei

unter 0,5 % – 1,0 %. Durch Temperaturschwankungen können Schwankungen des Wassergehalts im Öl um 15 ppm entstehen. Die relative Sättigung des Öls liegt unter  $RS_{\text{Öl}} = 5\%$  bei Betriebstemperaturen von 60 – 70°C. Steigt die Betriebstemperatur weiter, verringert sich die relative Sättigung  $RS$ .

- **Stufe 2: "fair"**

Der Transformator befindet sich im normalen Betriebszustand: Die übliche relative Sättigung  $RS$  des Öls liegt unter 50 %, selbst bei den geringsten Betriebstemperaturen. Der Wassergehalt der Öl-Papier-Isolation  $W_{OIP}$  liegt maximal zwischen 1–2%. Wird das Öl auf Betriebstemperaturen von 60–70°C gebracht, so sinkt die relative Sättigung des Öls auf 5 – 8 %.

- **Stufe 3: "probably wet"**

Der Transformator ist teilweise nass: Die relative Sättigung  $RS$  des Öls steigt bei sich verringernden Temperaturen auf über 50 %. Es entsteht ein größeres Risiko durch Blasenbildung und stärkerer Alterung.

- **Stufe 4: "wet"**

Der Transformator ist nass: Unter Betriebsbedingungen überschreitet die relative Sättigung  $RS$  des Öls 100 % und es bildet sich eine Emulsion aus Öl und freiem Wasser.

## 2.4 Negative Effekte durch relative Feuchte

### Alterung der Zellulose

Gute Zellulose hat 1000 – 1200 Einheiten lange Zelluloseketten. Ungebundenes Wasser in einer Zelluloseisolierung wirkt wie ein Katalysator der eine Depolymerisation antreibt und dabei gleichzeitig immer mehr Wasser aus der Zellulose löst. Dadurch wird das Material spröde und brüchig. Das hat zur Folge, dass bei großen mechanischen und dielektrischen Belastungen wie einem Lastwechsel oder einem äußeren Kurzschluss, sowohl die mechanische wie auch die dielektrische Festigkeit nicht mehr gegeben ist und es zu inneren Fehlern kommt. Dies zieht den Totalausfall des Transformators nach sich. Einen Überblick für die Alterung schafft Abbildung 2.15.

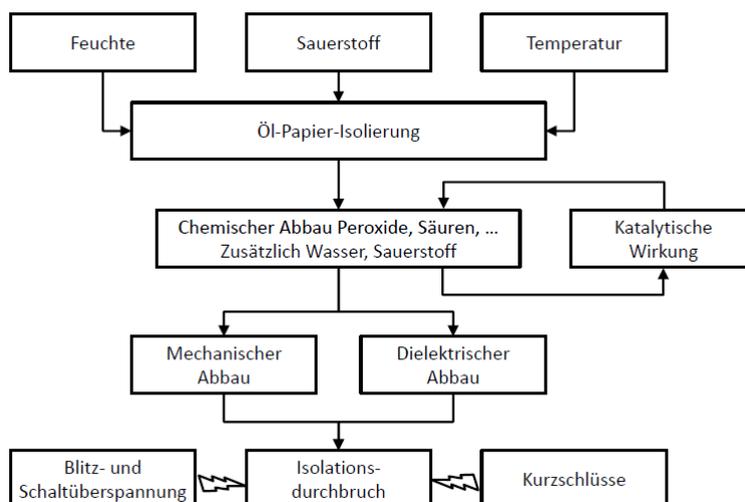


Abbildung 2.15: Alterungsvorgänge im Isolationssystem des Transformators

### Bubble-Effekt

Ab einem Wasseranteil von  $W = 1 - 2\%$  wird ein Teil des Wassers nur über schwache Vander-Waals- und Kapillarkräfte am Zelluloseverbund gehalten. Dieses Wasser kann sich bei hohen Temperaturen lösen und Blasen aus Dampf bilden (Abbildung 2.16).

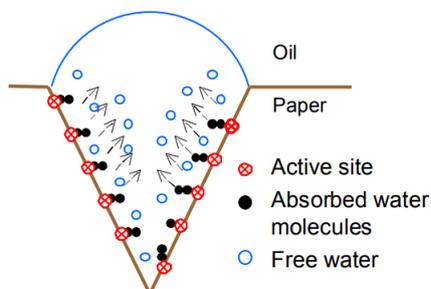


Abbildung 2.16: Blasenbildung in einer Pore [Koc06]

Die dielektrische Festigkeit innerhalb dieser Blasen ist auf Grund der großen Teilchenabstände sehr viel kleiner, sodass Ionen oder Elektronen die nötige Ionisierungsenergie zur Lawinenbildung aufbringen können. Die Temperatur, bei der die Blasenbildung einsetzt, hängt von folgenden Parametern ab [Koc06] :

- Verfügbares freies Wasser in der Zellulose
- alterungsabhängige Mikrostruktur der Zellulose (Öffnung der Kapillaren und Poren)

- Gasreste in der Zellulose, abhängig u.a. vom Imprägnieren mit Isolieröl
- Oberflächenspannung des Öls und damit Ölalterung
- Gradient der Temperaturerhöhung

### Verringerung der Durchschlagsfestigkeit der Isolierung

Ein weiterer negativer Effekt ausgelöst durch Wasser im Transformator ist Verringerung der Durchschlagsfestigkeit des Öls wie in Abbildung 2.17 dargestellt.

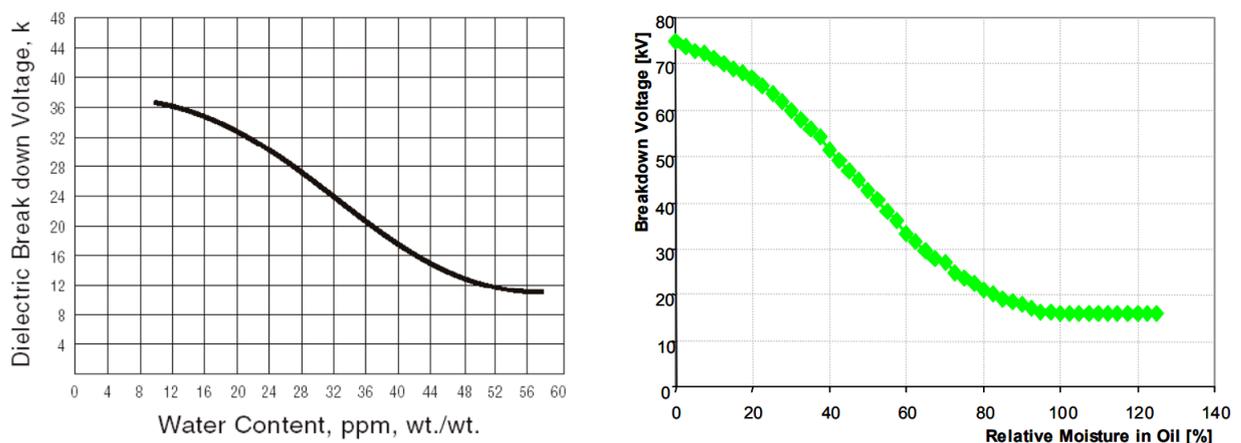


Abbildung 2.17: Durchschlagsfeldstärke in Isolieröl als Funktion der Gewichtsfeuchte in ppm (links) oder als Funktion der relativen Feuchte (rechts) [Koc06]

## 2.5 Messen der Feuchtigkeit

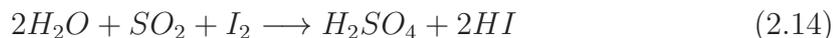
In dieser Arbeit soll die Feuchtigkeit des Isoliersystemes während der Trocknung mittels dielektrischer Antwort gemessen werden. Nachdem der Transformator getrocknet und wieder mit Öl befüllt worden ist, kann die Messung zusätzlich über folgende Messmethoden verifiziert werden:

### Titration nach Karl Fischer

Bei der Titration wird das Gleichgewicht zwischen den relativen Feuchten ausgenutzt. Dafür wird eine Reagenz mit einer bekannten Wasserkonzentration (Titer) zum Öl hinzugefügt, sodass es zum Ausgleich der Konzentrationen kommt.

Bei volumetrischer Titration wird das hinzugefügte Volumen gemessen und die gesuchte Wasserkonzentration aus einer stöchiometrischen Gleichung errechnet. Die maximale Empfindlichkeit von einigen  $10 \mu\text{g}$  Wasser macht ihren Einsatz bei trockenen Isolierölen unmöglich [Koc06].

Bei coulometrischer Titration generiert eine Elektrode den Titer, in diesem Fall Jod, nach der folgenden Gleichung:



Dabei liegt die Empfindlichkeit bei wenigen  $\mu\text{g}$  Wasser. Das Problem der Titration nach Karl Fischer ist, dass hier die Gewichtsfeuchte bestimmt wird, wobei nur die relative Feuchtigkeit Auskunft über jenes Wasser liefert, welches für die negativen Effekte wie Blasenbildung, Alterung und Verringerung der Durchschlagsfeldstärke verantwortlich ist.

### Kapazitiver Sensor

Ein hygroskopisches Polymer wird zwischen zwei Elektroden angeschlossen. Es entsteht ein Kondensator, dessen Permittivität stark von seinem Wassergehalt abhängig ist. Wasser diffundiert in Abhängigkeit der relativen Feuchte des Isolieröls in das Dielektrikum. Durch die hohe Permittivität des Wassers ( $\epsilon_W = 80$ ) erhöht sich dessen Kapazität:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \text{ mit } \epsilon_r = \epsilon_i + \epsilon_W \cdot W \quad (2.15)$$

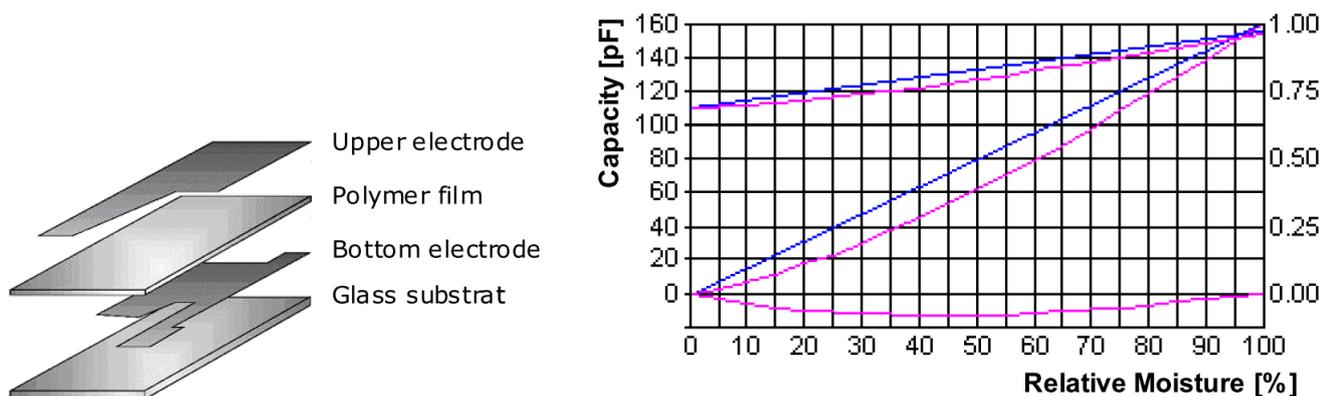


Abbildung 2.18: Funktionsweise eines Kapazitiven Dünnsensors [Koc06]

Dadurch wird hauptsächlich die relative Feuchtigkeit des Isolieröls gemessen, was eine bessere Einschätzung der Gesamtsituation ermöglicht. Ein Nachteil dieser Messmethode ist, dass auch Alterungsprodukte mit einer geringen Permittivität in das Dielektrikum diffundieren können. Diese können sich an den Sensor anlagern und die Elektroden korrodieren. Der Vorteil ist eine einfache Kalibrierung durch gesättigte

Salzlösungen. Des Weiteren eignet sich diese Methode für ein Langzeitmonitoring von Trafos.

## 2.6 Trocknung des Leistungstransformators

Die Trocknung der Öl-Papier-Isolierung steht im Vordergrund dieser Arbeit. Ziel der Trocknung ist die Entfernung von in Zellulose gebundenem Wasser ohne eine deutliche Alterung des Materials zu verursachen. Im Folgenden wird der allgemeine Trocknungsprozess nach Strzala [Str00] erklärt, dabei steht die Hot-Air-Vakuum Trocknung, wie sie auch bei Firma Miebach ausgeführt wird, im Vordergrund. Andere Trocknungstechniken werden der Vollständigkeit halber mit zum Vergleich erwähnt:

Wenn es im Zuge der Revision nicht schon geschehen ist, muss zunächst das Öl aus dem Transformator gepumpt werden und dieser dann geöffnet werden. Das freigelegte Aktivteil (Siehe Abbildung 2.19) wird dann in den jeweiligen Ofen geschoben, sodass der Trocknungsprozess beginnen kann.



Abbildung 2.19: offenes Aktivteil bei Firma Miebach kurz vor der Trocknung

In der Heizphase wird das Aktivteil zunächst erwärmt. Dann wird in der Vakuumphase der Druck innerhalb des Ofens reduziert, sodass der Siedepunkt des Wassers sinkt und das Wasser aus der Zellulose diffundiert. Dabei kühlt der Transformator infolge des Entzuges der Verdunstungswärme wieder ab, sodass er erneut erwärmt werden muss (siehe Abbildung 2.20). Dieser Prozess wird so oft wiederholt bis die gewünschte Feuchtigkeit erreicht wird.

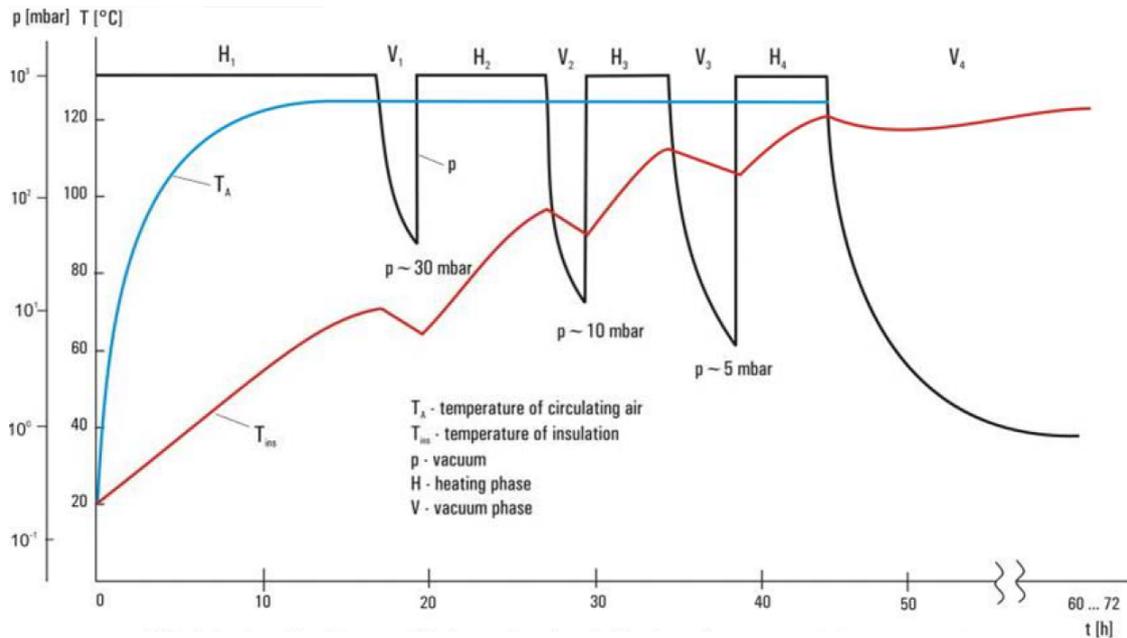


Abbildung 2.20: Prozessbeschreibung eines Hot Air Trocknungsverfahrens für Transformatoren [Str00]

Anschließend wird das Aktivteil aus dem Ofen gefahren und der Tank wird geschlossen. Nachdem der Tank verschweißt ist, wird der Transformator wieder in den Vakuumofen geschoben und unter Vakuum mit dem aufbereitetem Isolieröl befüllt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte näher beschrieben:

### Heizphase

Um die Verdampfungswärme des Aktivteils für die Trocknung im Ofen zu erreichen, muss als erstes die Wärme  $Q$  im Transformatoraktivteil vergrößert werden. Der Wärmeeintrag  $\dot{Q}$  kann wie folgt bestimmt werden:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.16)$$

Wobei  $\alpha$  der technologiebasierte Wärmeübertragungskoeffizient,  $A$  die Oberfläche und  $(T_2 - T_1)$  die Temperaturdifferenz zwischen dem Transformator und dem Übertragungsmedium ist.

Bei Firma Miebach erfolgt das Aufheizen durch Heißluftumwälzung (Hot-Air-Vakuum). In Abbildung 2.21 wird der Aufbau des Hot-Air-Vakuum-Ofens gezeigt. Dabei wird die Luft an den Wänden erwärmt und über einen Deckenventilator umgewälzt. Da-

durch wird das Aktivteil von der warmen Luft umströmt und kann gleichzeitig Wasser an die Luft abgeben.

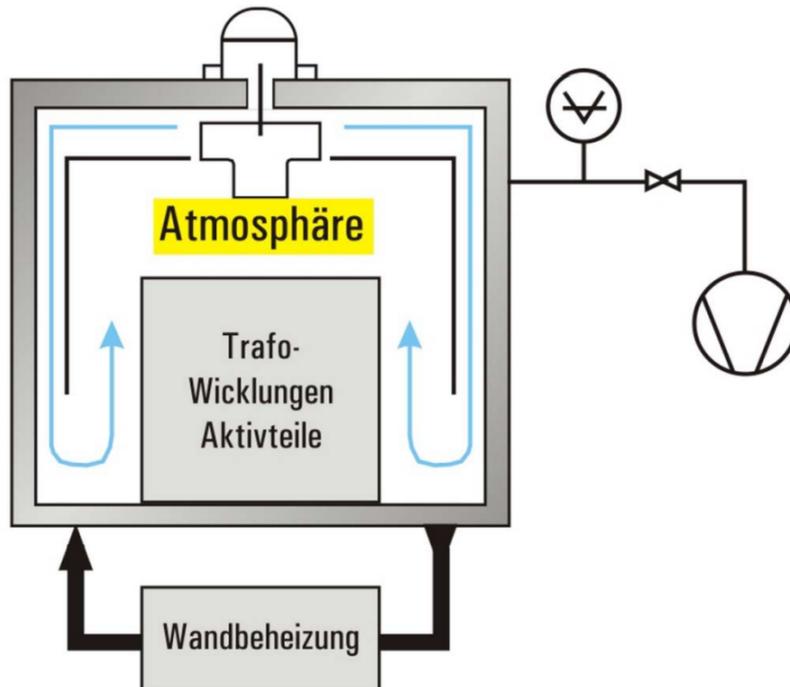


Abbildung 2.21: Aufbau eines Hot-Air-Vakuu-Ofens [Str00]

Zum Vergleich werden hier die Wärmeübertragungskoeffizienten der unterschiedlichen Aufheizverfahren dargestellt:

$$\text{Wärme Strahlung:} \quad \alpha \approx 8 \frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K} \quad (2.17)$$

$$\text{Umluft:} \quad \alpha \approx 80 \frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K} \quad (2.18)$$

$$\text{Öl Spray:} \quad \alpha \approx 600 \frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K} \quad (2.19)$$

$$\text{Vapour-Phase:} \quad \alpha \approx 4500 \frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K} \quad (2.20)$$

### Zwischendruckabsenkung

Durch das Erwärmen der Luft und des Aktivteils steigt der Partialdruck des Wassers im Papier  $p_{OIP}$ . Mit steigender Temperatur, angetrieben durch den gestiegenen Partialdruck des Wassers, kommt es zur Diffusion des Wassers aus der Zellulose in die Luft. Diese Diffusion ist abhängig von der Differenz der Partialdrücke  $\Delta p$  (siehe Abbildung 2.22).

$$\Delta p = p_{OIP} - p_{Luft} \quad (2.21)$$

Da jetzt die Anzahl der Wassermoleküle in der Luft zu nimmt, nimmt nach Formel 2.4 auch der Partialdruck des Wassers in der Luft zu. Dadurch erhöht sich nach Formel 2.5 auch die relative Feuchtigkeit  $RH$  des Wassers. Sobald die relative Feuchtigkeit der Luft  $RH_{Luft}$  gleich der relativen Sättigung des Wassers in der Zellulose  $RS_{Papier}$  ist, ist der Diffusionsprozess beendet und die Trocknung kommt zum Erliegen.

$$\text{Stopp der Trocknung bei:} \quad RH_{Luft} = RS_{Papier} \quad (2.22)$$

Die Trocknung wird daher langsamer, je näher sich  $RH_{Luft}$  und  $RS_{Papier}$  kommen. Um den Trocknungsvorgang aufrecht zu erhalten, empfiehlt der Ofenbauer Heidrig [Str00] eine oder mehrere Zwischendruckabsenkungen. Dabei wird, ohne die Heizung abzuschalten, noch während der Heizphase der Luftdruck auf  $30\text{ mbar}$  reduziert. Danach wird wieder trockene Luft in den Ofen gelassen, sodass das Wasser weiter aus dem Aktivteil in die Luft diffundieren kann.

### **Vakuumsfahrt**

Bei Vakuumsfahrt wird der Druck innerhalb des Ofens auf unter  $1\text{ mbar}$  reduziert. Was dabei passiert wird am besten durch Abbildung 2.22 beschrieben:

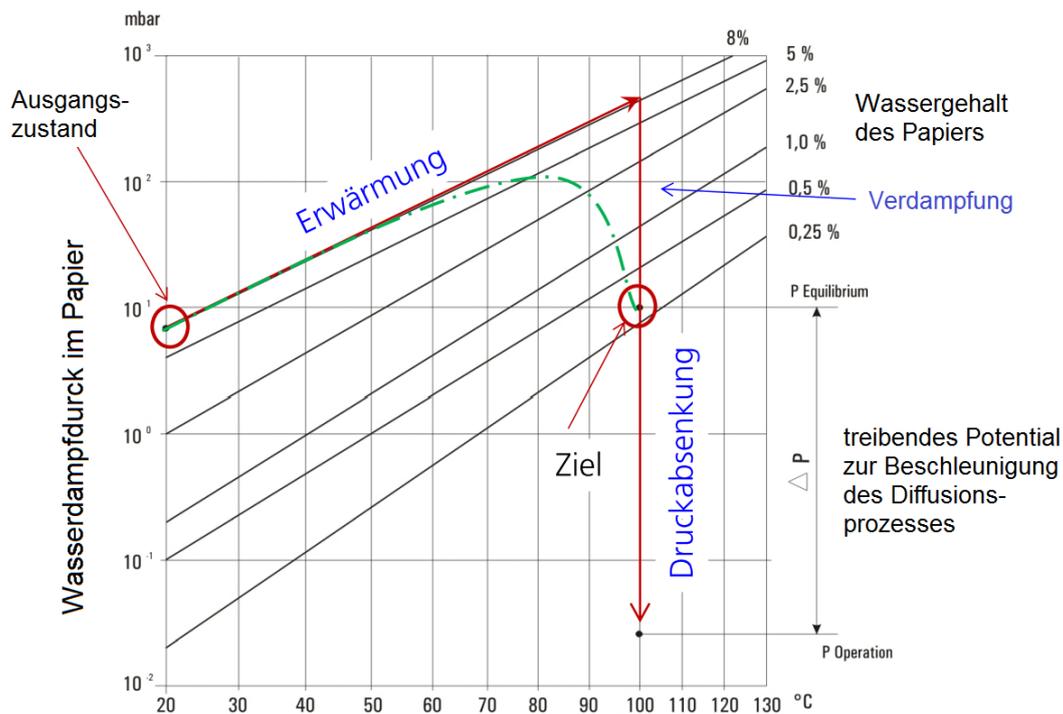


Abbildung 2.22: Partialdruck des Wassers im Papier in Abhängigkeit der Temperatur während der Papier-Trocknung [Str00]

Nachdem das Aktivteil seine Maximaltemperatur und auch der Partialdruck des Wassers im Papier seinen maximalen Druck erreicht hat, wird die Luft aus dem Ofen gezogen. In Abbildung 2.22 ist dieser Punkt bei einer Temperatur von 100 °C erreicht worden. Daraufhin fällt der Luftdruck unter den Partialdruck des Wassers im Papier und die Druckdifferenz  $\Delta p$  treibt das Wasser per Diffusion aus dem Papier in die Luft.

### Weitere Heizphasen

In Folge der Verdampfung des Wassers unter Vakuum, kühlt der Transformator stark aus. Dadurch und durch die kleinere Anzahl Wassermoleküle im Papier sinkt der Partialdruck des restlichen Wassers im Papier und die Trocknung wird verlangsamt oder kommt zum stillstand. Daher kann es angebracht sein, die Vakuumsfahrt zu beenden und in eine weitere Heizphase überzugehen. Die Anzahl der Heizphasen ist abhängig von der Größe des Aktivteils und der verbliebenen Menge an Wasser im Papier. Um den Wassergehalt auf unter  $W = 1\%$  ist, eine höhere Temperatur oder ein tieferer Unterdruck nötig, da der Großteil des Wassers jetzt über die chemische Bindung am Wasser gebunden ist (Siehe Abschnitt 2.2).

**Ende der Trocknung**

Üblicherweise soll die Trocknung dann beendet werden, wenn das Aktivteil den gewünschten Trocknungsgrad erreicht hat. Nachdem mehrere Heizphasen gefahren worden sind, verbleibt das Aktivteil im Feinvakuum von unter 1 *mbar* zum auskühlen. Anschließend wird der Ofen geöffnet. Dabei sollte das Aktivteil nicht mehr all zu warm sein, sonst zieht das Papier infolge seiner geringen Sättigung und starken Hygroskopie zu viel Wasser aus der Luft. Es gilt jetzt das Aktivteil so schnell wie möglich zu schließen.

Nachdem das Aktivteil im Tank verbracht ist, wird es wieder in den Vakuumofen gefahren und unter Vakuum mit dem gereinigten Isolieröl befüllt.

# 3. Dielektrische Antwort

Die dielektrische Antwort ist eine Impedanzspektroskopie, bei der ein elektrisches Feld an ein dielektrikum Angelegt wird, um bei Gleichspannung über den Polarisations- und Depolarisationsstrom die dielektrische Antwortfunktion zu erhalten oder bei Wechselspannung den Verlustfaktor über einen weiten Frequenzbereich zu bestimmen. Aus der dielektrischen Antwortfunktion oder dem Verlauf des Verlustfaktors kann der Wassergehalt einer Feststoffisolierung abgeleitet werden.

## 3.1 Der Verlustfaktor

Der Verlustfaktor (engl.: dissipation factor, abgekürzt DF) wird in Deutschland als Maß der Wärmeverluste verwendet. In den USA wird der Powerfaktor verwendet. Je kleiner der Verlustfaktor der Transformatorisolierung ist, desto weniger Energie wird in Wärme umgewandelt. Durch die Alterung der Isolierung in Kombination mit Wassereinlagerungen und Teilentladungen steigt der Verlustfaktor messbar. Eine ideale Isolierung kann als idealer Kondensator betrachtet werden. Bei diesem eilt der Strom der Spannung um  $90^\circ$  voraus. Eine reale Isolierung hat zusätzlich ohmsche Verluste und wird daher als Parallelschaltung zwischen Kapazität und ohmschen Widerstand, wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

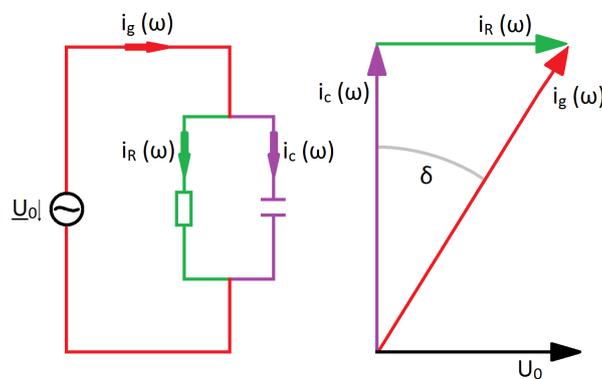


Abbildung 3.1: Ersatzschaltbild eines verlustbehafteten Kondensators mit Zeigerdiagramm.

Selbst gute Dielektrika besitzen pro Kubikmeter mindestens  $10^6$  Elektronen, weswegen nach wie vor ein kleiner ohmscher Anteil parallel zur Kapazität gemessen werden kann [Fas05]. Durch den zusätzlichen ohmschen Widerstand unterscheidet sich die Phasenverschiebung von  $90^\circ$  um den Winkel  $\delta$ .

Der Verlustfaktor wird durch den Tangens des Winkels  $\delta$  definiert und je nach Betrachtungsweise auch als Quotient der Wirk- und Blindkomponenten der Leistung  $P$  oder der Spannung  $U$  betrachtet:

$$DF = \tan \delta = \frac{P_W}{P_b} = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I_R}{I_C} \quad (3.1)$$

Typische Werte für  $\tan \delta$  einer Hochspannungsisolierung liegen bei Netzfrequenz unter 0,001. Für kleine Verlustfaktoren gilt  $\tan \delta = \delta$ . Bei größeren  $\tan \delta$ -Werten führt die angelegte Hochspannung zur Erwärmung der Isolation, welche wiederum den  $\tan \delta$  erhöht und so einen Wärmedurchschlag provoziert.

Die Formel 3.1 bezieht sich auf die Netzfrequenz von 50 Hz. Bei der dielektrischen Antwort wird der  $\tan \delta$  bei weitaus höheren Frequenzen ermittelt. Durch das schnell wechselnde Feld können die durch Polarisation erzeugten Dipole wegen der Relaxationszeiten nur verzögert folgen. Die Folge ist eine frequenzabhängige Dielektrizitätszahl und damit ein sich über die Frequenz ändernder Verlustfaktor  $\tan \delta$ . [Sch17]

## 3.2 Polarisation

Bei den folgenden Erläuterungen wird bewusst auf die Vektornotation verzichtet, da es hier nur um ein grundlegendes Verständnis geht.

Um die frequenzabhängige Veränderung des Verlustfaktors  $\tan \delta$  nachvollziehen zu können, ist es wichtig die Polarisationsmechanismen zu verstehen.

Ein Dielektrikum ist dadurch gekennzeichnet, dass die Valenzelektronen so fest an das Atom gebunden sind, dass es praktisch keine elektronische Leitfähigkeit gibt [Fas05]. Wird ein Feld an dieses Dielektrikum angelegt, so werden Dipole auf atomarer Ebene erzeugt. Es entsteht ein lokales Ladungsungleichgewicht bei dem sich die positiven und negativen Ladungen  $\pm Q$  vom Massenschwerpunkt um eine kleine Distanz  $d'$  verschieben. Dabei erzeugen sie ein Dipolmoment, welches sich entgegen das äußere elektrische Feld ausrichtet:

$$p_{Dip} = Q \cdot d' \quad (3.2)$$

Dieses Dipolmoment  $p$  kann auch mit  $\alpha$  als “polarisability“ bzw. Polarisierbarkeit des Materials verstanden werden.

$$p_{Dip} = \alpha \cdot E \quad (3.3)$$

Wobei Für unterschiedliche Materialien variiert die Distanz  $d$ , die Anzahl der Dipole pro Volumeneinheit und die Polarisierbarkeit. So kann es durch chemische Verbindungen zwischen den Atomen zur Ladungsverschiebung und damit zu einem stabilen Abstand  $d$  der Ladungen vom Massenschwerpunkt kommen. Dabei entsteht ein permanentes Dipolmoment als Materialeigenschaft ohne die Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes. Das Dipolmoment  $p$  in einer Volumeneinheit mit bestimmten Anzahl Molekülen  $N$  lässt sich auch zur makroskopischen Polarisation  $P$  mit Formel 3.4 verknüpfen [Zae03].

$$P = N \cdot p \quad (3.4)$$

Als Nächstes werden die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen vorgestellt:

- **Elektronenpolarisation**

Durch das äußere Feld wird die Elektronenhülle des Atoms deformiert. Dabei verschiebt sich der positiv geladene Kern und negativ geladene Hülle gegeneinander wie in Abbildung 3.2.

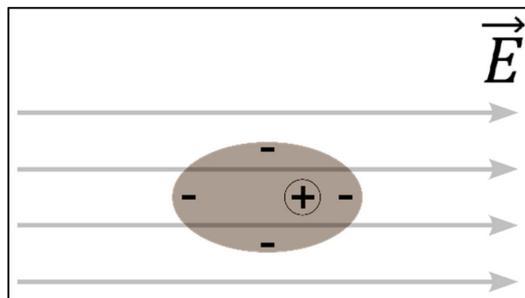


Abbildung 3.2: Elektronenpolarisation [Sch16]

Auf Grund seiner größeren Masse, wird der Atomkern im Vergleich zur Elektronenwolke kaum verschoben. Gleichzeitig wird die Elektronenhülle wegen ihrer geringen Masse sehr schnell verschoben. Laut Schober [Sch16] finden sich in der Literatur Werte von  $10^{-16} s$  bis  $10^{-14} s$ . Sie kann somit hoch frequentierten

Feldänderung bis hin zu optischen Frequenzen folgen[Fas05]. Dieser Polarisationsmechanismus hat auf eine dielektrische Antwort mit einer maximalen Frequenz von wenigen Kilohertz keinen Einfluss.

- **Ionenpolarisation oder Gitterpolarisation**

Unterschiedlich geladene Ionen, treten paarweise auf und haben ein gemeinsames Dipolmoment. Dieses setzt sich aus dem Produkt der Ladung  $Q$  mal dem Abstand  $l$  zusammen. Wenn auf unterschiedlich geladene Ionen, die sich in regelmäßigen Kristallgittern oder in Molekülen befinden, ein elektrisches Feld wirkt, verschieben sie sich gegeneinander. Die Abbildung 3.3 verdeutlicht diesen Polarisationsmechanismus anhand von regelmäßig angeordneten Ionen im zweidimensionalen Kristallgitter.

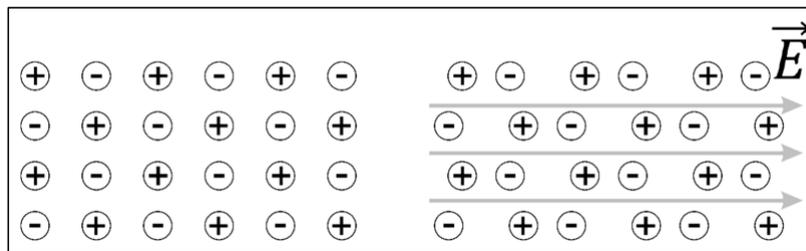


Abbildung 3.3: Ionenpolarisation in Gitterstrukturen [Sch16]

Fasching [Fas05] schreibt dazu, dass zwei Ionen die im Gleichgewichtsfall einen Abstand  $l$  voneinander haben, diesen um  $d$  vergrößern wie in Abbildung 3.4 dargestellt.

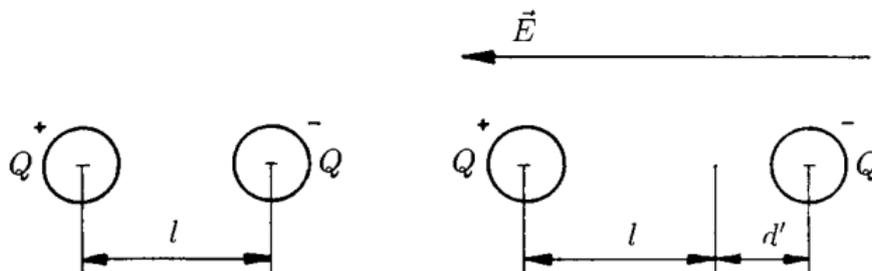


Abbildung 3.4: Dipolmoment der Ionenpolarisation [Fas05]

Damit vergrößert sich auch ihr Dipolmoment von  $Q \cdot l$  auf  $Q \cdot (l + d')$ . “Unter dem Dipolmoment infolge Ionenpolarisation versteht man den Zuwachs  $Q \cdot d'$ “. Dies gilt nur bei der Bedingung kleine Dipolmomente, was bei der Ionenpolarisation im Allgemeinen erfüllt ist.

- **Dipolare Polarisation oder Orientierungspolarisation**

Durch Anlegen eines elektrischen Feldes werden vorhandene permanente Dipole wie zum Beispiel polare Moleküle, polare Molekülgruppen oder polare Partikel ausgerichtet. Diese Orientierungspolarisation wird in Abbildung 3.5 dargestellt.

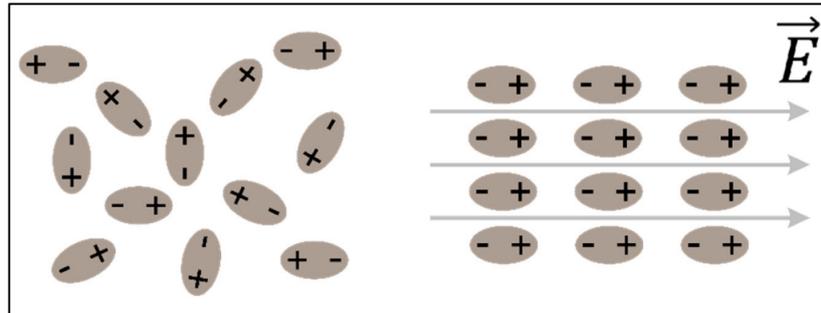


Abbildung 3.5: Ionenpolarisation, ungeordnete Dipole links, ausgerichtete Dipole rechts [Sch16]

Bei diesem Polarisationsmechanismus wechselwirken Moleküle oder ganze Molekülgruppen mit dem angelegten elektrischen Feld. Die Relaxationszeit beträgt in der Regel zwischen  $10^{-11}s$  und  $10^{-9}s$ [Sch16].

Für die vorliegende Arbeit ist die Betrachtung von Wasser als polares Molekül vorrangig. Beige [Bei95] gibt als benötigte Zeiten für die Ausrichtung dieser permanenten Dipole Werte zwischen  $10^{-5}s$  und  $10^{-2}s$  an. Wasser lagert sich in den Isolierstoffen auf Zellulosebasis an. Die Zellulose besitzt außerdem eine große Anzahl an OH-Gruppen, welche ebenfalls mehr oder weniger frei rotieren können, somit permanente Dipole darstellen und sich in einem elektrischen Feld ausrichten können. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass in der Papierisolierung nicht nur freie OH-Gruppen vorkommen, sondern auch unbewegliche in Wasserstoffbrückenbindungen zum Nachbarzellulosestrang oder zum Wasser. Diese Bindung kann die Ausrichtung der Dipole behindern. Die Ausrichtungsdauer dieser Moleküle ist schwer berechenbar, da sie von den benachbarten Molekülen und Bindungen abhängt [Sch16].

Für die dielektrische Antwort ist dieser Polarisationsmechanismus auf Grund der längeren Relaxationszeit der Wassermoleküle von Bedeutung.

- **Grenzflächenpolarisation**

Nach Koch [Koc08] ist die Grenzflächenpolarisation der wichtigste Polarisationsmechanismus für die dielektrische Antwort. Isolierstoffe wie Pressspanfaser sind nicht völlig homogen und weisen auf Grund schwankender Faserdurchmesser unterschiedliche Permittivitäten oder Leitwerte auf. Es gibt Stellen im

Pressspan, welche die Ladungsträger durchlassen und jene, an den die Ladungsträger nicht durchgelassen werden. Der Übergang von einer Faser zur anderen kann ebenfalls als geänderter Widerstand beschrieben werden [Sch16]. An den Übergängen zwischen leitfähigen und isolierenden Schichten sammeln sich Ladungsträger wie Ionen an. Besonders stark tritt dieser Effekt bei Öl auf, welches durch das Imprägnieren in kleinen Kammern aus Papierfasern eingeschlossen ist. Abbildung 3.6 verdeutlicht die Grenzflächenpolarisation.

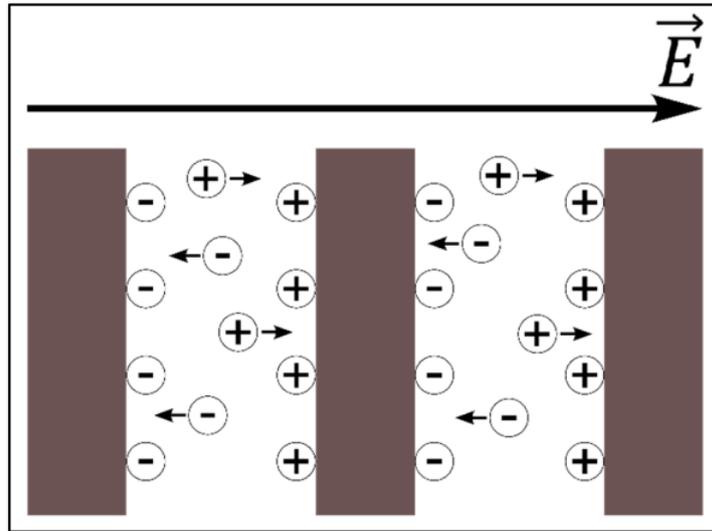


Abbildung 3.6: Grenzflächenpolarisation [Sch16]

Das Anordnen der Öl- und Wassermoleküle an den hochohmigen Pressspanfasern kann mit dem Laden eines Kondensators verglichen werden. Beige [Bei95] gibt für die Grenzflächenpolarisation Zeiten zwischen  $10^{-2}s$  und  $10^{-4}s$  an. Es gibt Beobachtungen, die während der Leitfähigkeitsmessung über mehrere Stunden abklingende Ströme zeigen, weswegen dieser Polarisationsmechanismus bei der Pressspanisolierung der dominanteste zu sein scheint [Sch16].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die dielektrische Polarisation das Ergebnis der relativen Ladungsverschiebung innerhalb des Materials ist. Während all dieser Prozesse ist das äußere elektrische Feld nicht in der Lage die Ladungsträger zum verlassen des Materials zu zwingen. Demnach gibt es keine elektrische Leitung, was für eine Hochspannungsisolierung essentiell ist.

Wird die Isolierung als isotrop und homogen angenommen so haben der Vektor der makroskopischen Polarisation  $P_{pol}$  und der Vektor des elektrischen Feldes  $E$  die gleiche Richtung und sind verbunden über Formel 3.5, wobei  $\chi$  die dielektrische Suszeptibilität ist und zusammenfassend alle Arten der dielektrischen Polarisation beschreibt. Im idealen Vakuum ist sie null.

$$P_{pol} = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E \quad (3.5)$$

Aus Formel 3.5 lässt sich schließen, dass die Polarisation  $P$  zurückgeht und verschwindet, sobald das  $E$  - Feld auf null fällt. Eine Reduzierung des  $E$  - Feldes leitet somit den Depolarisationsprozess ein, welcher mit Verzögerung dem sinkendem  $E$  - Feld folgt. So werden die dielektrischen Vorgänge dynamisch und können entsprechend über die Kapazität und den Leitwert detektiert werden. Dies kann sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich erfolgen. Wobei in linearen Systemen beide ineinander umgerechnet werden können. Dies ist nötig, da Messungen bei Frequenzen unter  $0,01 \text{ Hz}$  bei vier Perioden bereits länger als  $400 \text{ s}$  dauern würden. Das Ergebnis ist die dielektrische Antwort, bestehend aus der Kombination von Frequenzspektroskopie und Polarisationsstrom, welche Rückschlüsse auf das Material zulässt.

### 3.3 Polarization and Depolarization Currents (PDC)

Um die physikalischen Phänomene des Polarisierungs- und Depolarisationsstromes zu verstehen, werden im folgenden Kapitel die mathematischen Grundlagen zur dielektrischen Antwortfunktion nach Zaengl [Zae03] und Koch [Koc08] dargestellt.

#### Stromdichte und dielektrische Antwortfunktion

In einer vakuumisolierten Elektrodenanordnung ist die elektrische Flussdichte  $D$  proportional zur elektrischen Feldstärke  $E$  über Formel 3.6 oder bei wechselnder Spannung über Formel 3.7 definiert.

$$D = \varepsilon_0 \cdot E \quad (3.6)$$

$$D(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t) \quad (3.7)$$

Wobei  $\varepsilon_0$  als Permittivität des Vakuums definiert ist. Wird das Vakuum durch ein sowohl isotropisches als auch dielektrisches Material ersetzt, so erhöht sich die elektrische Flussdichte  $D$  um die von dem Material abhängige Polarisation  $P$ .

$$D(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t) + P(t) \quad (3.8)$$

Setzt man für  $P_{pol}$  die Formel 3.5 ein so erhält man Formel 3.9.

$$D(t) = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi) \cdot E(t) \quad (3.9)$$

Das elektrische Feld  $E(t)$  bewirkt in einem Material mit der Leitfähigkeit  $\sigma$  eine Stromdichte  $J(t)$ , welche als Summe der Leitungsstromdichte  $j_l = \sigma_0 \cdot E(t)$  und der Verschiebungsstromdichte  $j_v = \frac{dD(t)}{dt}$  betrachtet werden kann. Dies wird in der Maxwell-Theorie mit dem Durchflutungsgesetz wie folgt ausgedrückt:

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 \cdot E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (3.10)$$

Wird jetzt für die elektrische Flussdichte  $D$  die Formel 3.8 eingesetzt so erhält man Formel 3.11.

$$J(t) = \sigma_0 \cdot E(t) + \varepsilon_0 \cdot \varepsilon(\infty) \cdot \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt} \quad (3.11)$$

Wobei  $\varepsilon(\infty)$  der Hochfrequenzanteil der Permittivität ist.

Wird das elektrische Feld zugeschaltet, so kann  $E(t)$  über die Einheitssprungfunktion  $\Theta(t)$  mit der Amplitude  $E_0$  beschrieben werden. Dafür faltet Zaengl [Zae03] die Formel 3.11 im Zeitbereich und erhält die Stromdichte  $J(t)$  mit

$$J(t) = \sigma_0 \cdot E_0 + \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot [\varepsilon(\infty) \cdot \delta(t) + f(t)] \quad (3.12)$$

$$\text{mit } \varepsilon(\infty) = 1 + \chi(\infty) \quad (3.13)$$

Der erste Summand der Formel 3.12 beschreibt einen konstanten ohmschen Strom, welcher durch die Gleichstromleitfähigkeit  $\sigma_0$  des Materials verursacht wird. Der

zweite Summand steht für die schnellen Polarisationsprozesse, welche genau wie die Delta-Distribution  $\delta(t) = \frac{d\Theta(t)}{dt}$ , in verschwindend geringer Zeit nach Anlegen des E-Feldes auftreten und sogleich wieder verschwinden. Aus diesem Grund kann dieser Summand nicht gemessen werden. Der dritte Summand beschreibt die langsameren Polarisationsprozesse, welche zusammen mit der Leitfähigkeit genutzt werden können, um die Feuchtigkeit der Isolierung zu ermitteln. Wobei  $f(t)$  hier für die reine dielektrische Antwortfunktion steht, welche die sich verändernde relative Permittivität  $\varepsilon_r$  oder Suszeptibilität  $\chi$  über die Zeit abbildet [Koc08].

$$f(t) = \frac{d\varepsilon_r(t)}{dt} = \frac{d\chi(t)}{dt} \quad (3.14)$$

### Messung des Polarisations- und Depolarisationsstromes (PDC)

Für die Messung im Zeitbereich wird eine Gleichspannung  $U_C$  an ein Dielektrikum gelegt, sodass es zu einem unmittelbaren Polarisationstrom  $i_{pol}(t)$  kommt (siehe Abbildung 3.7).

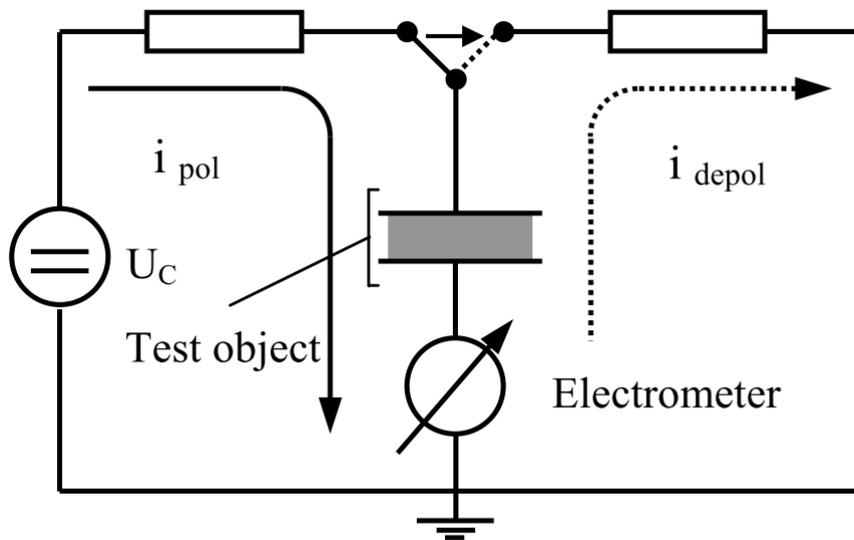


Abbildung 3.7: Aufbau einer PDC Messung [Zae03]

Das Dielektrikum kann als realer Kondensator mit der Kapazität  $C_0$  betrachtet werden. Der Polarisationsstrom setzt sich dann wie folgt zusammen:

Aus dem ersten Summanden der Formel 3.12 mit der Gleichstrom-Stromdichte  $J_{DC} = E_0 \cdot \sigma_0$  wird der Gleichstromanteil  $i_{DC}$  des Polarisationsstromes mit

$$i_{DC} = \frac{C_0 \cdot U_C \cdot \sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3.15)$$

Aus dem zweiten Summanden der Formel 3.12, welcher die Hochfrequenz-Stromdichte  $J_{HF}(t) = E_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon(\infty) \cdot \delta(t)$  angibt, Hochfrequenzanteil  $i_{HF}(t)$  des Polarisationsstromes mit

$$i_{HF}(t) = C_0 \cdot U_C \cdot \varepsilon(\infty) \cdot \delta(t) \quad (3.16)$$

Dieser tritt zum Messen zu kurz auf. Aus dem dritten und entscheidenden Summanden  $J_{dA}$ , jener mit der wichtigen dielektrischen Antwortfunktion, welche die Polarisationsprozesse abbildet, wird der dielektrische-Antwort-Strom

$$i_{dA}(t) = C_0 \cdot U_C \cdot f(t) \quad (3.17)$$

Alle drei Summanden zusammen ergeben den Polarisationsstrom  $i_{pol}$  mit

$$i_{pol}(t) = i_{DC} + i_{HF}(t) + i_{dA}(t) = C_0 \cdot U_C \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon(\infty) \cdot \delta(t) + f(t) \right] \quad (3.18)$$

Dieser Polarisationsstrom verhält sich wie der Ladestrom eines realen Kondensators und strebt der Sättigung bei etwa  $5 \cdot \tau$  entgegen, bei der dann nur noch der Gleichstromanteil  $i_{DC}$  zu messen ist.  $i_{DC}$  kann dabei in Abhängigkeit der Leitfähigkeit  $\sigma_0$  auch unmessbar klein sein.

Ist der Kondensator voll geladen, haben die Polarisationsprozesse zur maximalen Ladungsverschiebung und damit zum maximalen Dipolmoment  $p$  geführt.

Wird der Kondensator nach der Ladezeit  $t_c$  wie in Abbildung 3.7 kurzgeschlossen, entsteht ein Endladestrom, wie in Abbildung 3.8 zu sehen. Dieser Strom wird wegen der ihm zugrunde liegenden Depolarisation hier Depolarisationsstrom  $i_{depol}$  genannt.

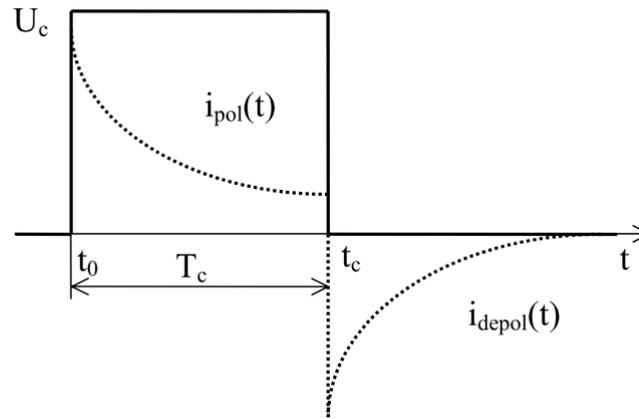


Abbildung 3.8: Verlauf des Polarisations- und Depolarisationsstromes [Zae03]

$$i_{depol}(t) = -U_C \cdot C_0 \cdot [(t) - f(t + T_C)] \quad (3.19)$$

$i_{depol}$  wird nach Zaengl aus der Umkehrung des Polarisationsstromes  $i_{pol}$  gebildet. Allerdings wird der hochfrequente Anteil  $i_{HF}(t)$  des Polarisationsstromes weggelassen, da er nicht messbar ist. Bei langen Ladezeit  $T_C$  kann der Summand  $f(t + T_C)$  vernachlässigt werden, da die dielektrische Antwort nach Formel 3.14 die Veränderung der Polarisierung darstellt und diese auf Dauer gegen Null läuft. In diesem Fall wird der Depolarisationsstrom direkt proportional zur dielektrischen Antwort.

Um die dielektrische Antwort zu erhalten, müsste man entweder sehr lange laden und dann den Depolarisationsstrom  $i_{depol}$  messen oder man spart Zeit und nutzt zusätzlich den Polarisationsstrom  $i_{pol}$ . Dieser enthält eine unbekannte Gleichstromleitfähigkeit  $\sigma_0$ , welche durch freie Ladungsträger innerhalb der Isolierung entsteht und welche es raus zu rechnen gilt. Dafür wird die Differenz zwischen  $i_{pol}$  und  $i_{depol}$  ermittelt:

$$\sigma_0(t_{max}) = \frac{\varepsilon_0}{C_0 \cdot U_0} [i_{pol}(t_{max}) + i_{depol}(t_{max})] \quad (3.20)$$

Die Zeit ( $t_{max}$ ) ist hier die längste mögliche Lade- und Entladezeit. Mit steigender Lade- und Entladezeit steigt auch die Genauigkeit [Koc08].

### 3.4 Frequency Domain Spectroscopy (FDS)

Unter der Bedingung, dass das Dielektrikum isotrop und linear ist, kann für die Übertragung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich die Fourier-Transformation auf

die Formel 3.12 angewendet werden [Koc08]. Es entsteht eine von der Kreisfrequenz abhängige komplexe Stromdichte  $\underline{J}(\omega)$  mit:

$$\underline{J}(\omega) = E(\omega) \cdot \sigma_0 + j \cdot E(\omega) \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot [1 + F(\omega)] \quad (3.21)$$

Wobei 1 die Fourier-transformierte der Delta-Distribution ist. Zaengle [Zae03] schreibt hier, dass es offensichtlich ist, dass  $F(\omega)$  die Fourier-Transformierte der dielektrischen Antwort  $f(t)$  und die komplexe Suszeptibilität  $\underline{\chi}(\omega)$  ist:

$$\underline{\chi}(\omega) = \chi' - j\chi'' = \underline{F}(\omega) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.22)$$

Setzt man jetzt  $\chi' - j\chi''$  für  $\underline{F}(\omega)$  in Formel 3.21 ein und multipliziert die eckige Klammer aus, ergibt das folgende Stromdichte:

$$\underline{J}(\omega) = \underline{E}(\omega) \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \chi''(\omega) + j \cdot [\varepsilon(\infty) + \chi'(\omega)] \right) \quad (3.23)$$

Der reale Anteil aus Formel 3.23 beschreibt hier den Gleichstromanteil durch die Leitfähigkeit  $\sigma_0$ , sowie durch die mit  $E(\omega)$  phasengleiche Polarisierung  $\chi''$ . Der imaginäre Anteil der Formel 3.23 steht für die kapazitiven Anteile der Stromdichte.

Wenn das äußere E-Feld  $E(\omega)$  sich ändert und die polarisierten Dipole diesem nicht schnell genug folgen können, generieren sie dadurch ein inneres nacheilendes E-Feld. Deswegen ist es notwendig hier die komplexe Permittivität  $\underline{\varepsilon}(\omega)$  einzuführen:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = [1 + \chi'(\omega) - j \cdot \chi''(\omega)] \quad (3.24)$$

Wenn der äußere Klammersausdruck in Formel 3.23 um  $j$  erweitert wird und der Gleichstromanteil  $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \cdot \omega} = 0$ , sowie für  $\varepsilon(\infty) = 1$  gesetzt werden, kann die komplexe Permittivität aus Formel 3.24 eingesetzt werden und dies ergibt:

$$\underline{J}(\omega) = \underline{E}(\omega) \cdot j \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot [\varepsilon_r'(\omega) - j \cdot \varepsilon_r''(\omega)] \quad (3.25)$$

**Messung im Frequenzbereich(FDS)**

Für die Messungen im Frequenzbereich wird eine sinusförmige Spannung  $\underline{U}(\omega)$  an das Dielektrikum angelegt. Da dessen Kapazität frequenzabhängig ist, kann hier von der komplexen Kapazität  $\underline{C}(\omega)$  gesprochen werden. Es fließt ein komplexer Wechselstrom mit

$$\underline{I}(\omega) = \underline{U}(\omega) \cdot j \cdot \omega \cdot \underline{C}(\omega) \quad (3.26)$$

Die komplexe Kapazität kann zerlegt werden in einen realen Anteil  $C'(\omega)$  und einen imaginären Anteil  $j \cdot C''(\omega)$ . Wendet man Formel 3.25 auf Formel 3.26 an, lassen sich auch die Bedeutungen der realen und imaginären Kapazität erklären:

$$\underline{I}(\omega) = \underline{U}(\omega) \cdot j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot [\varepsilon_r'(\omega) - j \cdot \varepsilon_r''(\omega)] \quad (3.27)$$

Demnach kann die komplexe Kapazität wie folgt beschrieben werden:

$$\underline{C}(\omega) = C_0 \cdot [\varepsilon_r'(\omega) - j \cdot \varepsilon_r''(\omega)] = C'(\omega) - j \cdot C''(\omega) \quad (3.28)$$

mit

$$C'(\omega) = C_0 \cdot [\varepsilon(\infty) + \chi'(\omega)] \quad (3.29)$$

und

$$C''(\omega) = C_0 \cdot \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \chi''(\omega) \right] \quad (3.30)$$

$C'(\omega)$  besteht aus dem konstanten Wert des Hochfrequenzanteils der Permittivität  $\varepsilon(\infty)$  und der frequenzabhängigen Suszeptibilität  $\chi'$ . In der Theorie ist  $\varepsilon(\infty)$  auch ein frequenzabhängiger Wert, aber nicht bei den hier genutzten Frequenzen von wenigen Kilohertz.  $C''(\omega)$  hingegen beinhaltet die ohmschen und dielektrischen Verluste.

Der Verlustfaktor  $\tan \delta$  ist der Quotient aus dem Imaginär- und Realteil.

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \chi''(\omega)}{\varepsilon(\infty) + \chi'(\omega)} \quad (3.31)$$

Aus seiner Frequenzabhängigkeit wird deutlich, dass eine einzelne Messung bei einer Frequenz nicht genügend Informationen über das Dielektrikum geben kann [Koc08].

### 3.5 Auswertung der dielektrischen Antwort

#### Interpretation des Verlustfaktors und des Polarisations- und Depolarisationsstromes

Um die dielektrische Antwort einer komplexen Öl-Papier-Isolation zu verstehen, ist es wichtig die dielektrische Antwort der einzelnen Materialien vorzustellen und welchen Einfluss Ölleitfähigkeit, Feuchtigkeit und dessen Geometrie verursachte Grenzflächenpolarisation (siehe Abbildung 3.12) haben. In Abbildung 3.9 werden die einzelnen dielektrischen Antworten der Zellulose und des Isolieröls veranschaulicht und darunter überlagert.

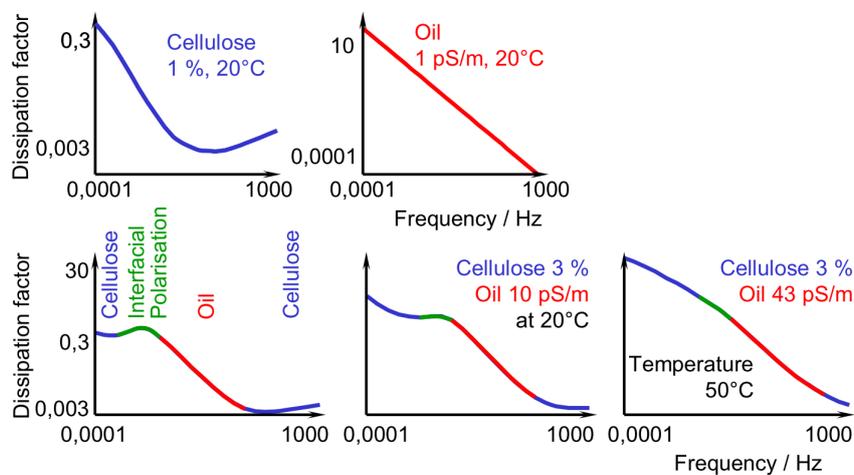


Abbildung 3.9: Durch Überlagerung der dielektrischen Eigenschaften der einzelnen Isolationsmaterialien ergibt sich die gesamte dielektrische Antwort der Isolierung [Koc08]

Durch die Überlagerung der einzelnen Teilkurven ergibt sich die Gesamtkurve, wie in Abbildung 3.10 dargestellt.

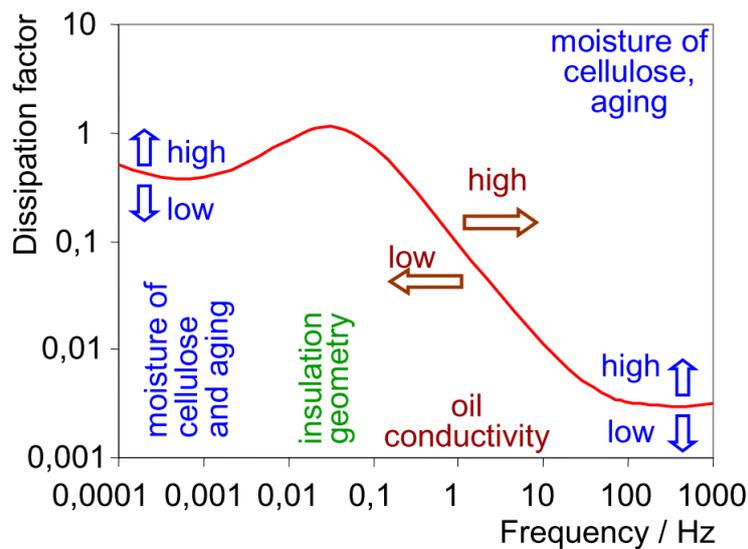


Abbildung 3.10: Dielektrische Antwort einer Öl-Papier-Isolierung [Koc08]

In diesem Fall ist der Transformator mit Öl gefüllt und es ergibt sich die typische S-Kurve als Kurvenverlauf. Wenn das Aktivteil des Transformators nicht im Isolieröl steht, was während der Trocknung anzunehmen ist, kann die Kurve aus Abbildung 3.9 oben links angewendet werden. In diesem Fall ist der Einfluss der Feuchtigkeit und Temperatur wie in Abbildung 3.11 dargestellt.

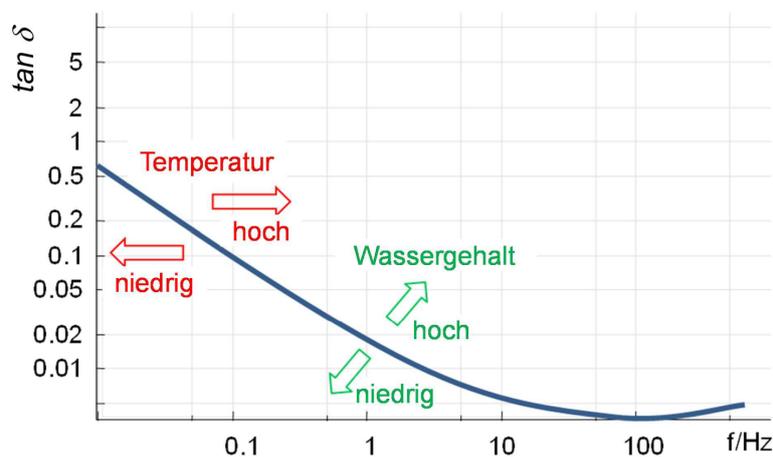


Abbildung 3.11: Dielektrische Antwort der Zellulose [RAK12]

### Einfluss der Temperatur

Die Temperatur beeinflusst die dielektrischen Eigenschaften über die Polarisations- und Leitfähigkeit. In Abbildung 3.11 wird durch die Temperaturerhöhung eine Rechtsverschiebung der Kurve deutlich. Dabei wird die Form der Kurve geringfügig beeinflusst.

Bei höheren Temperaturen ist weniger Aktivierungsenergie über das elektrische Feld

nötig, um die Elektronen zu bewegen. So wird die entsprechende Polarisierung bei höheren Temperaturen bereits bei niedrigeren Frequenzen erreicht. Mathematisch wird diese logarithmische Verschiebung über die Arrhenius-Gleichung beschrieben:

$$\log(\omega_1) - \log(\omega_2) = \frac{E_a}{\kappa} \cdot \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.32)$$

mit  $E_a$  als Aktivierungsenergie des Materials und  $\kappa$  als Boltzmannkonstante.

### **Einfluss der Grenzflächenpolarisation und das XY-Model**

Vollständig Ölfrei sind die Aktivteile, die bei Firma Miebach getrocknet werden nicht. Denn nachdem das Öl aus dem Transformator abgelassen und das Aktivteil freigelegt wurde, befindet sich noch immer ein Rest des Isolieröls in Tropfenform an der Isolierung und innerhalb der Poren des Papiers. Aus diesem Grund ist es wichtig hier den Einfluss der Grenzflächenpolarisation und der Geometrie der Isolierung auf die dielektrische Antwort vorzustellen: Das XY-Model beschreibt die Volumenanteile der zwei Materialien, aus denen die Isolierung besteht. Wenn die Isolierung als Dielektrikum eines Kondensators betrachtet wird, dann kann sie, wie in Abbildung 3.12 zu sehen ist, beschrieben werden.

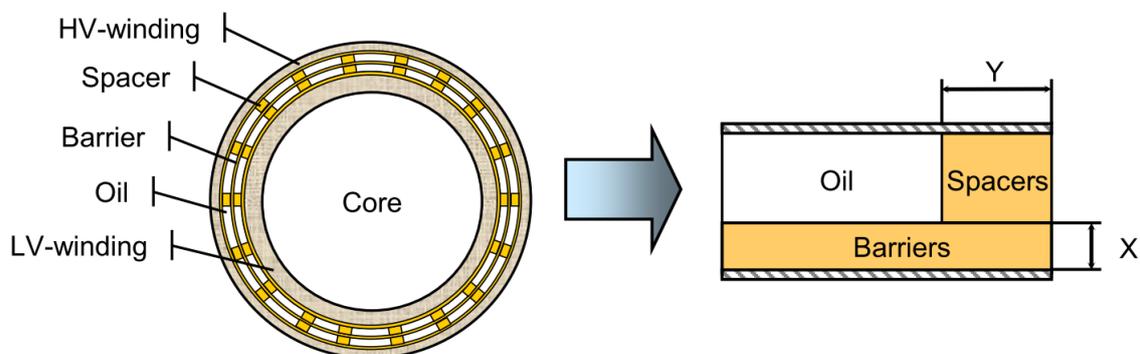


Abbildung 3.12: Darstellung der Isolationsgeometrie als Kondensator, bestehend aus zwei Materialien mit Hilfe des XY-Modells [Koc08].

Basierend auf dieser Anordnung kann die gesamte Permittivität  $\varepsilon_{ges}(\omega)$  des Dielektrikums wie folgt beschrieben werden:

$$\varepsilon_{ges}(\omega) = Y \cdot \varepsilon_{PB}(\omega) + \frac{1 - Y}{\frac{1 - X}{\varepsilon_{Oil}(\omega)} + \frac{X}{\varepsilon_{PB}(\omega)}} \quad (3.33)$$

Wobei die komplexe Permittivität des Papiers bzw. Pressspans  $\underline{\varepsilon}_{PB}$  aufgrund seiner starken polarsierbarkeit  $\alpha$  stark frequenzabhängig ist. Dagegen ist die Polarisierbarkeit von Öl eher schwach. Dessen komplexe Permittivität  $\underline{\varepsilon}_{Oil}$  kann beschrieben werden mit:

$$\underline{\varepsilon}_{Oil} = 2,2 - j \cdot \frac{\sigma_{Oil}}{\varepsilon_0 \cdot \omega} \quad (3.34)$$

Wobei der Imaginärteil hier durch die kleine Ölleitfähigkeit sehr klein ist.[Koc08]

### 3.6 Messen einer Transformatortrocknung

#### Einfluss der Feuchtigkeit auf ölfreie Zelluloseisolierung

Hauptsächlich geht es bei dieser Arbeit um die Entfernung der Feuchtigkeit aus der größtenteils ölfreien Zellulose. Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die dielektrische Antwort der ölfreien Zellulose soll hier erläutert werden. Rätzke et al. [RAK12] haben dafür Proben einer Zellulose-Isolierung angefeuchtet und zunächst mit Kapazitätsmesssystemen dessen Feuchtigkeit gemessen. Anschließend haben sie die dielektrische Antwort der Zellulose ermittelt und schließlich die Feuchtigkeit über die Karl-Fischer-Titration überprüft. Das Ergebnis ist eine Erweiterung der Datenbank wie in Abbildung 3.13.

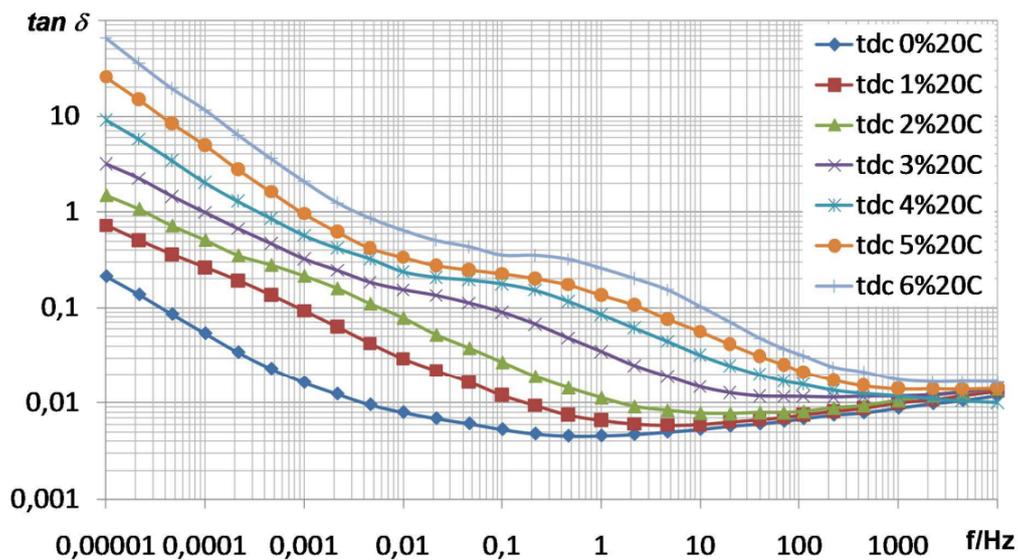


Abbildung 3.13: Dielektrische Antwort von nicht imprägnierter Zellulose mit verschiedenen Wassergehalten bei 20°C [RAK12]

### Erweiterung des XY-Modells

Wenn das Aktivteil nicht mehr im Öl steht, aber noch Reste des Öls in Tropfenform vorhanden sind, kann für das XY-Modell während der Vakuumtrocknung zusätzlich die Permittivität von Luft bzw. Vakuum  $\underline{\varepsilon}_{Air} \approx 1$  wie in Abbildung 3.14 hinzugefügt werden.

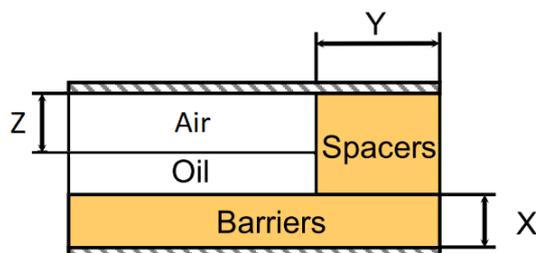


Abbildung 3.14: Erweiterung der Isolationsgeometrie um Luft beziehungsweise Vakuum.

Dann ergibt sich eine Gesamtpermittivität von:

$$\underline{\varepsilon}_{ges}(\omega) = Y \cdot \underline{\varepsilon}_{PB}(\omega) + \frac{1 - Y}{\frac{1 - (X + Z)}{\underline{\varepsilon}_{Oil}(\omega)} + \frac{X}{\underline{\varepsilon}_{PB}(\omega)} + \frac{Z}{\underline{\varepsilon}_{Air}(\omega)}} \quad (3.35)$$

Ohne dieser Erweiterung kann von der Reihenschaltung einer realen Kapazität aus Luft und Öl ausgegangen werden.

### Anwendung der dielektrischen Antwort zur Überwachung der Trocknung

Um während der Trocknung im Vakuumofen eine dielektrische Antwort über das Aktivteil zu erhalten, müssen zunächst die hitze- und vakuumfesten Messleitungen durch eine hitzefeste Vakuumdurchführung geführt werden. Im Ofen werden dann jeweils Ober- und Unterspannungsseite kurzgeschlossen und die Messleitungen mit hitze- und vakuumfesten Klemmen angeklemt (siehe Abbildung 3.15).

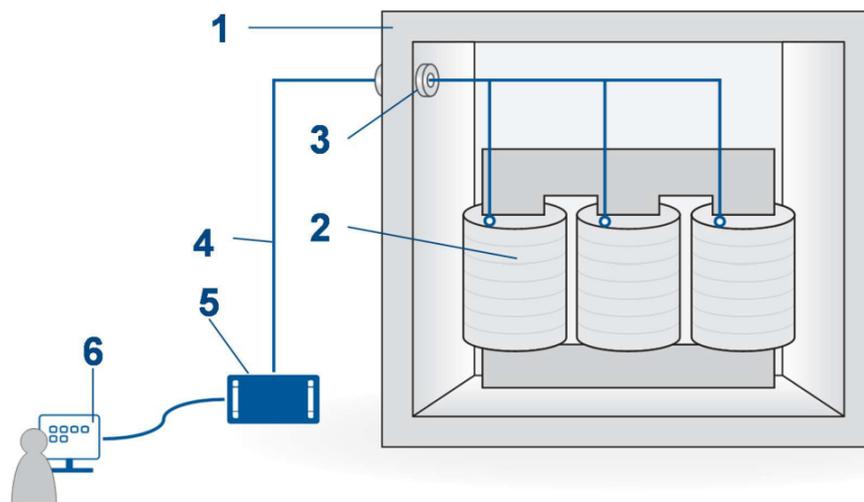


Abbildung 3.15: Schematische Darstellung des Messaufbaus [RAK12]

- |                           |               |
|---------------------------|---------------|
| 1 Vakuumofen              | 4 Messleitung |
| 2 Transformator Aktivteil | 5 Messgerät   |
| 3 Messdurchführung        | 6 PC          |

Da das Messgerät nicht gegen die hohen Temperaturen und den Unterdruck beständig ist, wird es, wie in Abbildung 3.15, außerhalb des Ofens aufgebaut und an einen PC zur Auswertung angeschlossen.

### Übertragung der Temperatur

Aus Abschnitt 3.5 geht hervor, dass zur Auswertung der dielektrischen Antwort die Temperatur der gemessenen Isolierung eine entscheidende Rolle spielt. Allerdings ist die Temperatur während des Trocknungsprozesses im Ofen und Aktivteil inhomogen verteilt. Für eine zuverlässige Feuchtigkeitsanalyse muss die Temperatur des gemessenen Dielektrikums zur Verfügung stehen. Die Firma Omicron hat für diesen Fall eine Wicklungswiderstandsmessung in ihrem Messgerät integriert. Dafür wurde mit einer Vierleitermessung der temperaturabhängige ohmsche Widerstand der Wicklungen gemessen. Über den Anstieg dieses Widerstandes kann auf die Wicklungstemperatur rückgeschlossen werden. Alternativ wird für diese Arbeit ein PT-100 Platin-Messwiderstand möglichst nah und wenn möglich zwischen die Wicklungen gesteckt.

### Ergebnisse

Die Messung wird so geloopt, dass sie regelmäßig in einem von der Trocknungsdauer

abhängigen Abstand wiederholt wird. Dabei ergibt sich eine Kurvenschar aus mehreren dielektrischen Antworten wie in Abbildung 3.16. Mit der richtigen Temperatur kann so der Fortschritt bei der Trocknung beobachtet werden.

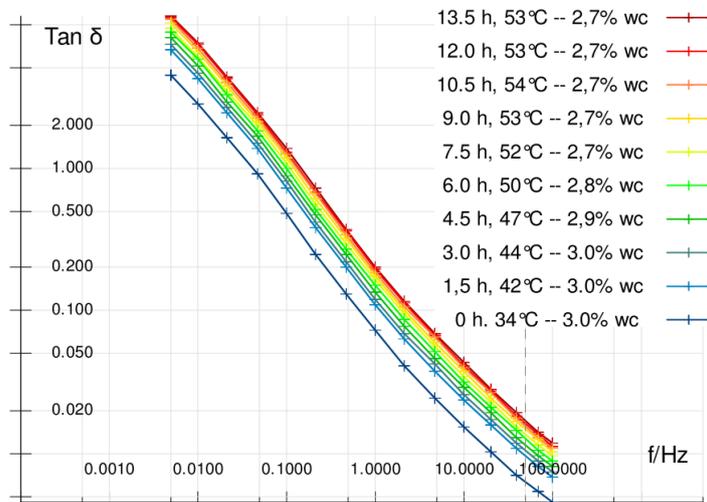


Abbildung 3.16: Dielektrische Antwort sowie die ausgewerteten Restfeuchten während der Trocknung eines Verteiltransformators [RAK12]

Problematisch wird es, wenn sich die Temperatur während der Messung stark ändert oder durch die inhomogene Verteilung nicht korrekt erfasst werden kann. Die Temperaturänderung wird zum Ende der Trocknung in der Feinvakuumphase kleiner, sodass dieser Fehler auch kleiner wird. Wie stark dieser Effekt ist und weitere Effekte, werden im Kapitel 5 untersucht.

# 4. Realisierung

In Kapitel 4 wird die Umsetzung der Hauptaufgabe erläutert. Wie in der Einleitung beschrieben, geht es um die Steuerung der Transformatortrocknung. Zunächst wird die Planungsphase und im Anschluss das anzuwendende Konzept beschrieben. Im nächsten Schritt soll die Programmierung des Programmes zur Trocknung (im folgenden: Trocknungsprogramm) der S7 und das Autohotkey-Programm vorgestellt werden. Im letzten Schritt dieses Kapitels wird das Userinterface vorgestellt.

## 4.1 Planung

Die Planungsphase hatte am 17.05.2017 mit einem Meeting bei Miebach begonnen. Im Rahmen dessen wurde folgendes Ziel festgelegt:

- Zeit- und Energieersparnis bei der Trocknung
- Automatisierung der Anlage durch Ansteuerung der alten S5-100U mit einer neuen S7-1200
- Messung der Feuchtigkeit während der Trocknung mittels vorhandenen Diranas
- Übermittlung von Prozessstörgrößen, z.B. mit SMS oder E-Mail

Des Weiteren wurden die Bedingungen des Trocknungsprozess bei Miebach besprochen:

- Die Temperatur soll über ein PT-100 im Aktivteil abgegriffen werden
- Die maximale Temperatur im Aktivteil soll  $65^{\circ}\text{C}$  betragen
- Der Druck soll während des Feinvakuums zwischen  $0,15 - 0,7 \text{ mbar}$  betragen

Dabei gilt für Verteiltransformatoren:

- Die maximale Temperatur ist üblicher Weise nach 24 Stunden erreicht

- Die Vakuumpfahrt soll etwa 12 Stunden dauern

Und für größere Leistungstransformatoren mit bis zu 31 MVA und 110 kV gilt:

- Die maximale Temperatur ist üblicher Weise nach 2 bis 3 Tagen erreicht
- Es sind mindestens 2 Vakuumpfarten notwendig

## 4.2 Das Lösungskonzept

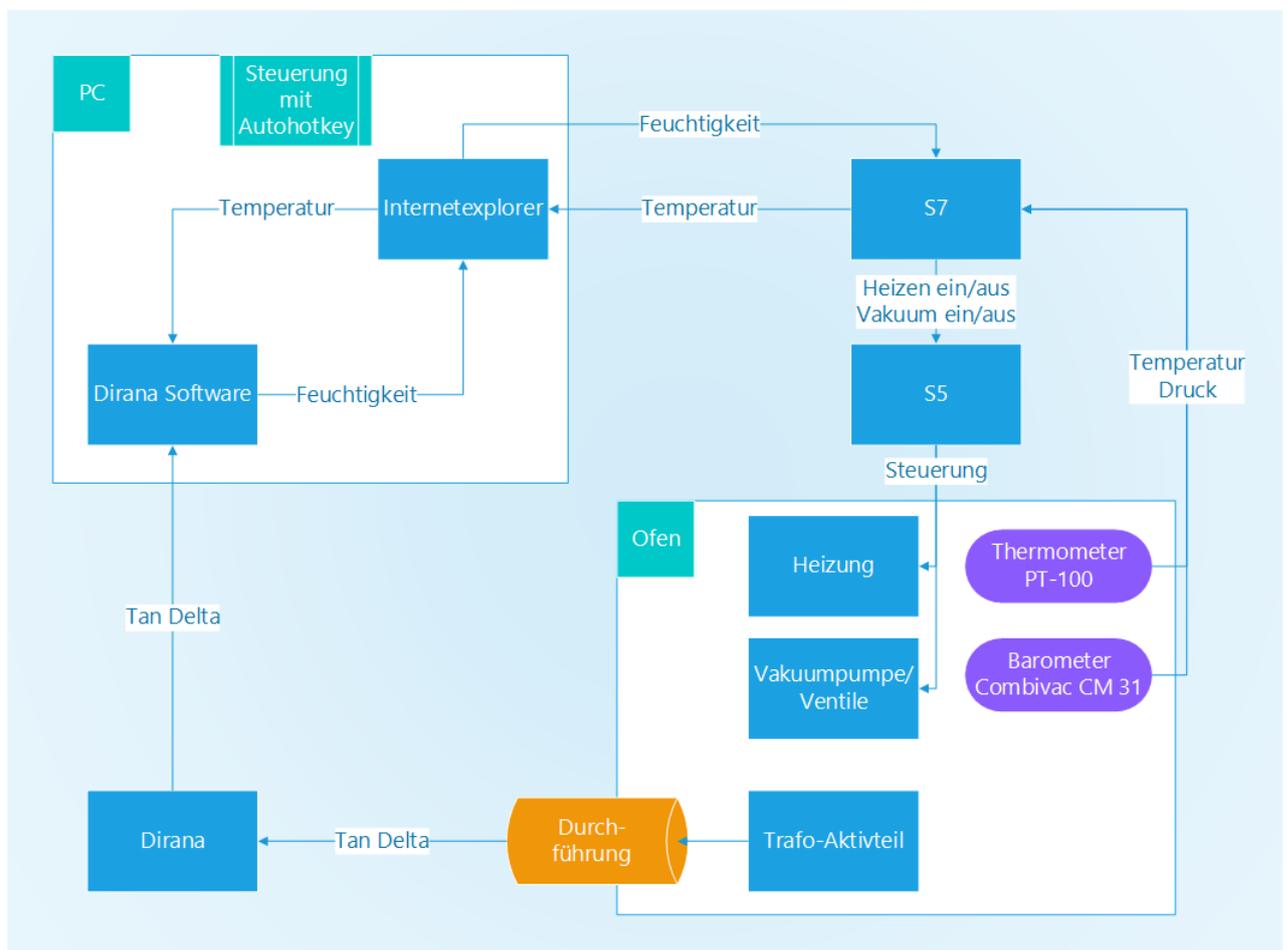


Abbildung 4.1: Konzept zur Automatisierung des Ofens

In Abbildung 4.1 wird das fertige Lösungskonzept zur Automatisierung des Ofens dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte dazu erklärt.

### Auswahl der Speicherprogrammierbaren Steuerung

Zunächst galt es den Ist-Zustand am Ofen zu ermitteln:

Die Vakuumpumpen, Ventile und der Deckenventilator des Ofens wurden von einer S5 von Siemens im Handbetrieb gesteuert. Der Anlagenfahrer musste bei einer Trocknung jede Eingabe per Hand vornehmen.

Es bestanden drei Möglichkeiten die Anlage zu automatisieren:

1. Es wird ein Programm für die bereits vorhandene S5 geschrieben, welches die Steuerung des Ofens übernehmen soll.
2. Die alte S5 wird komplett durch eine neue S7 ersetzt. Auf die S7 soll dann zusätzlich das Programm zur Steuerung des Ofens geschrieben werden.
3. Eine neue S7 steuert die Eingänge der S5 an und simuliert auf diese Weise die Schalterstellungen der S5.

Die S5 ist über 15 Jahre alt und es lassen sich kaum noch Programmierwerkzeuge sowie eine Entwicklungsumgebung auftreiben. Aus diesem Grund ist es notwendig für das Trocknungsprogramm eine neue speicherprogrammierbare Steuerung zu verwenden. Um den Aufwand für die Umsetzung des Trocknungsprogrammes, und um den täglichen Betrieb des Ofens nicht zu unterbrechen, wurde hier Möglichkeit 3 ausgewählt.

Die neue S7 soll in der Lage sein, als Erstes die alte S5 über deren Eingänge anzusteuern und so eine Trocknung durchzuführen. Des Weiteren wurden bei der Bestellung der S7 alle Komponenten so eingekauft, dass die S5 später vollständig ersetzt werden kann.

### **Messung der Temperatur des Aktivteils**

Die Feuchtigkeit des Aktivteils kann nur dann richtig mittels dielektrischer Antwort gemessen werden, wenn die Temperatur des Aktivteils bekannt ist (siehe Abschnitt 3.5). Für diesen Zweck wird ein PT-100 Messwiderstand direkt in das Aktivteil gesteckt und mit der S7 verbunden. Die S7 gibt dann über die Webseite auf dem PC den Wert der Temperatur aus. Auf die detaillierte Funktionsweise wird in Abschnitt 4.3 eingegangen.

### **Messung der dielektrischen Antwort**

Um den  $\tan \delta$  zur Bestimmung der Feuchtigkeit über die dielektrische Antwort zu erhalten, müssen die Kabel des DIRANA an eine hitzefeste Vakuumdurchführung angeschlossen werden (siehe Abschnitt 3.6). Im Ofen werden dann die jeweils die Oberspannungs- und Unterspannungsseite kurzgeschlossen und mit dem DIRANA

verbunden. Die Auswertung der Messung erfolgt auf dem PC.

### **Übertragung der Temperatur an DIRANA 1.6 mittels Webseite und Autohotkey**

Um die Temperatur an DIRANA 1.6 zu übertragen, werden die Temperatur und alle weiteren wichtigen Variablen über eine benutzerdefinierte Webseite der S7-1200 ausgegeben. Diese kann auf dem PC, auf dem die Daranasoftware offen ist, mit dem Internetexplorer aufgerufen werden.

Damit die Temperatur automatisch nach jeder Messung an die Diranasoftware übertragen wird, soll das Programm Autohotkey die notwendigen Eingaben unter Windows vornehmen. Auf die detaillierte Funktionsweise wird in Abschnitt 4.3 eingegangen.

### **Messung des Drucks im Ofen**

Für die Messung des Drucks im Ofen, wird das bereits vorhandene Barometer Combivac CM31 verwendet. Auf die detaillierte Funktionsweise wird in Abschnitt 4.3 eingegangen.

### 4.3 Automatisierung der Trocknung

In diesem Kapitel wird erklärt, wie die Anlage automatisiert wurde. Dafür wird zunächst die SPS-Hardware vorgestellt. Im weiteren Verlauf wird das Trocknungsprogramm genau beschrieben. Als Nächstes wird die Übergabe der Feuchtigkeit an die SPS erklärt. Schließlich wird die Bedienung durch den Anlagenfahrer gezeigt.

#### S7-1200 Hardware

Die S7-1200 soll später in der Lage sein, die S5 vollständig zu ersetzen. Demnach wurden alle Baugruppen der S7 mit den entsprechenden Ein- und Ausgängen so ausgewählt und eingekauft, dass sie die S5-100U ersetzen können. Für die Anwendung des Trocknungsprogrammen reichen jedoch folgende Komponenten aus (siehe Abbildung 4.2):

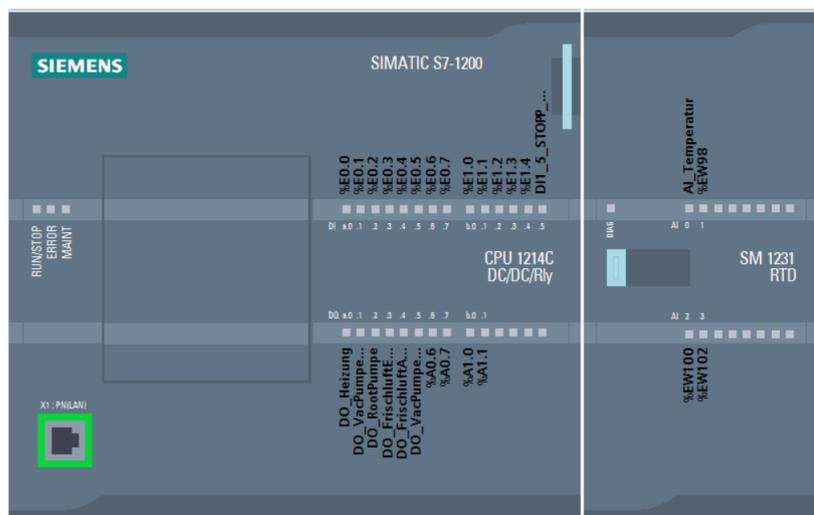


Abbildung 4.2: S7-1200 CPU 1214C und Analog-Signalmodul SM 1231 RTD

Als CPU wurde die SIMATIC S7-1200 CPU 1214C ausgewählt. Diese verfügt über eigene Relaisausgänge und digitale Eingänge, sowie über zwei analoge Eingänge, welche das 0 – 10 V Signal des Combivac CM32 zur Druckerfassung verarbeiten können. Eine Weitere für das Trocknungsprogramm relevante Baugruppe ist das Analog-Signalmodul SM 1231 RTD. Es misst den Wert des an die Moduleingänge angeschlossenen Widerstands. Damit kann die Temperatur über das PT-100 eingelesen werden.

#### Temperaturerfassung

Das Signalmodul SM 1231 RTD nutzt für die Erfassung des angeschlossenen Mess-

widerstandes PT-100 eine Zweileitermessung mit einer Konstantstromquelle. In Abbildung 4.3 wird das Messprinzip verdeutlicht.

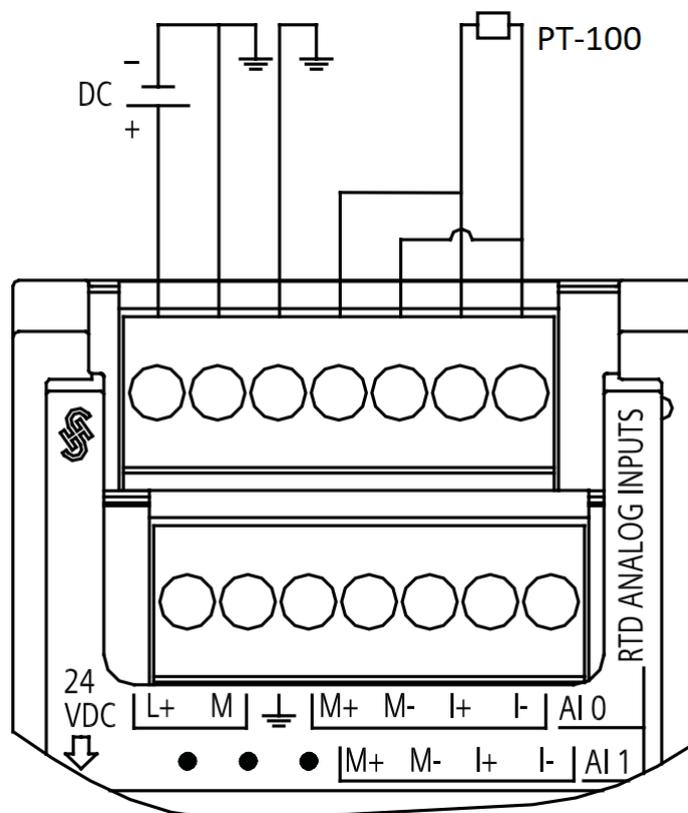


Abbildung 4.3: Analog-Signalmodul SM 1231 RTD mit Zweileitermessung zur Temperaturmessung [Sie10]

Der konstante Strom wird von I+ nach I- der Messgruppe AI 0 mit  $I = 80 \text{ mA}$  getrieben. Diese Stromquelle muss bei steigendem Widerstand, in Folge der Temperaturerhöhung, die treibende Spannung erhöhen. Die treibende Spannung wird hochohmig zwischen M+ und M- abgegriffen. Die Temperatur  $t_{temp}$  lässt sich wie folgt bestimmen:

$$t_{temp} = \frac{R_{temp} - R_0}{\alpha_{PT100} \cdot R_0} \quad (4.1)$$

$R_{temp}$  entspricht hier dem gemessene Widerstand.  $\alpha_{PT100}$  ist der materialabhängige Temperaturkoeffizient mit  $\alpha_{PT100} = 0,00385055^\circ\text{C}^{-1}$  und  $R_0 = 100 \Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$ .

Die Lanze des PT-100 Messwiderstand wird während der Trocknung, wie in Abbildung 4.4 zu sehen, in das Aktivteil gesteckt. Dabei ist darauf zu achten, dass es sich möglichst nah an der zu messenden Windung befindet.



Abbildung 4.4: PT-100 Temperaturmesswiderstand in der Papierisolierung während der Trocknung

### Druckerfassung

Zur Druckerfassung wird das bereits am Ofen verbaute Vakuummeter Combivac CM 31 genutzt. Um den Wert für den Druck an die S7-1200 zu übergeben, wird der 0 – 10 V Analogeingang der S7-1200 CPU 1214C genutzt. Das Vakuummeter gibt eine Ausgangsspannung  $U_a$  in V, über welche der Druck  $p$  in *mbar* gemessen wird, wie folgt aus:

$$U_a = \frac{10}{6} \cdot (\log p + 3) \quad (4.2)$$

Nach  $p$  umgestellt berechnet die S7-1200 CPU 1214C den Druck über die Eingangsspannung  $U_e$  mit:

$$p = 10^{\left(\frac{10}{6} \cdot U_e + 3\right)} \quad (4.3)$$

Die logarithmische Berechnung der Ausgangsspannung ermöglicht so die Verwendung eines größeren Messbereichs und eine hohe Genauigkeit bei tieferen Werten.

### Ansteuerung der S5-100U über die S7-1200

Die S5-100U steuert alle Aktoren, Pumpen und Ventile des Ofens. Dabei wird sie vom Anlagenfahrer über mehrere Schalter und Zweiwegschließer gesteuert. Die Ausgänge der S7-1200 werden parallel zu den Steuerschaltern, wie in Abbildung 4.5 auf die Eingänge der S5 gelegt.

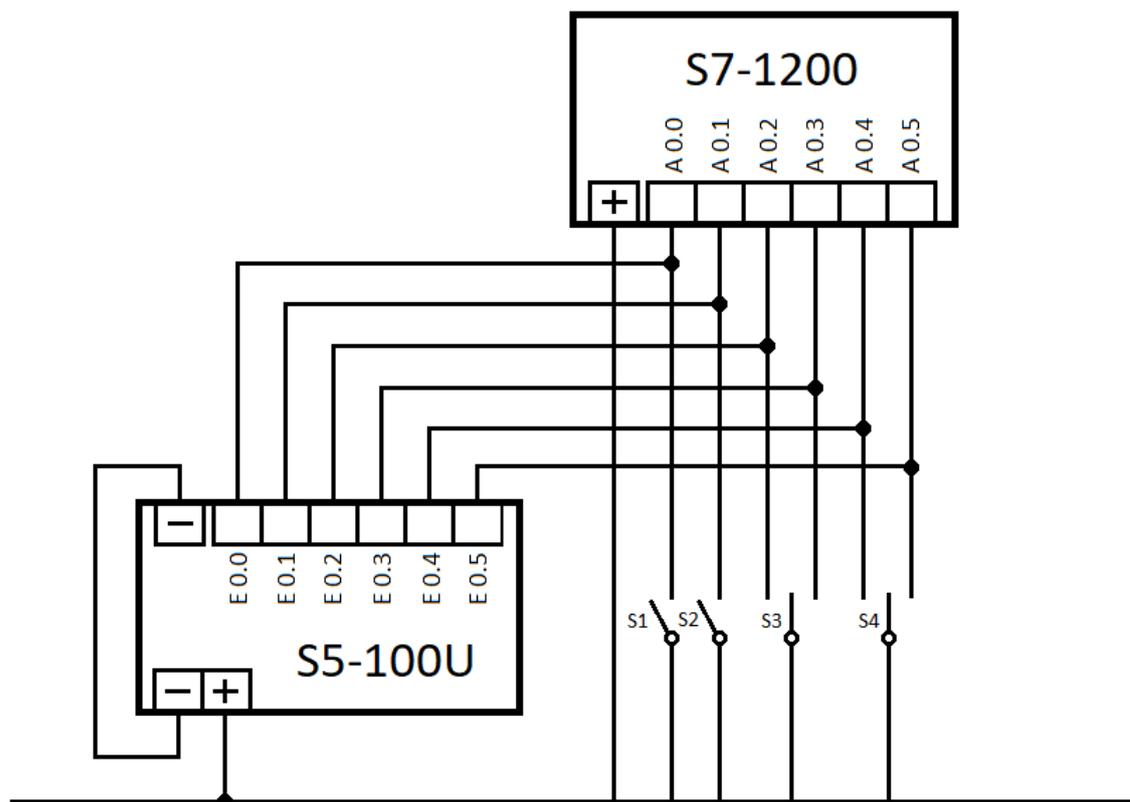


Abbildung 4.5: vereinfachte Darstellung der Ansteuerung der S5-100U-Eingänge durch die S7-1200-Ausgänge

Ursprünglich wurden nur die Schalter S1 bis S5 vom Anlagenfahrer zur Steuerung der Trocknung genutzt. Wobei S1 und S2 einfach Schließer sind, welche die Heizung und die Rootspumpe einschalten. S3 und S4 sind Zweiwegschließer mit der Neutralstellung offen. Sie schalten sowohl die Vakuumpumpe, als auch die Frischluftzufuhr an und aus. Danach kehren sie wieder in die Neutralstellung offen zurück. Die Ausgänge A0.0 bis A0.5 der S7-1200 werden jetzt parallel zu den Schalter S1 bis S4 auf die Eingänge E0.0 bis E0.5 der S5-100U gelegt, sodass die S7-1200 die Steuerung übernehmen kann. Während der Trocknung werden die Schalter S1 bis S4 nicht mehr verwendet, können aber jederzeit zum Steuern und Eingreifen betätigt werden.

### Trocknungsprogramm

Der Ablauf einer Transformatortrocknung wird in Abschnitt 2.6 beschrieben. Das Trocknungsprogramm soll diese Trocknung automatisieren.

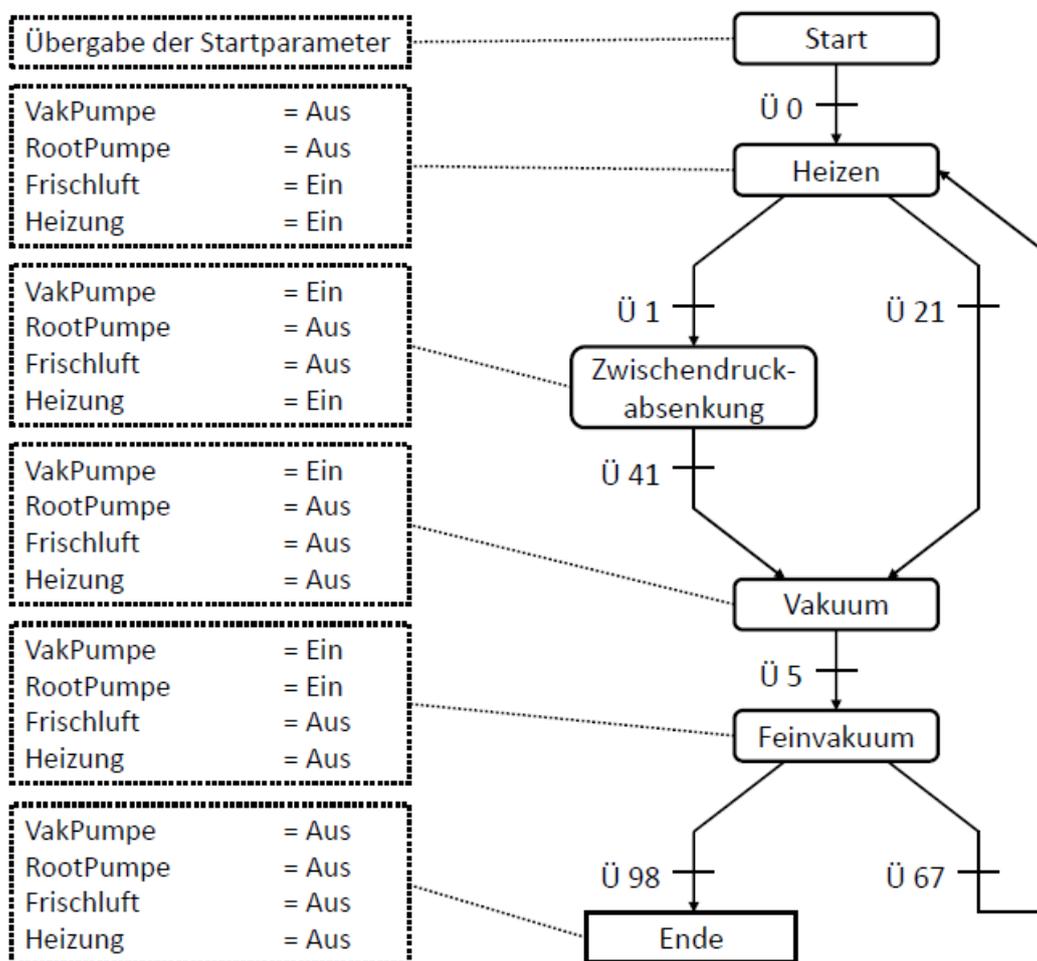


Abbildung 4.6: vereinfachtes Petrinetz des Trocknungsprogrammes

In Abbildung 4.6 wird die Reihenfolge der einzelnen Phasen, wie *Heizen*, *Zwischendruckabsenkung* usw., aufgezeigt. Diese Phasen werden durch die Übergangsbedingungen Ü0 bis Ü98 aktiviert. Jeder Phase ist eine Kombination aus Steuerzuständen zugeordnet (siehe Abbildung 4.6 linke Seite). Im Folgenden werden die Phasen und Übergangsbedingungen beschrieben, die verwendeten Zahlenwerte der Temperaturen, Drücke und Feuchtigkeiten können vom Anlagenfahrer an das jeweilige Aktivteil angepasst werden.

- **Heizen**

Nach dem *Start* wird das Aktivteil in der Phase *Heizen* erwärmt. Es wird

die Frischluft und Heizung zugeschaltet. Die Vakuumpumpe und Rootspumpe (in Abbildung 4.6 als VakPumpe und Rootpumpe bezeichnet) sind ausgeschaltet.

- **Ü1:** Zwischendruckabsenkung = true  
Ist-Temperatur > 45°C
- **Zwischendruckabsenkung**  
In dieser Phase bleibt die Heizung an. Es werden die Frischluftventile geschlossen und die Vakuumpumpe eingeschaltet. Der Luftdruck wird bis auf 30 *mBar* reduziert und anschließend durch die Öffnung der Frischluftventile auf Normaldruck gebracht. Die Vakuumpumpe wird mit der Öffnung der Frischluft abgeschaltet.
- **Ü41:** Ist-Temperatur > 64°C  
Delta Feuchtigkeit < 0,1 %/h
- **Ü21:** Zwischendruckabsenkung = false  
Ist-Temperatur > 64°C  
Delta Feuchtigkeit < 0,3 %/h
- **Vakuum**  
In dieser Phase wird die Heizung abgestellt, die Frischluftventile geschlossen und die Vakuumpumpe eingeschaltet.
- **Ü5:** Ist-Druck < 25 *mbar*
- **Feinvakuum**  
Die Rootspumpe wird zusätzlich eingeschaltet, um den Druck weiter bis auf den minimal möglichen Druck zu reduzieren.
- **Ü67:** Ist-Feuchtigkeit > Ziel-Feuchtigkeit  
Anzahl Vakuumfahrten < Maximale Anzahl Vakuumfahrten  
Anzahl Vakuumfahrten ++1
- **Ü98:** Ist-Feuchtigkeit ≤ Zielfeuchtigkeit  
Anzahl Vakuumfahrten ≥ Maximale Anzahl Vakuumfahrten
- **Ende**  
Die Trocknung ist beendet. Die Vakuumpumpe und Rootspumpe werden abgeschaltet. Die Ventile bleiben geschlossen. Das Aktivteil kühlt aus. Der Anlagenfahrer kann das Aktivteil bei Bedarf aus dem Ofen fahren.

### Programmierung der S7-1200

Für die Programmierung wird die Entwicklungsumgebung *TIA Portal V15* von Siemens verwendet. Es werden zunächst die Betriebsmittel S7-1200CPU 1214C und das Analog-Signalmodul SM 1231 RTD eingerichtet. Anschließend werden alle Variablen sowie die notwendigen Ein- und Ausgänge angelegt.

Das Anwenderprogramm wurde über eine „strukturierte Programmierung“, wie in Abbildung 4.7 vereinfacht dargestellt, realisiert.

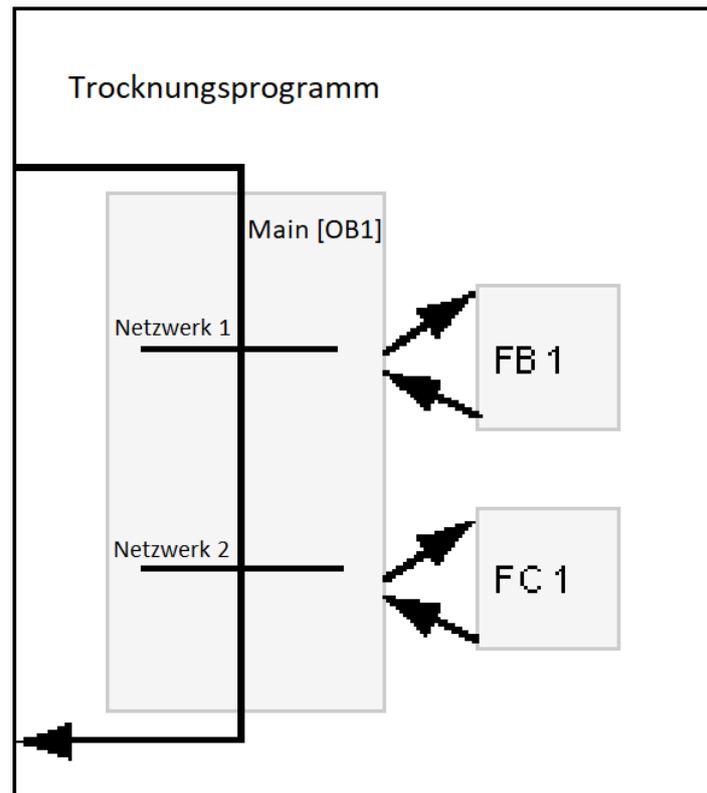


Abbildung 4.7: vereinfachte Darstellung der strukturierten Programmierung des Trocknungsprogrammes

Das bedeutet, dass die Automatisierungsaufgabe in kleine Teilaufgaben, wie Funktionsbausteine [FB] und Funktionen [FC] untergliedert ist, die den technologischen Funktionen des Automatisierungsprozesses entsprechen bzw. mehrfach verwendet werden. So ist der Hauptorganisationsbaustein „*Main [OB1]*“ in 7 Netzwerke N1-N7 mit folgenden Funktionen gegliedert:

- **N1: CPU-Stopp**

Zum Stoppen der CPU bei Fehlern wird der Eingang E1.5 verwendet.

- **N2: Temperatur lesen**

Dieses Netzwerk enthält die Funktion „Temperatur lesen“. Diese fragt den

analogen Eingang des SM1231 RTD den Widerstand des PT-100 ab. Über diesen wird anschließend die Temperatur nach Formel 4.1 berechnet und an den Haupt-Funktionsbaustein „*Automat Trocknen [FB2]*“ übergeben.

- **N3: Druck lesen**

Dieses Netzwerk enthält die Funktion “Druck lesen“. Dabei wird über die Eingangsspannung des Analogeingangs der S7-1200 CPU 1214 C der Druck nach Formel 4.3 berechnet und dieser an den Haupt-Funktionsbaustein „*Automat Trocknen [FB2]*“ übergeben.

- **N4: Lese Fehler**

Sollten der Druck oder die Temperatur Werte außerhalb des Wertebereichs haben, so wird dies als Fehler ausgegeben und die Trocknung kann nicht gestartet werden. Wenn der Fehler behoben wurde, kann er in diesem Netzwerk quittiert werden, sodass die Trocknung starten kann.

- **N5: Anlage einschalten zum Trocknen**

Über dieses Netzwerk kann die Trocknung initialisiert werden. Dabei wird überprüft, ob Fehler vorliegen. Ist dies nicht der Fall, wird die Trocknung freigegeben.

- **N6: Stopp -> alles Aus**

Über dieses Netzwerk werden bei Ende der Trocknung alle Aggregate über die S5-100U abgeschaltet.

- **N7: Automat Trocknen [FB2]**

Dieses Netzwerk beinhaltet den Funktionsbaustein „*Automat Trocknen [FB2]*“, welcher das Trocknungsprogramm aus Abbildung 4.6 beinhaltet.

Im Anschluss wird die Webseite der SPS angelegt. Diese wird zur Steuerung der S7 und zum Austausch der Temperatur- und Feuchtigkeitswerte genutzt.

### **Konfiguration der DIRANA Software**

Die Messung der dielektrischen Antwort während der Trocknung erfolgt wie in Abschnitt 3.6 beschrieben. Dazu wird das Messgerät DIRANA von der Firma Omicron verwendet (siehe Abbildung 4.8). Dieses gibt den Verlustfaktor und Polarisationsstrom über eine USB-Schnittstelle an den PC weiter. Auf dem PC läuft die Betriebssoftware DIRANA 1.6, über welche die Auswertung erfolgt. Vor der Trocknung wird die entsprechend dem Aktivteil vorkonfiguriert.



Abbildung 4.8: das DIRANA von der Firma Omicron bestimmt den Feuchtegehalt von Leistungstransformatoren [Omi18]

Messung konfigurieren: Messung 0

Name der Konfiguration: <Name für Konfigura> Als neue Standardkonfiguration festlegen

Anschlüsse Einstellungen

Art des Prüfobjekte Leistungstransformator (2 Wicklung) v

Messung	Kanal 1: Kapazität	Kanal 1: Modus	Kanal 2: Kapazität	Kanal 2: Modus
Hauptisolation (H - L)	CHL	UST	None	n/a
Hauptisolation (H - L) und Isolation H - Kessel	CHL	UST	CH	GSTg
Hauptisolation (H - L) und Isolation L - Kern	CHL	UST	CL	GSTg
Isolation H - Kessel	CH	GSTg	None	n/a

Geschätzte Messzeit 00:31:39 (h.m.s)  Meldung anzeigen, wenn die Messung früher gestoppt werden kann.

OK Abbrechen Hilfe

Abbildung 4.9: Auswahl des Leistungstransformators mit 2 Wicklungen als Prüfobjekt

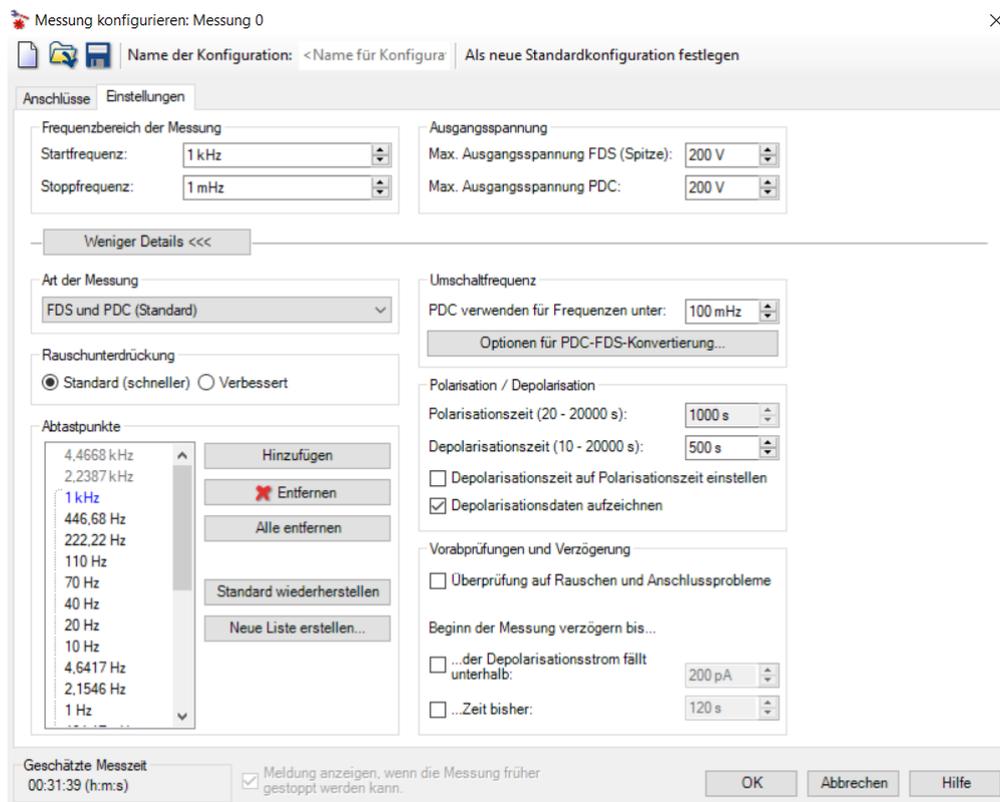


Abbildung 4.10: Einstellen der Messpunkte der FDS-Messung und Dauer der PDC-Messung

Zunächst wird ein Speicherort für die Messergebnisse festgelegt. Dann wird festgelegt, dass es sich um die Messung eines Leistungstransformators mit 2 Wicklungen handelt (Siehe Abbildung 4.9). Anschließend werden die abgefragten Frequenzen der FDS-Messung, die Umschaltfrequenz und die Länge der PDC Messung eingestellt (siehe Abbildung 4.10).

### Autohotkey

Mit der Skriptsprache Autohotkey (kurz AHK) können Eingaben eines menschlichen Nutzers imitiert werden. Auf diese Weise können einfache Abläufe automatisiert werden. In dieser Arbeit steuert AHK über die Benutzeroberfläche der Betriebssoftware DIRANA 1.6 die Messung und Auswertung der dielektrischen Antwort.

### Loopen der Messungen mittels Autohotkey

Zum wiederholten Ausführen (Loopen) der ersten Messungen wurde zunächst eine vereinfachte Version des Programmes geschrieben, über welches die Trocknung später initiiert wird. Das Programm führt folgende Schritte nacheinander aus:

1. nach der Wartezeit  $T_{Warte}$  wird die Betriebssoftware DIRANA 1.6 gestartet
2. im konfigurierten Speicherort wird ein neuer Ordner angelegt

3. Wenn noch alte Messungen vorhanden sind, werden diese in dem Ordner abgespeichert
4. über den Eingabebefehl „STRG N“ wird eine neue Messung angelegt
5. In das Feld „Name“ wird „Messung  $a$ “ geschrieben (es ist die  $a$ -te Messung)
6. Messung starten und  $T_{Dauer}$  in Minuten warten
7. Überprüfen, ob Messung beendet wurde: Wenn nein, Messung beenden
8. Mittels S7-Webseite aktuelle Temperatur beziehen (siehe nächsten Abschnitt)
9. Messung Auswerten (siehe nächsten Abschnitt)
10. Feuchtigkeit an S7 mittels S7-Webseite übergeben (siehe nächsten Abschnitt)
11. Messung Abspeichern und DIRANA 1.6 schließen
12.  $a$  um eins erhöhen
13. nach  $T_{Wiederholen}$  DIRANA 1.6 starten
14. auf Punkt 4 springen, sodass die Messung wiederholt wird

Der Name, einer jeden gespeicherten Messung, setzt sich beim Speichern aus der momentanen Uhrzeit und dem Datum zusammen. Auf diese Weise hat jede Messung einen eigenen Namen und es drohen keine Überschreibungen.

#### **Übergabe der Temperatur, Auswertung und Rückgabe Feuchtigkeit mittels Autohotkey und S7-Webseite**

Die Punkte 8, 9 und 10 wurden mit der finalen Version des Programmes ergänzt. Der Druck wird zusätzlich ausgelesen, um später über die Vakuumfahrten eventuelle Messfehler nachvollziehen zu können. Im Folgenden wird die Auswertung von Punkt 8,9 und 10 näher erläutert:

- 8.a. Aufrufen und auslesen der S7-Website
- 8.b. Auslesen des Feldes, welches die Ist-Temperatur aus der S7 anzeigt und Wert in Variable „Temperatur“ legen
- 8.c. Auslesen des Feldes, welches den Ist-Druck aus der S7 anzeigt und Wert in Variable „Druck“ legen
- 9.a. DIRANA 1.6 aktivieren

- 9.b. Druck an Feld „Kommentar“ übergeben
- 9.c. Auswertung über Eingabebefehl „SHIFT F6“ aufrufen
- 9.d. In Feld „Temperatur“ klicken und Wert der Variable „Temperatur“ übergeben
- 9.e. Bei „Leitfähigkeit des Öls“ Haken raus nehmen und Wert  $10fS/m$  eintragen
- 9.f. Button „Auswertung starten“ anklicken und 10 Sekunden warten
- 9.g. Feuchtigkeitsgehalt markieren und in Zwischenspeicher legen
- 10.a. Aufrufen und Auslesen der S7-Webseite
- 10.b. Feuchtigkeitsgehalt übergeben und bestätigen

### Bedienung

In der finalen Version zur einfachen Bedienung wird das Userinterface aus Abbildung 4.11 genutzt.

Untitled GUI

Dieses Programm übergibt die Werte Zielfeuchtigkeit, Maximal Anzahl Vakuumpfahrten; Zwischendruckabsenkung; Maximale Heiztemperatur an die S7. Dann startet es die Trocknung. Nach der Wartezeit T\_warte wird die Messungen mit der Dauer T\_Dauer gestartet und regelmäßig nach der Zeit T\_Wiederhole wiederholt.

<input type="text" value="1,2"/>	Zielfeuchtigkeit in %
<input type="text" value="4"/>	Maximale Anzahl Vakuumpfahrten
<input type="text" value="Ja"/>	Zwischendruckabsenkung
<input type="text" value="60"/>	Maximale Heiztemperatur
<input type="text" value="1"/>	T_Warte in Minuten
<input type="text" value="45"/>	T_Dauer in Minuten
<input type="text" value="60"/>	T_Wiederhole in Minuten

Abbildung 4.11: Userinterface zur Konfigurierung der S7 und zum Starten der vollautomatischen Trocknung

# 5. Messungen und Auswertung

## Messungen mit und ohne Durchführung

Damit die Feuchtigkeit während der Trocknung gemessen werden kann, muss eine hitzefeste Vakuumdurchführung an dem Ofen installiert werden. Um den Einfluss dieser Durchführung zu bestimmen, wurden nach der Installation, Testmessungen durchgeführt (siehe Abbildung 5.1).

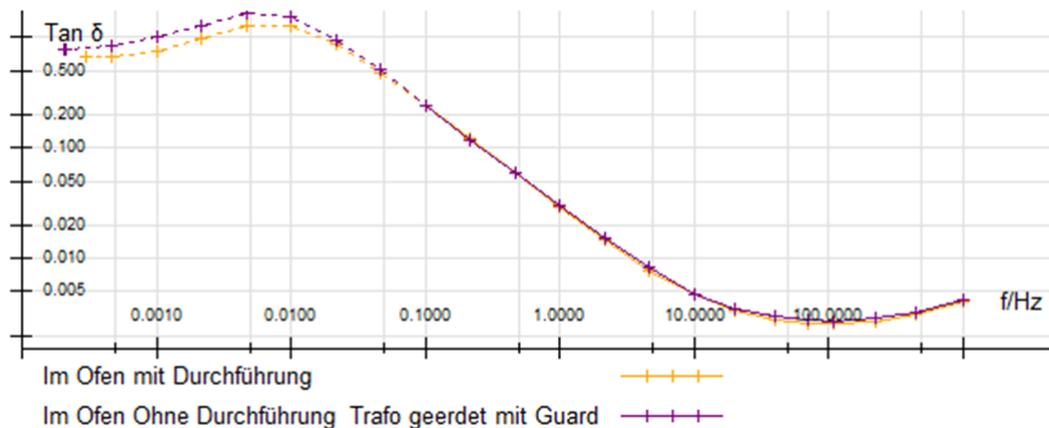


Abbildung 5.1: Messung der dielektrischen Antwort einmal mit und einmal ohne Durchführung

Die Messungen zeigen eine kleine Abweichung des  $\tan \delta$  unterhalb von  $0,01 \text{ Hz}$ . Wahrscheinlich entsteht diese Abweichung weniger durch die Durchführung, sondern als Folge der Anschlussstechnik mit Guard. Für eine Beeinflussung der Auswertung der Feuchtigkeit ist diese Abweichung zu klein.

## 5.1 Trocknung eines 25 MVA-Aktivteils

Die erste Trocknung, bei der die Messung mittels dielektrische Antwort geloopt wurde, war die Trocknung eines 25 MVA Aktivteils mit dem Baujahr 1979 (siehe Abbildung 2.19).

### Vorbereitung

Nach der Instandhaltung wurde das freie Aktivteil vor den Ofen gefahren. Es wurde

die Unterspannungsseite mit einer Kupferkurzschlussgarnitur, wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, kurzgeschlossen.



Abbildung 5.2: Kurzschluss der Unterspannungsseite des 25 MVA Aktivteils

Anschließend wurde die Oberspannungsseite mit einer weiteren Kurzschlussgarnitur kurzgeschlossen (siehe Abbildung 5.3). Das Aktivteil wurde folglich in den Ofen geschoben.

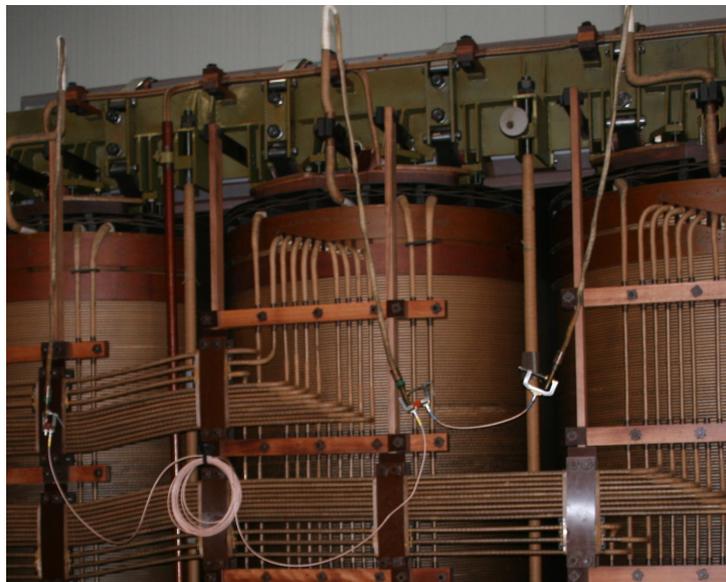


Abbildung 5.3: Kurzschluss der Oberspannungsseite des 25 MVA Aktivteils

Die Temperatur beobachtend, wurden die Messungen der dielektrischen Antwort 26 Stunden später gestartet. Abbildung 5.4 zeigt alle aufgezeichneten Messungen. Die Trocknung wurde in diesem Fall noch von Hand gesteuert. Die Temperatur wurde unregelmäßig abgelesen und nachträglich zu den Messungen hinzugefügt.

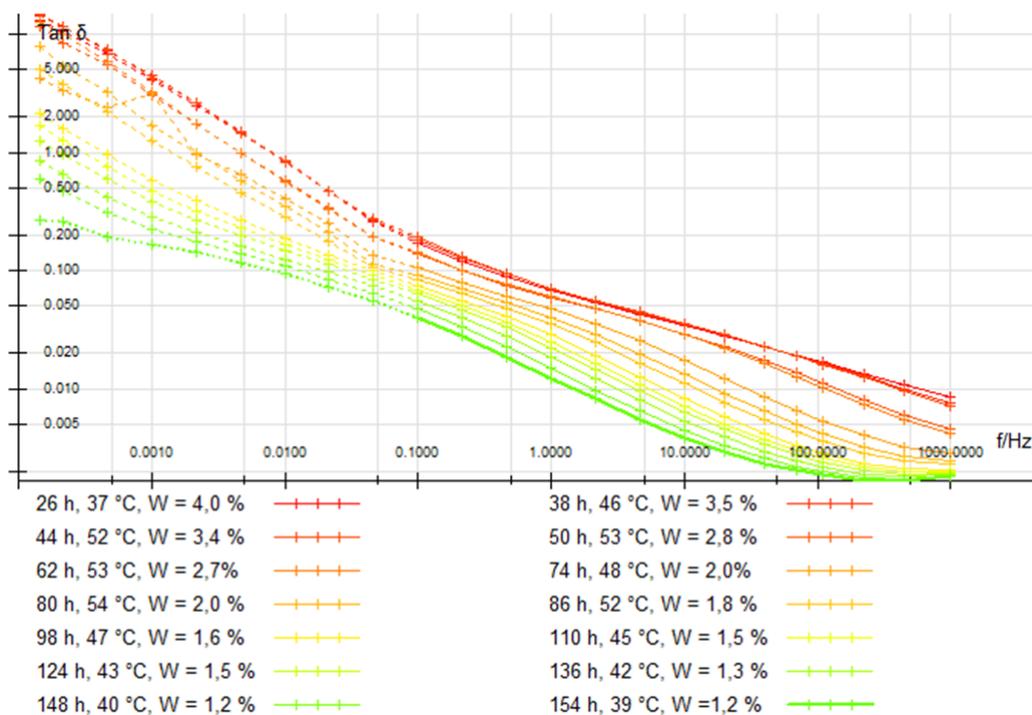


Abbildung 5.4: erste geloopte Messung: Trocknung des 25 MVA Aktivteils

### Ergebnisse

Die Trocknung dauerte 7 Tage. Es gab eine Zwischendruckabsenkung während der Heizphase und zwei Vakuumpfarten bis ins Feinvakuum auf 0,1 mbar. In Abbildung 5.5 ist der Verlauf der Trocknung zu sehen.

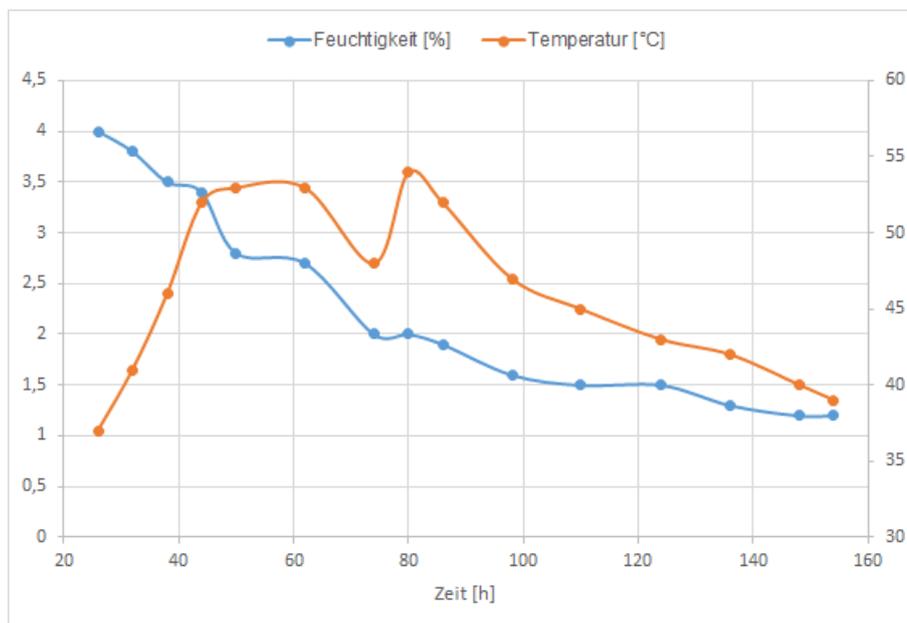


Abbildung 5.5: Verlauf der Trocknung des 25 MVA Aktivteils

Während der Zwischendruckabsenkung und der Vakuumfahrten wurde das meiste an Wasser aus dem Aktivteil getrocknet. Dies lässt sich mit dem Diagramm aus Abbildung 5.6 erklären.

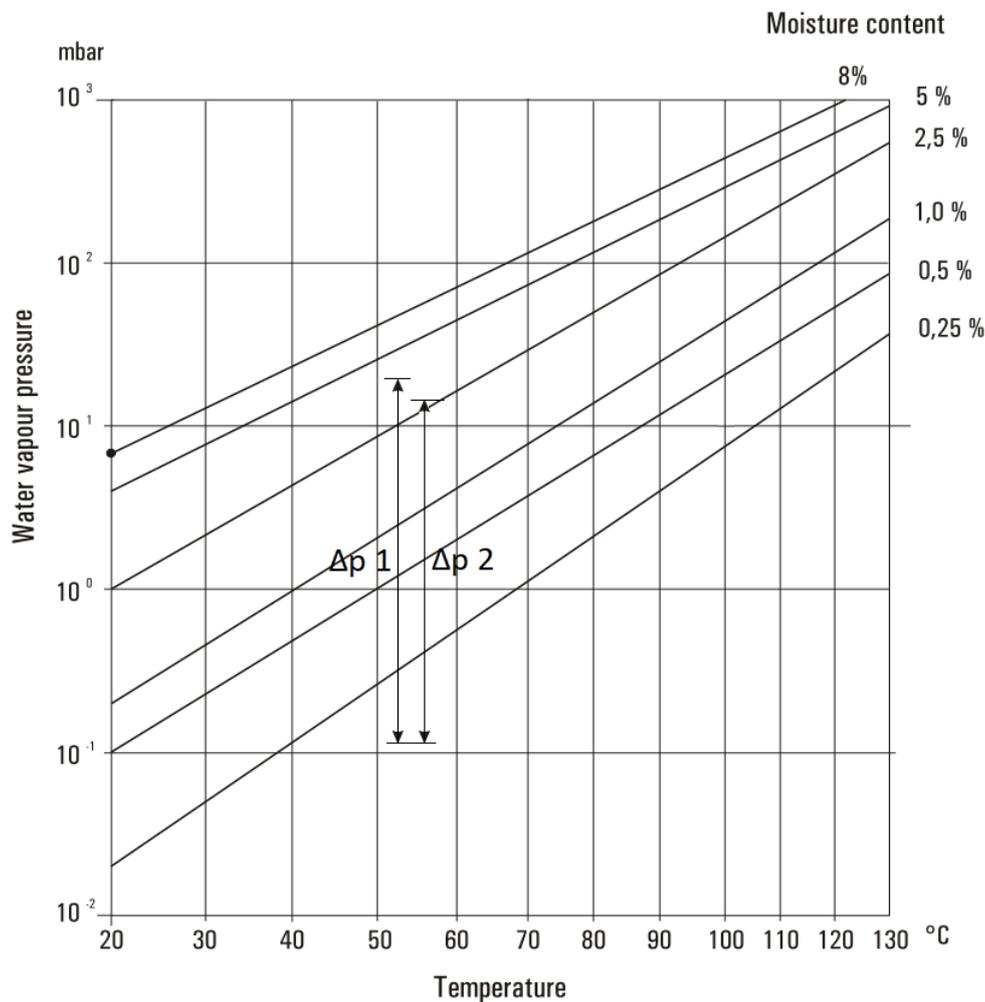


Abbildung 5.6: Treibende Druckpotentiale  $\Delta p_1$  und  $\Delta p_2$ . Ursprüngliche Quelle: [Str00], Eingezeichnete Potentiale durch den Autor dieser Masterarbeit

Innerhalb der ersten 44 Stunden wurde das Aktivteil aufgeheizt. Dabei ist die Feuchtigkeit von anfänglich 4% auf 3,4% gesunken und schließlich in Sättigung gegangen. Das liegt daran, dass während des Heizens das Papier so lange Wasser an die Umgebungsluft abgab, bis die relative Feuchtigkeit der Luft  $RH$  gleich der relativen Sättigung  $RS$  im Papier war, wie in Abschnitt 2.6 beschrieben. Die Partialdrücke des Wassers in Luft und Papier wurden gleich groß und es kam zum Stopp der Trocknung. Aus diesem Grund wurde bei Stunde 44 eine Zwischendruckabsenkung gefahren. Zusammen mit der Luft wurde auch jede Menge Wasser aus dem Ofen gezogen, denn über die Wasserabscheider der Vakuumpumpe wurden mehr als 10 Liter Wasser aufgefangen. Die infolge der Zwischendruckabsenkung verursachte Trocknung

ist in Abbildung 5.5 zwischen Stunde 44 und Stunde 50 nachzuvollziehen. So sank die Feuchtigkeit von 3,4 % auf 2,6 % ab.

Nach 68 Stunden wurde die erste Vakuumfahrt bis in das Feinvakuum geschaltet. Wird das Diagramm aus Abbildung 5.6 angewandt, so kann vermutet werden, dass das Wasser durch die Druckdifferenz  $\Delta p_1$  von 10 – 15 mbar aus dem Papier gedrückt wurde. Die PDC-Messung während dieser Vakuumfahrt wurde durch einen abfallenden Polarisationsstrom (siehe Abbildung 5.7) von 0,25 nA auf 0,16 nA gestört.

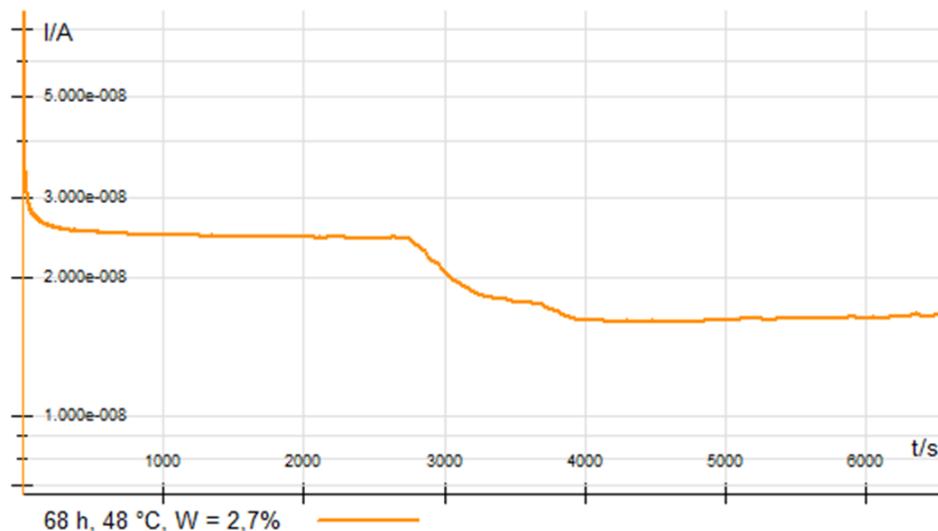


Abbildung 5.7: Polarisationsstrom der PDC-Messung bei Stunde 68

Dieser Abfall ließe sich mit der Auskühlung des Aktivteils erklären, denn durch eine geringere Temperatur steht den Elektronen weniger Aktivierungsenergie zur Verfügung (siehe in Abschnitt 3.5 Auswertung der Temperatur). Des Weiteren könnte ein Verlust des Wassers die Gleichstromleitfähigkeit  $\sigma_0$  der Isolierung reduzieren. Wenn durch Fourier-Transformation der instabile Polarisationsstrom in den Frequenzbereich übergeht, könnte es zu Fehlern bei der Feuchtigkeitsanalyse kommen.

Die nächste Messung, welche bei Stunde 74 statt fand, zeigt, dass sich durch die erste Feinvakuumfahrt die Feuchtigkeit von 2,6 % auf 2,0 % reduziert hat.

Anschließend wurde eine zweite Heizphase gefahren. Innerhalb der Heizphase ist keine Veränderung der Feuchtigkeit zu beobachten. Sobald die Temperatur des Aktivteils bei Stunde 80 eine Temperatur von 54 °C erreicht hatte, wurde eine zweite Feinvakuumfahrt gefahren. Die Druckdifferenz  $\Delta p_2$  von 10 – 15 mbar führte zu einer weiteren Trocknung auf 1,5 %. Dazu wurde die Heizung abgeschaltet und das Aktivteil sollte im Vakuum stehend bis zum Ende auskühlen. Die Messungen wurden einen Tag vor der Öffnung des Ofens beendet. Die letzte Messung ergab eine Feuch-

tigkeit von 1,2 %.

## 5.2 Trocknung eines 1600 kVA-Aktivteils

Für die nächste Trocknung stand zum ersten Mal die S7 zur Verfügung, sodass die Trocknung des 1600 kVA Aktivteils vollautomatisiert ablaufen konnte. Dieses Aktivteil ist kleiner als das zuletzt gemessene. Aus diesem Grund ist eine kürzere Trocknungszeit und nur eine Feinvakuumphase notwendig. Abbildung 5.8 zeigt einen Ausschnitt der erhaltenen dielektrischen Antworten.

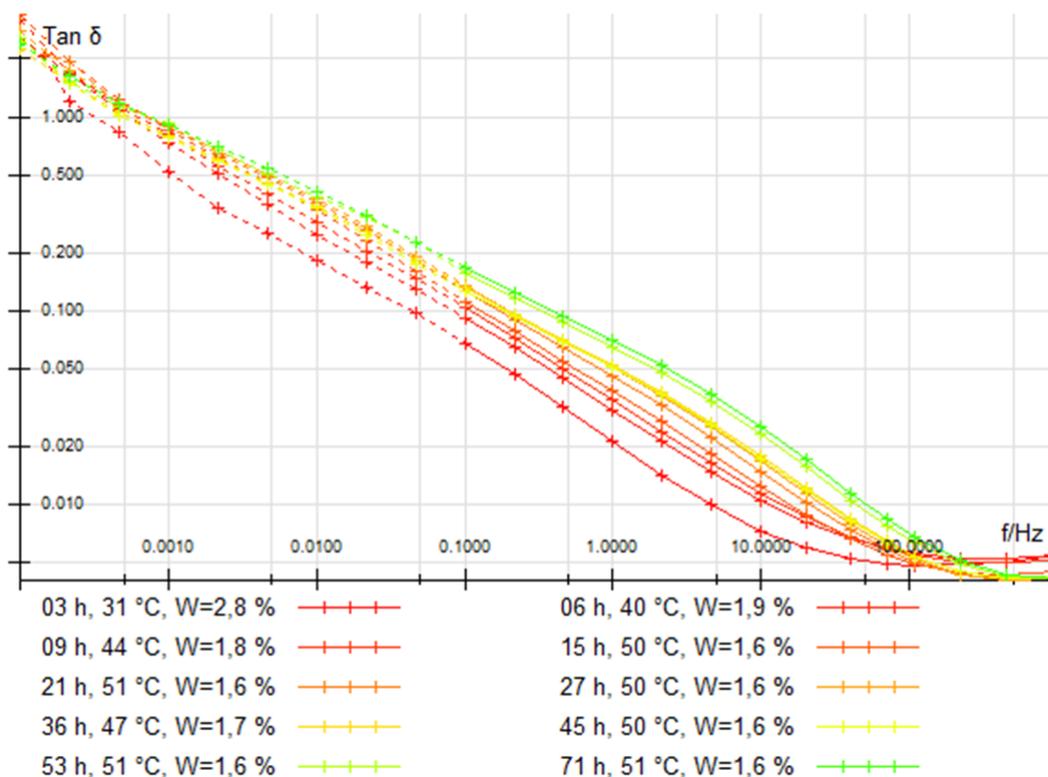


Abbildung 5.8: erste vollautomatische Trocknung eines 1600 kVA Aktivteils

Aus den dielektrischen Antworten ließ sich im Nachhinein der Verlauf der Trocknung rekonstruieren:

Während der Heizphase gab das Aktivteil die meiste Feuchtigkeit ab. Sie viel von 2,8% auf 1,9% und ging bei 1,8% in Sättigung. Nach einer Zwischendruckabsenkung viel die Feuchtigkeit weiter auf 1,6%. Eine weitere Trocknung konnte nicht erfolgen und lies sich auch nicht durch die Feinvakuumsfahrt realisieren. Da der Transformator älter ist und somit einen höheren Depolymerisationsgrad aufweist, besitzt seine Zellulose eine größere Oberfläche. Es ist daher anzunehmen, dass das verbleibende

Wasser wie in Abschnitt 2.2 beschrieben hauptsächlich über Wasserstoffbrückenbindungen fest an den aktiven OH-Gruppen chemisch gebunden ist. Eine weitere Trocknung wird daher nur unter höheren Temperaturen und damit höheren Druckpotentialen möglich sein.

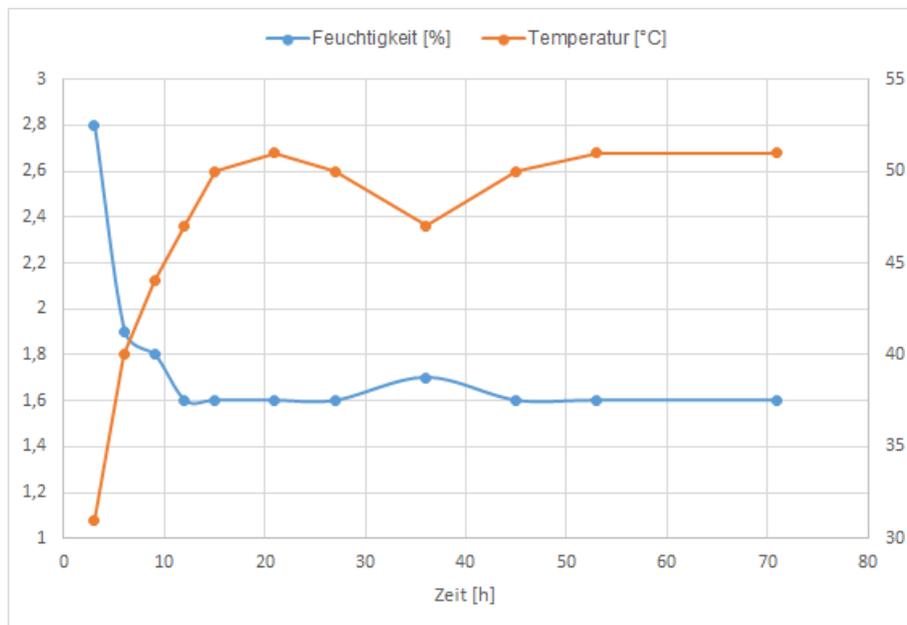


Abbildung 5.9: Verlauf der Trocknung des 1600 kVA Aktivteils

Des Weiteren fällt hier auf, dass die Feuchtigkeit nach 36 Stunden gestiegen zu sein scheint. In Abbildung 5.9 ist dieser Knick zu sehen. Wahrscheinlich ist dies ein Messfehler, welcher durch die Annahme der falschen Temperatur entstand. So ist nach 20 Stunden die die Feinvakuumphase eingeleitet wurden und das Aktivteil kühlte aus. Das PT-100, welches über den Windungen befestigt wurde (siehe Abbildung 4.4), erfasste eine höhere Temperatur. So wird die Luft um das Aktivteil wärmer gewesen sein, als die gemessenen Windungen.

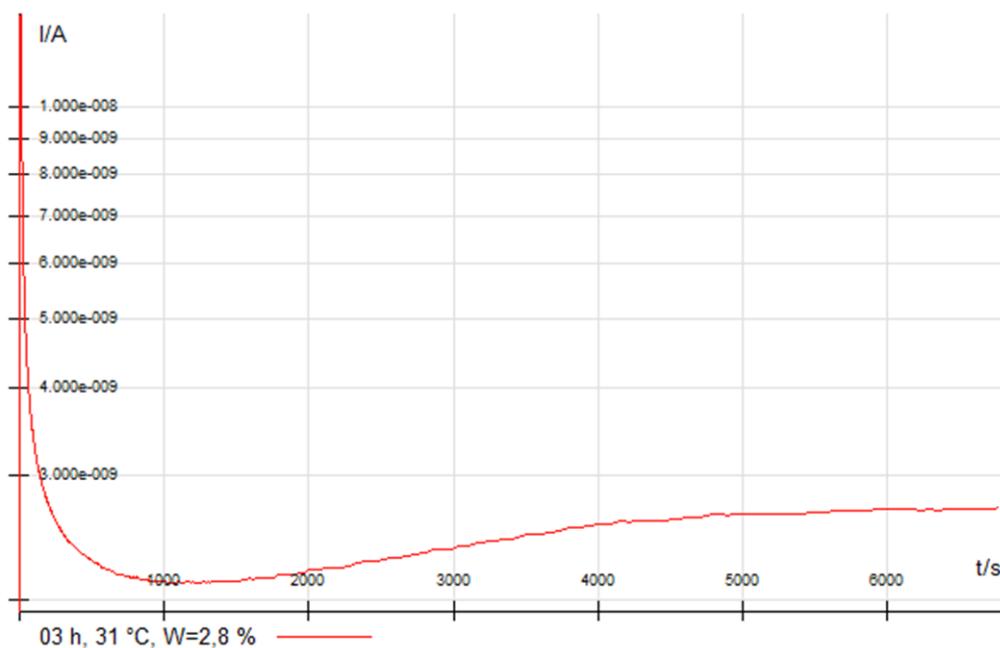


Abbildung 5.10: Polarisationsstrom der ersten dielektrischen Antwortmessung des 1600 kVA Aktivteils

Ein weiteres Messproblem entsteht wieder bei der PDC-Messung, wenn während der Messung sich die Temperatur ändert (siehe Abbildung 5.10). Dieses Mal stieg der Polarisationsstrom infolge der Temperaturerhöhung an, sodass bei der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich fehlerhafte Werte entstehen können.

Gegen Ende der Feinvakuumphase werden die FDS- und PDC-Messungen aufgrund stabiler Temperaturen genauer. Das ist gut, denn die dann abgefragte Feuchtigkeit führt zur Entscheidung, ob eine weitere Heizphase gefahren werden soll. Damit ist die zuletzt gemessene Feuchtigkeit auch die genaueste Messung.

# 6. Ansätze für weitere Optimierungsmöglichkeiten

Um den Trocknungsvorgang weiter optimieren zu können, werden im folgenden Abschnitt weitere Lösungsansätze vorgestellt:

## **Einrichten eines Hygrometers im Vakuumofen**

Um die Zwischendruckabsenkung zum optimalen Zeitpunkt einzuleiten, wäre die Installation eines Hygrometers im Vakuumofen sinnvoll. Sobald in der ersten Heizphase die relative Feuchtigkeit der Luft  $RS$  nahe der Feuchtigkeit des Aktivteils ist, kann eine Zwischendruckabsenkung eingeleitet werden. Auf diese Weise soll der Partialdruck des Wassers aus der Luft stets kleiner als der Partialdruck des Wassers in der Papierisolierung sein.

## **Berechnung der minimal notwendigen Temperatur**

Die Trocknung des  $1600kVA$  Aktivteils hat gezeigt, dass die notwendige Temperatur, für eine stärkere Reduzierung der Feuchtigkeit nicht erreicht wurde. In Abschnitt 2.6 wurde die Abbildung 2.22 zur Beschreibung der Trocknung genutzt. Für die Auswertung in Abschnitt 5.1 wurde das Diagramm aus Abbildung 5.6 genutzt, um die Druckpotentiale zu finden. Der Ofenbauer Heidrich hat den Partialdruck des Wassers innerhalb der Papierisolierung in Abhängigkeit der Temperatur und des Wassergehalts untersucht [Str00]. In Abschnitt 2.2 wurde die Bindung von Wassermolekülen in Zellulose in Abhängigkeit vom Wassergehalt beschrieben.

Eine weitere Untersuchung des zum Trocknen notwendigen Druckpotentials  $\Delta p$  in Abhängigkeit der Feuchtigkeit der Zellulose und der Temperatur, kann genutzt werden, um die minimal notwendigen Temperatur für die Trocknung zu ermitteln.

Des Weiteren benötigt das Wasser bei kleineren Wassergehalten mehr Aktivierungsenergie um die chemischen Bindungen der OH-Gruppen aufzubrechen.

## **Erweiterung des XY-Modells**

Am Ende von Abschnitt 3.6 wurde die Erweiterung des XY-Modells auf ein XYZ-Modell vorgestellt. Dieses kann in die Betriebssoftware DIRANA 1.6 implementiert werden, um bei fast ölfreien Aktivteilen die Geometrie besser anpassen zu können.

## 7. Fazit

Transformatoren gehören zu den wichtigsten Betriebsmitteln der elektrischen Netze. Bei einem Ausfall entsteht ein Millionenschaden. Durch die Umstellung von Zeit-basierter auf Zustands-basierte Instandhaltung wurden neue Diagnoseprüfungen eingeführt. Sollte die Diagnose eines Transformators eine gesteigerte Ausfallwahrscheinlichkeit aufdecken, so muss dieser Transformator in einer Transformatorwerkstatt instand gesetzt werden. Durch die Öffnung des Transformators und das Freilegen der Papierisolierung kommt es zur Aufnahme der Luftfeuchtigkeit. Die Lebensdauer und Fehlerwahrscheinlichkeit des Transformators hängt maßgeblich von seiner Feuchtigkeit ab.

Die Anforderung an den Wassergehalt der Transformatoren können durch ausreichende Trocknung erreicht werden. Die richtige Zeit für die Trocknung zu finden, erwies sich bisher als Herausforderung. Doch mit der dielektrischen Antwortmessung ist es gelungen die Feuchtigkeit während der Trocknung zu bestimmen und so die Trocknungszeit zu begrenzen, ohne ein Überschreiten des erlaubten Wassergehaltes bei der endgültigen Qualitätskontrolle zu riskieren.

Mit der Verringerung der Trocknungszeit kann in Zukunft der Primärenergieverbrauch und die benötigte Zeit reduziert werden.

In dieser Arbeit wurde bei der Firma Miebach Elektrotechnik GmbH & Co. KG in Magdeburg der Trocknungsvorgang wie folgt optimiert:

Es ist gelungen den Trocknungsvorgang mit einer SPS S7-1200 von Siemens zu automatisieren, indem die Eingänge der bereits vorhandene S5-100U angesteuert wurden. Des Weiteren übergibt die S7 an einen PC die Temperatur des Aktivteils. Dieser wertet dann zusammen mit den Daten des DIRANA auf der Betriebssoftware DIRANA 1.6 die Feuchtigkeit aus und gibt den Wert an die S7 zurück. Mithilfe der Information über die Feuchtigkeit kann die S7 dann den Trocknungsvorgang frühzeitig beenden und so Zeit und Energie sparen.

Probleme bei der Messung haben sich bei inhomogener Verteilung und schneller Änderung der Temperatur gezeigt. Da hier die Temperatur der zu Messende Isolierung nur indirekt abgegriffen werden kann, kann es zu falschen Werten der Feuchtigkeit kommen. Dies betrifft zum einen die Auswertung der PDC- und FDS-Messung.

Während der Arbeit konnte nur die Trocknung von zwei Aktivteilen genauer unter-

sucht werden. Eine größere Stichprobe und weitere Versuche können ein genaueres Trocknen mit sich bringen und eventuelle Fehler und neue Potentiale aufzeigen. Des weiteren können in Zukunft, durch Analyse der Feuchtigkeit während der Trocknung, weitere Erkenntnisse gewonnen werden, wodurch diese Arbeit zu einer stetigen Wissenszunahme führt.

# Literaturverzeichnis

- [Bei95] Michael Beigert. *Mikrodielektrometrische zerstörungsfreie Alterungsdiagnostik von PE- und VPE-isolierten Mittelspannungskabeln*. PhD thesis, Verlag nicht ermittelbar, 1995.  
(zitiert auf Seite 38 und 39)
- [BL05] Bernd Buerschaper and Thomas Leibfried. Physik des feuchteaustauschs in einem öl-zellulose isoliersystem unter beachtung des grenzschichtverhaltens. *Proc. of the VDE, ETG Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen*, 2005.  
(zitiert auf Seite 17)
- [Fas05] Gerhard M Fasching. *Werkstoffe für die Elektrotechnik: Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften*. Springer-Verlag, 2005.  
(zitiert auf Seite VII, 35 und 37)
- [GSV08] Paul Griffin, Victor Sokolov, and Boris Vanin. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems. *CIGRE WG A2. 30*, 3:4, 2008.  
(zitiert auf Seite VI, 6, 14, 15, 19, 21, 22 und 23)
- [HT04] Frank Hofmann and Stefan Tenbohlen. Wartungsarmut und reduzierte alterung von leistungstransformatoren durch hermetikabschluß. *Cigre*, 2004.  
(zitiert auf Seite 20 und 21)
- [Koc06] Stefan Koch, Maik und Tenbohlen. Wasser in leistungstransformatoren richtig messen und den zustand beurteilen. *Stuttgarter Hochspannungs Symposium*, 2006.  
(zitiert auf Seite VII, 25, 26 und 27)
- [Koc08] Maik Koch. *Reliable moisture determination in power transformers*. PhD thesis, Univ. Stuttgart, 2008.  
(zitiert auf Seite VI, VII, 2, 38, 40, 42, 44, 45, 47, 48, 49 und 50)

- [KT06] M Koch and S Tenbohlen. Ein neues verfahren zur online-feuchtemessung in leistungstransformatoren. *ETG Fachtagung Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel*, 104, 2006.  
(zitiert auf Seite VI, 10, 13 und 17)
- [Küc05] Andreas Küchler. *Hochspannungstechnik*, volume 2. Springer, 2005.  
(zitiert auf Seite VI, 12, 15, 16 und 18)
- [Omi18] Omicron. DIRANA, 2018. <https://www.omicronenergy.com/de/produkte/dirana/>.  
(zitiert auf Seite VIII und 66)
- [RAK12] Ing Stephanie Rätzke, Dipl-Ing Martin Anglhuber, and Ing Maik Koch. Überwachung der Trocknung von Transformatoren mittels dielektrischer Antwort. 2012.  
(zitiert auf Seite VII, VIII, 48, 50, 52 und 53)
- [Sch16] Fabian Schober. Elektrische Leitfähigkeit und dielektrisches Verhalten von Pressspan in HGü-Isoliersystemen. 2016.  
(zitiert auf Seite VII, 36, 37, 38 und 39)
- [Sch17] Klaus Schon. *Hochspannungsmesstechnik: Grundlagen–Messgeräte–Messverfahren*. Springer-Verlag, 2017.  
(zitiert auf Seite 35)
- [Sie10] Siemens. SIMATIC S7 1200 SM 1231 RTD-Signalmodul. Siemens AG, 2010. [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/925/43346925/att\\_61970/v1/S71200\\_SM\\_1231\\_RTD\\_Product\\_info\\_de-DE\\_de-DE.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/925/43346925/att_61970/v1/S71200_SM_1231_RTD_Product_info_de-DE_de-DE.pdf).  
(zitiert auf Seite VIII und 59)
- [Str00] Helmut Strzala. Vapour Phase Vacuum Drying. *Heidrich in House Seminar*, 2000.  
(zitiert auf Seite VI, VII, IX, 20, 28, 29, 30, 31, 32, 73 und 78)
- [Vai09] Vaisala. Oelfeuchte und Wasseraktivitaet, 2009. <https://my.vaisala.net>.  
(zitiert auf Seite 7)
- [Van08] Victor Sokolov; Jacques Aubin; Valery Davydov; Hans-Peter Gasser; Paul Griffin; Maik Koch; Lars Lundgaard; Oleg Roizman; Mario Scala; Stefan Tenbohlen; Boris Vanin. *Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems*. Conseil international des grands réseaux électriques. Comité d'études A2, 2008.  
(zitiert auf Seite 23)

[Zae03] Walter S Zaengl. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for hv power equipment. i. theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(5):5–19, 2003.

(zitiert auf Seite VII, 36, 40, 41, 42, 44 und 45)

[Zin13] Markus Zink. *Zustandsbewertung betriebsgealterter Hochspannungstransformatordurchführungen mit Öl-Papier-Dielektrikum mittels dielektrischer Diagnose*. Universitätsverlag Ilmenau, 2013.

(zitiert auf Seite 11)