

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

AiF
Forschungsnetzwerk
Mittelstand

Schlussbericht

AiF/IGF Vorhaben Nr. 20367 N: Zustandsbewertung von Isolieröl mittels Ultraschall

März 2022



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	9
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	9
1 Zusammenfassung.....	10
2 Forschungseinrichtung und Projektpartner.....	12
3 Forschungsinhalt.....	13
3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	13
3.1.1 Ausgangssituation	13
3.1.2 Stand der Forschung	14
3.2 Forschungsziele	16
3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	16
4 AP 1: Entwicklung und Umsetzung eines Prüf-/Messkonzepts	17
4.1 Entwicklung eines Prüfgefäßes.....	18
4.2 Realisierung eines Messkonzepts.....	20
4.3 Steuerung und Datenerfassung der Umgebungsparameter	26
4.4 Ultraschallprüfköpfe und Datenerfassung der Ultraschallsignale.....	28
4.5 Umsetzung der Ultraschallvermessung.....	30
5 AP 2: Materialqualifikation.....	33
5.1 Materialauswahl.....	33
5.2 Probenherstellung Feuchte.....	35
5.3 Probenherstellung zusätzlicher Abhängigkeiten.....	50
5.3.1 Gas.....	50
5.3.2 Säure.....	59
5.3.3 Feststoff im Isolieröl.....	63
6 AP 3: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen	68
6.1 Versuchsdurchführung mit Ultraschallvermessung	68
6.2 Auswertungsparameter.....	69
6.3 Ergebnisse mit Feuchte im Isolieröl	71
6.4 Ergebnisse zusätzlicher Abhängigkeiten.....	85
6.5 Beurteilung der Ergebnisse.....	96

7	AP 4: Verträglichkeit von Ultraschall im EM-Feld	98
	7.1 Platzierung des Ultraschallprüfkopfes im Transformatorsystem	98
	7.2 Auswirkung elektromagnetischer Beeinflussung am Einsatzort.....	99
8	AP 5: Tool zu Aufbereitung, Analyse und Auswertung der Daten	100
	8.1 Konzept und Aufbau	100
	8.2 Realisierung.....	101
9	Ausblick.....	105
10	Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse	106
11	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	107
12	Literaturverzeichnis	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellierung der altersabhängigen Schadenshäufigkeiten h_s (Schadenshäufigkeit pro Jahr – (Schäden / Mengengerüst) im Jahr x); insgesamt 581 Schäden und 5347 HS/MS-Transformatoren [FGH06], [FGH13]	14
Abbildung 2: Links: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit des w = Wassergehalts, Rechts: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der relativen Wassersättigung [Gla09], [Cig18]	15
Abbildung 3: CAD Zeichnung Prüfgefäß 1 (links) und Prüfgefäß 2 (rechts)	18
Abbildung 4: Prüfgefäß 1a	18
Abbildung 5: Prüfgefäß 1b	19
Abbildung 6: Dichtringe für den Deckel und Verschraubungen	19
Abbildung 7: Heizmatten mit integrierten Temperatursensoren für die Temperaturregelung	19
Abbildung 8: Befestigte Heizmatten mit integrierten Temperatursensoren für die Temperaturregelung am Beispiel von Prüfgefäß 1	20
Abbildung 9: 3D Darstellung vom Prüfgefäß mit unterschiedlichen Anschlusspunkten	20
Abbildung 10: Temperatursensor PT100 Klasse A (links) und Messwandler (rechts)	21
Abbildung 11: Drucktransmitter [Aut22]	21
Abbildung 12: Iod Dosierung bei coulometrischer und volumetrischer Karl-Fischer-Titration [Pet22]	22
Abbildung 13: Aufbau eines kapazitiven Sensors [Ata20]	24
Abbildung 14: EE360 mit multifunktionalem Display (links) und EE381 (rechts)	24
Abbildung 15: Karl-Fischer-Titrator mit Ofen (links) und Präzisionswaage (rechts)	25
Abbildung 16: Säuretitrator (links), Durchschlagsspannungsmessung (Mitte) und Gas in Öl Analyse (rechts)	26
Abbildung 17: Zentrale Steuerungseinheit im Kompaktschaltschrank mit den verschiedenen Einheiten (Versorgung, Steuerung, Regelung, Datenerfassung und Sicherheit)	27
Abbildung 18: Innenansicht Prüfgefäß mit Anschlussposition der drei Ultraschallprüfköpfe ..	28
Abbildung 19: Reflektor aus Edelstahl	28
Abbildung 20: Ultraschallmessverfahren mit resultierenden Amplituden-Laufzeit-Diagrammen, links: Impuls-Echo-Verfahren, rechts: Durchschallungsverfahren	29
Abbildung 21: Auswirkung der Schalländerung in Zeit- und Frequenzbereich	29
Abbildung 22: oben: Die empfangenen Echosignale am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes, unten: Die Prüfkopfanordnung bei der Ultraschallvermessung nach der Impuls- Echo-Methode	30
Abbildung 23: Der Auswertungsansatz des Zeitsignals am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes	31
Abbildung 24: Der Auswertungsansatz des Spektrums am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes	31

Abbildung 25: oben: Das empfangene Ultraschallsignal am Beispiel des 0,5 MHz Ultraschallprüfkopfes, unten: Die Prüfkopfanordnung bei der Ultraschallvermessung in diesem Projekt nach der Durchschallungsmethode	32
Abbildung 26: Bereitgestellte Isolierölmengen vom kooperierenden Unternehmen in diesem Projekt.....	33
Abbildung 27: Zeitsignale am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes	34
Abbildung 28: Vorgehen Probenherstellung Feuchte mit Ultraschallvernebler	35
Abbildung 29: Vorgehen Probenherstellung Feuchte mit definierten Salzlösungen	36
Abbildung 30: Trocknungs- und Befeuchtungsansatz im Vorversuch	37
Abbildung 31: Erster Versuch einer Befeuchtung durch die Langzeitmessung mit Natriumchlorid und Calciumchlorid bei Raumtemperatur, blau = rel. Feuchte im Behälter / gelb = rel. Feuchte in der Ölprobe	38
Abbildung 32: Erster Versuch einer Trocknung durch die Langzeitmessung mit Natriumchlorid und Calciumchlorid bei Raumtemperatur, blau = rel. Feuchte im Behälter und gelb = rel. Feuchte im Isolieröl.....	38
Abbildung 33: links: Anordnung für die Erzielung einer schneller und effizienteren Trocknung, rechts: Referenzmessung mit EE 360 – relative Feuchte von 2,3 % mit 1 ppm absoluter berechneter Feuchte bei 21,65 °C	39
Abbildung 34: Trocknungsbehälter (links) und Befeuchtungsbehälter (rechts), es wurde für die Befeuchtung eine gesättigte Salzlösung verwendet	39
Abbildung 35: Umwälzpumpe zwischen den Trocknungs- bzw. Befeuchtungsbehältern und dem Prüfgefäßen	40
Abbildung 36: Konzept für die Zirkulation mit Zirkulationspumpe aus Edelstahl mit Magnetkopplung	40
Abbildung 37: Konzept für die Integration des Befeuchtungs- und Trocknungsprozesses in das Gesamtsystem der Feuchtegradrealisierung	41
Abbildung 38: Links: Ölverteilung ohne Umlenk wand, rechts: mit Umlenk wand im Prüfgefäß.....	41
Abbildung 39: Untersuchung der Abhängigkeit bei unterschiedlichen Temperaturstufen mit definierten Feuchtegehalt und Druck.....	42
Abbildung 40: Aufbau Druckmessung (rechts: Anschluss Prüfgefäß, links: Druckbehälter mit Stickstoff 6.0).....	42
Abbildung 41: Referenzmessung: Direkttitration während eines Befeuchtungsprozesses	43
Abbildung 42: Referenzmessung Durchschlagsspannung mit 1. Benetzung der Innenseite Prüftasse, 2. Benetzung der Elektroden und 3. Befüllen der Prüftasse	44
Abbildung 43: Säuretitration	44
Abbildung 44: Gaschromatograph bei der FGH e.V.....	45
Abbildung 45: Vorgehensweise bei der Probenherstellung von Isolierölproben mit definierter Feuchte; Referenzmessung beinhaltet die Messung der absoluten Feuchte (mit KFT – Abbildung 15) die relative Feuchte (mit Sensor – Abbildung 14), der Temperatur (Abbildung 10 und Abbildung 14) und des Drucks (Abbildung 11).....	46

Abbildung 46: Realisierte Feuchtwerte des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes ohne Zirkulation für die Ultraschallvermessung (berechnete ppm Werte)	47
Abbildung 47: Realisierte Feuchtwerte des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes für die Ultraschallvermessung (gemessene relative Feuchtwerte)	48
Abbildung 48: Auszug GC-Messung von 4 Isolierölproben	49
Abbildung 49: Vorgehen Probenherstellung Gas	50
Abbildung 50: Realisierung eines Entgasungssystems (links) mit Vakuumfalle (Mitte/rechts).....	51
Abbildung 51: Gesamtaufbau der Isolierölentnahme mit Vakuumkammer (Entgasung)	51
Abbildung 52: Gaseinbringvorgang mit Schema (links)	53
Abbildung 53: Aufbau Rüttler.....	53
Abbildung 54: Probenentnahme für die Referenzmessungen	54
Abbildung 55: Gaseinbringvorgang	55
Abbildung 56: Verwendete Gase (vgl. Tabelle 4).....	56
<i>Abbildung 57: Auszug GC-Messung bei Probenherstellung mit Wasserstoff</i>	<i>56</i>
Abbildung 58: Einbringvorgang von Isolierölproben mit definiertem Gasgehalt in das Prüfgefäß für die Ultraschalluntersuchung	58
Abbildung 59: Vorgehen Probenherstellung Säure	59
Abbildung 60: Probenherstellung für die Säure im Isolieröl.....	60
Abbildung 61: Alterung von Isolierölproben im Ofen bei 110 °C.....	60
Abbildung 62: Vorgehen Probenherstellung Feuchte im Feststoff	63
Abbildung 63: Feststoffproben für den Alterungsprozess (links: Beispiel von PSP-Proben).....	63
Abbildung 64: Trocknung (links) und Lagerung (rechts).....	64
Abbildung 65: Lagerung von Feststoffproben im Isolieröl	64
Abbildung 66: Feuchtegehalt vom Isolieröl im Prüfgefäß während der Messung (absolute Feuchte in ppm).....	65
Abbildung 67: Feuchtegehalt vom Isolieröl im Prüfgefäß während der Messung (relative Feuchte in %)	66
Abbildung 68: Ultraschallmessung nach dem Durchschallungsprinzip (links) und Aufbau im Prüfgefäß 2 ohne Probe.....	67
Abbildung 69: Ultraschallmessung nach dem Durchschallungsprinzip mit Probe ohne Isolieröl	67
Abbildung 70: Konzept für die Integration des Befeuchtungs- und Trocknungsprozesses in das Gesamtsystem der Feuchtegradrealisierung	68
Abbildung 71: Gesamtaufbau im Labor bei der FGH e.V.....	69
Abbildung 72: Vorgehensweise bei der Datenanalyse	70
Abbildung 73: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Feuchteuntersuchung	71
Abbildung 74: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK.....	72
Abbildung 75: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK.....	72

Abbildung 76: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	72
Abbildung 77: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur der 2, 4 und 10 MHz USPK.....	73
Abbildung 78: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur der 2, 4 und 10 MHz USPK.....	73
Abbildung 79: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK	74
Abbildung 80: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK	74
Abbildung 81: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK	74
Abbildung 82: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK	75
Abbildung 83: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK	75
Abbildung 84: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK	75
Abbildung 85: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK	76
Abbildung 86: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK	76
Abbildung 87: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK	76
Abbildung 88: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK.....	77
Abbildung 89: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK.....	77
Abbildung 90: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	77
Abbildung 91: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 2 MHz USPK	78
Abbildung 92: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 4 MHz USPK	78
Abbildung 93: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 10 MHz USPK	78
Abbildung 94: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK ...	79
Abbildung 95: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK ...	79
Abbildung 96: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	79
Abbildung 97: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK.....	80
Abbildung 98: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK.....	80
Abbildung 99: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	80
Abbildung 100: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK	81
Abbildung 101: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK	81
Abbildung 102: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK	81
Abbildung 103: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK.....	82
Abbildung 104: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USP	82
Abbildung 105: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	82
Abbildung 106: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK	83
Abbildung 107: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USP	83
Abbildung 108: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	83
Abbildung 109: Feuchtemessung während Abkühlungsprozess, links: relative Feuchte in %, rechts: berechnete Feuchte in ppm.....	84

Abbildung 110: Schallgeschwindigkeiten entsprechend Feuchtegrade nach Temperaturkompensation (USPK 4MHz).....	84
Abbildung 111: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Gasuntersuchung	85
Abbildung 112: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK	86
Abbildung 113: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK	86
Abbildung 114: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK	86
Abbildung 115: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK	87
Abbildung 116: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK	87
Abbildung 117: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK	87
Abbildung 118: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK.....	88
Abbildung 119: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK.....	88
Abbildung 120: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK.....	88
Abbildung 121: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK	89
Abbildung 122: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK	89
Abbildung 123: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK	89
Abbildung 124: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Säureuntersuchung	90
Abbildung 125: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)	91
Abbildung 126: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)	91
Abbildung 127: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)	91
Abbildung 128: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)	92
Abbildung 129: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)	92
Abbildung 130: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)	92
Abbildung 131: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)	93
Abbildung 132: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)	93
Abbildung 133: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)	93
Abbildung 134: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Feststoffuntersuchung	94
Abbildung 135: Feststoff: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (links: Behälter 1, rechts: Behälter 2)	95
Abbildung 136: Feststoff: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (Behälter 1 und 2 zusammen).....	95
Abbildung 137: Feststoff: Amplitude max2 vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (Behälter 1 und 2 zusammen)	95

Abbildung 138: Korrekte Platzierung eines Feuchtigkeitssensors im Isolierölkreislauf eines Transformators [Cig18], [Cig20]	98
Abbildung 139: Fehlerhafte Platzierung im Isolierölkreislauf eines Transformators mit größeren Ansprechzeiten des Sensors [Cig20].....	99
Abbildung 140: Schematischer Ablauf	100
Abbildung 141: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools	101
Abbildung 142: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten laden	102
Abbildung 143: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten laden: Ultraschalldatensatz (links) und Umgebungsparameter (rechts)	102
Abbildung 144: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten überprüfen.....	103
Abbildung 145: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten aufbereiten	103
Abbildung 146: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Daten analysieren/auswerten.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenblatt Nynas Nytro Taurus	34
Tabelle 2: Deliqueszenzfeuchtigkeit einiger Salze [Sal20]	36
Tabelle 3: Ausgewählte Salzlösungen für die Steuerung des Befeuchtungsprozesses	37
Tabelle 4: Ergebnisse der Referenzmessung	48
Tabelle 5: Ergebnisse Säuremessung nach der Feuchteuntersuchung.....	49
Tabelle 6: Hergestellte Isolierölproben mit bestimmter Gaskonzentration mit der Referenzmessung	57
Tabelle 7: Ergebnisse der Referenzmessungen	62
Tabelle 8: Ergebnisse der Referenzmessung	65

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
KFT	Karl Fischer Titration
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
TK	Temperaturkompensiert
DRH	Deliqueszenzfeuchtigkeit
PTFE	Polytetrafluorethylen
IEC	International Electrotechnical Commission
Pa	Pascal (Einheit)
TRIVAC	Two-storage Rotary Vane Vacuum Pumps
DGA	Dissolved Gas Analyses
GC	Gaschromatograph
WG	Working Group
GUI	Graphical User Interphase
CSV	Comma-separated Values
MAT	Microsoft Access Table
FFT	Fast Fourier Transform
ppm	Part Per Million
PT	Platin
MOSFET	Metal Oxide Semicouductor Field-Effet Transistors
m/s	Meter / Sekunde
GS/s	Giga-Sample / Sekunde
MS/s	Mega-Sample / Sekunde
HM	Heizmatten
USPK	Ultraschallprüfkopf

1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses AiF-Forschungsprojektes wird das Potential der Ultraschalltechnologie für ein Zustandsmonitoring von Isolieröl in Transformatoren analysiert. Es wird erforscht, welche wichtigen Betriebsparameter von Transformatoren und verschiedenen Einflussfaktoren auf deren Isolieröl kontinuierlich überwacht und zur Zustandsbewertung des Betriebsmittels verwendet werden können. Dabei liegt der Fokus primär auf direktgemessene Zusammenhänge zwischen den betrachteten Alterungsprodukten im Öl und dem Ultraschallsignal. Den Schwerpunkt stellt die Ultraschallvermessung von Isolierölproben unterschiedlicher Feuchte- und Temperaturstufen dar. Das Potential der Ultraschalltechnik für das Monitoring weiterer Parameter, welche im Zuge einer Alterung des Isolieröls entstehen können bzw. selbst ein Grund dieser Alterung sein können (Gas, Säure, Feuchtigkeit in Feststoffproben), wurde in einem reduzierten Untersuchungsumfang mitbetrachtet.

Im nachfolgendem sind die einzelnen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst:

Entwicklung und Umsetzung eines Prüf- und Messkonzepts

Um eine qualitative Grundlage für die sensiblen Messungen zu schaffen wurde ein effizientes Prüf- und Messkonzept erfolgreich entwickelt und umgesetzt. Für die Nachbildung realer Betriebsbedingungen mit minimalen Umgebungseinflüssen sowie der Möglichkeit verschiedene Sensoren sowie Steuer- und Regelungshardware anzubringen, wurde ein Prüfgefäß aus Edelstahl konzipiert und hergestellt. Der Einsatz geeigneter Sensoren und die Entwicklung einer Datenerfassungssoftware für die Speicherung der Umgebungs- und Untersuchungsparameter wurde realisiert.

Materialqualifikation

Für eine reibungslose Durchführung der Ultraschallvermessungen waren grundlegende Überlegungen bezüglich unterschiedlicher Beeinflussungsmöglichkeiten während einer Untersuchung notwendig. Die Umsetzung eines steuerbaren Trocknungs- und Befeuchtungskonzepts stellte den Schwerpunkt dieses Arbeitspakets dar und konnte erfolgreich realisiert werden. Dadurch war eine gezielte Befeuchtung von Isolieröl in einem kontinuierlichen Prozess möglich. Eine realitätsnahe Nachbildung des Transformatorbetriebs mit und ohne Zirkulation des Öls, sowie das Anfahren unterschiedlicher Temperaturstufen wurde umgesetzt. Die große Herausforderung lag in der Trocknung von Isolierölproben. Es ist gelungen, unterschiedlich große Mengen von Isolieröl effizient zu trocknen (Ergebnis: 1-3 ppm). Die Herstellung von weiteren Alterungsparametern wie Gas- und Säuregehalt in einer Isolierölprobe sowie die Möglichkeit der Vermessung von feuchten Feststoffproben, ist ebenfalls ein erfolgreich umgesetztes Ziel dieses Arbeitspaketes.

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen mittels Ultraschall

Die Ergebnisse der Ultraschallvermessung von Isolieröl mit unterschiedlichen Feuchte- und Temperaturstufen zeigen zunächst, dass für alle betrachteten Prüffrequenzen eine erhebliche Temperaturabhängigkeit des Öls hinsichtlich der akustischen Eigenschaften vorliegt. Zur Extraktion der relevanten Signalinformation bezüglich Feuchtegrad, wurde die Temperaturabhängigkeit analytisch kompensiert. Es zeigt sich, dass für bestimmte Prüffrequenzen Änderungen im Amplitudenverhalten zu verzeichnen sind. Die Ergebnisse des 10 MHz

Ultraschallprüfkopfes zeigen diese auffälligen Änderungen mit und ohne Temperaturkompensation. Um dieses Verhalten statistisch abzusichern sind weitere Untersuchungen im erweiterten Frequenzbereich ≥ 10 MHz notwendig. Des Weiteren ist zu erkennen, dass dieses Amplitudenverhalten eine Abhängigkeit von der Öl-Zirkulation aufweist. Die Ultraschallvermessung eines kontinuierlichen Abkühlungsprozesses zeigt, trotz eines gewissen Streubereichs, ein Trendverhalten in der Schallgeschwindigkeit, welches eine Abhängigkeit von den einzelnen Feuchtegraden erkennen lässt. So sind grundsätzlich die trockenste und die feuchteste Ölprobe voneinander unterscheidbar. Die Verifikation der Daten mit weiteren Ultraschallprüffrequenzen und ausgedehnten Feuchte- und Temperaturbereichen ist geplant. Untersuchungen an weiteren Proben mit definiertem Gas- und Säuregehalt sowie die Betrachtung von feuchten Feststoffproben im Isolieröl ergab bei der Ultraschallvermessung ebenfalls, abhängig von der gewählten Prüffrequenz, teils sichtbare Trends. Es bleibt festzuhalten, dass weitere Forschungsarbeit in diesem Bereich notwendig ist. Zum einen muss die Verifikation der Ergebnisse anhand weiterer Isolierölytypen durchgeführt werden. Zum anderen müssen Untersuchungen im Frequenzbereich ≥ 10 MHz angestrebt werden, um das Amplitudenverhalten bei der Prüffrequenz von 10 MHz weiter zu erforschen und zu verifizieren. Die Untersuchungen mit Gas- und Säuregehalt sowie der Feststoffproben sollten aufgrund der im Ansatz positiven Erkenntnisse, in einem größeren statistischen Rahmen verifiziert werden.

Verträglichkeit von Ultraschall im EM-Feld

Der Einsatz der Ultraschallvermessung im realen Betrieb eines Hochspannungstransformator erfordert die Analyse potentieller Einsatzorte sowie die Betrachtung möglicher Beeinflussung des Ultraschallsignals und der Ultraschallsensorik durch das EM-Feld. Durch intensive Literaturrecherche lassen sich Aussagen über einen potentiellen Einsatzort sowie die Gefahr einer möglichen Beeinflussung des Ultraschallsignals durch EM-Felder treffen. Die Platzierung außerhalb des Transformator-kessels in einem Rohrsystem (Flansch), ähnlich der Vorgehensweise bei der Platzierung des relativen Feuchtesensors, ist der favorisierte Ansatz. Dadurch wird der Einfluss der EM-Felder auf die Ultraschallsensorik entkräftet (vorausgesetzt ist ein fehlerfreier Betrieb des Transformators). Die Beeinflussung der EM-Felder auf das Ultraschallsignal ist als sehr gering einzustufen.

Software zur Aufbereitung, Analyse und Auswertung der Daten

Für die Datenanalyse wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt, welche die Rohdaten der Umgebungsparameter und der Ultraschallvermessung verarbeitet und miteinander verknüpft. Die Daten können mit Hilfe dieser Software aufbereitet, analysiert und einer Auswertung unterzogen werden. Die Analyse erlaubt eine Aussage über den Einfluss von Alterungsprodukten in einer Isolierölprobe auf das Ultraschallsignal.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

2 Forschungseinrichtung und Projektpartner

Folgende Partner haben am Projekt mitgearbeitet:

- Baur GmbH
- Fritz Driescher KG - Spezialfabrik für Elektrizitätsbedarf GmbH & Co.
- MVV Netze GmbH
- Siemens AG
- Messko GmbH
- IBV Ingenieurbüro Vogler

Forschungseinrichtung:

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH e.V.)

3 Forschungsinhalt

3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1.1 Ausgangssituation

Die Netzbetreiber und Hersteller von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung stehen vor der Aufgabe eine wirtschaftlich-technisch angemessene Versorgungsqualität der Endkunden durch einen optimierten Einsatz netztechnischer Anlagen und entsprechende Strategien für deren Erneuerung und Instandhaltung sicherzustellen. Im Energieversorgungsnetz sind Transformatoren eines der wichtigsten Betriebsmittel, welche zunehmend durch veränderte Lastflüsse höheren Beanspruchungen ausgesetzt sind [Sch04]. Die Entwicklung moderner Prüfverfahren für intelligente Zustandsbewertung von Transformatoren und Isolierölen ist deswegen von besonderem Interesse und Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten [Ew17]. Isolieröl und die Kombination mit Zellulose (Papier/Pressspan) ist das wesentliche Isoliermedium im Transformator. Die Lebensdauer von Transformatoren ist mit der Alterung von Isolieröl und der Zellulose (Zellulose im Papier und in den Pressspan-Teilen) verbunden [Rös11], [Hof04]. Rückschlüsse auf den Zustand der Zellulose werden durch Messungen am Isolieröl anhand von Gleichgewichtsdiagrammen gezogen [Du99], [Koc09], [Ten11]. Eine direkte Messung des Zellulosezustands ist im Betrieb des Transformators nicht möglich. Das Isolierpapier altert dabei schneller als die Pressspan-Teile, wobei das nasse sauerstoffhaltige Papier 40-mal schneller altert als das trockene sauerstofffreie Papier [Lel12-1], [Lel12-2]. Der Abbau der Zellulose erfolgt am häufigsten durch Oxidation und Hydrolyse [Kue10]. Dabei ist die Hydrolyse der dominierende Alterungsprozess, welche bei Betriebstemperatur stattfindet. Bei der Alterung von Zellulose durch Hydrolyse ist das Wasser die Ursache der Papierersetzung [Rös11], [Koc06-1], [Koc06-2]. Im Gegensatz zu der Oxidation, bei welcher durch die Alterung der Zellulose Wasser entsteht. Der letztere Effekt beschleunigt die thermische Alterung, welche progressiv mit dem Wassergehalt des Papiers fortschreitet. Zusätzlich sind Einwirkzeit der Temperatur, Zellulosequalität, konstante oder zyklische belastungsabhängige Alterung sowie Beanspruchung durch elektrische Felder und Kurzschlussdauer weitere Einflussgrößen auf die Öl-Papier-Isolierung [Kue10]. Die Alterungsprozesse haben unterschiedlich starken Einfluss auf das Isolieröl und führen zu chemischen Reaktionen zwischen dem Isolieröl und der Zellulose. Das Ergebnis ist eine Veränderung/Verschlechterung der chemischen und elektrischen Eigenschaften des Isolieröls. Allerdings wird die Kontaminierung mit Wasser als ein grundlegendes Problem gealterter Transformatoren angesehen, verbunden mit der Verringerung der Betriebssicherheit, der Lebensdauer und langfristiger Zuverlässigkeit [Alt07-1]. Die Verringerung der dielektrischen Festigkeit im Isolieröl, gekennzeichnet durch die Durchschlagsfeldstärke und TE-Einsetzspannung, Bläschenbildung sowie die bereits erwähnte Alterung der Zellulose (Spaltung der Zelluloseketten der Feststoffisolierung), sind die Ergebnisse von Wasser im Isolieröl [Koc06-1], weshalb die kontinuierliche Überwachung des Isolierölzustands von wesentlicher Bedeutung ist [Koc06-1]. In *Abbildung 1* ist die Modellierung des Alterungsverhaltens von HS/MS-Transformatoren (HS- Hochspannung und MS- Mittelspannung) dargestellt, welche sich aus der Anzahl der Schäden und dem Mengengerüst als relative Schadenshäufigkeit konstruieren lässt. Die Erfassung von alterungsrelevanten Parametern für die rechtzeitige Einleitung vorbeugender Maßnahmen zur Aufrechterhaltung geforderte Versorgungszuverlässigkeit, ist von besonderer Bedeutung.

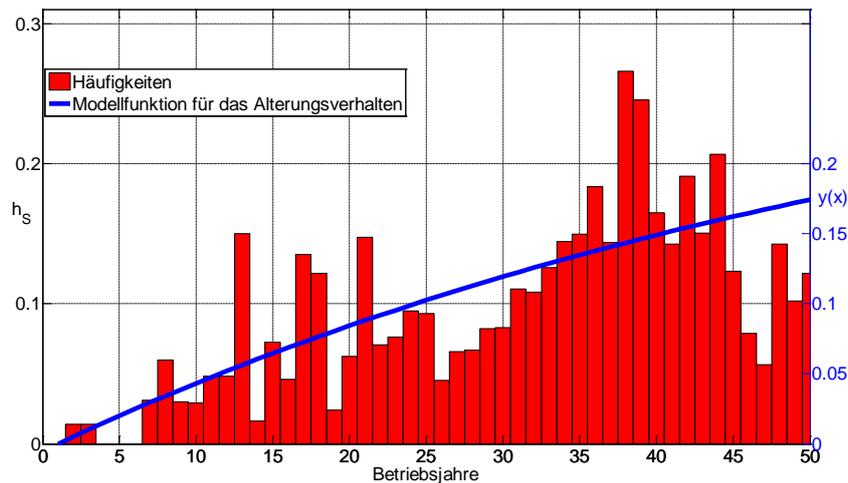


Abbildung 1: Modellierung der altersabhängigen Schadenshäufigkeiten h_s (Schadenshäufigkeit pro Jahr – (Schäden / Mengengerüst) im Jahr x); insgesamt 581 Schäden und 5347 HS/MS-Transformatoren [FGH06], [FGH13]

Die Folgen einer mangelhaften Instandhaltung können verheerend sein, wie der Vorfall im AKW Krümmel im Jahr 2007 zeigt. Durch ein Isolationsversagen infolge eines Lichtbogens musste das gesamte AKW abgeschaltet werden. Der Schaden belief sich auf mehrere Millionen Euro (Anschaffungskosten Transformator und Ausfallkosten Kraftwerk) [Gla09], [Ste07], [Rpo07]. Neben der Analyse des Feuchtegehalts sind der Sauerstoffgehalt und die Säurezahl wichtige Indikatoren bei der Betrachtung des Alterungsprozesses von Isolieröl. Zustandsuntersuchungen mittels Ultraschall können eine ganzheitliche Lösung für die Bewertung des Isolieröls eines Transformators darstellen. Neben dem Vorteil einer Online-Messung im Betrieb des Transformators liegt das wesentliche Potential in der Möglichkeit eine Aussage zu bekannten Einflussparametern (Säure, Gas und vor allem Feuchte in Abhängigkeit der Temperatur), welche den Zustand des Isolieröls bzw. der Öl-Papier-Isolierung beeinflussen, aus einer einzigen Messung zu erhalten. Das ist nach aktuellem Stand der Technik mit keinem anderen Verfahren möglich.

3.1.2 Stand der Forschung

Mineralöl gilt als das wichtigste Isoliermedium für den Transformator und dient zusätzlich als Kühlmedium in Transformatoren. Die Herstellung des Mineralöls erfolgt durch Destillation und Raffination aus Erdöl. Abhängig von Anlage und Anwendungsbereich werden unterschiedliche Zusammensetzungen verwendet, welche die Verbesserung der Eigenschaften hinsichtlich der Alterung des Isolieröls während des Betriebs im Fokus haben [Küc09]. Die Hauptkomponenten von Isolieröl sind Kohlenwasserstoffe mit naphthenischer und paraffinischer Struktur [Hem04], [Gis08]: Alkane (Paraffine) 40 - 50 %, Cycloalkane (Naphtene) 30 - 60 %, Aromate 5 - 20 % und Alkene (Olefine) 1 %. Das Isolieröl ist während des Betriebs eines Transformators einer enormen Belastung (Lastzyklen) ausgesetzt. Das Resultat ist eine beschleunigte Alterung des Isolieröls. Die Hauptalterungsprodukte von Isolieröl sind Säuren, Ölschlamm und Wasser. Niedermolekulare Säuren greifen die feste Isolierung an und binden Wasser im Isolieröl [Gla09]. Die Folge ist, dass beim Erreichen eines Grenzwertes das Isolieröl ausgetauscht werden muss. Ölschlamm ist das Endprodukt in einem Zersetzungsprozess der polaren Alterungsprodukte Ketone, Aldehyde und Säure (Oxidation der Ölmoleküle). Durch die Anwesenheit von Ölschlamm in den freien Ölspalten können Fließkanäle verstopft und die Durchschlagsfestigkeit des Öls vermindert werden. Zusätzlich kann durch die Absetzung von Ölschlamm auf den Wicklungen die Wärmeabfuhr verschlechtert werden, wodurch die thermische Alterung beschleunigt wird. Vollständigkeitshalber sei hier die Gasproblematik im

Isolieröl erwähnt. Durch Oxidationsreaktionen bilden sich gelöste Gase im Isolieröl (aufgrund von elektrischen Entladungen, starker Erwärmung, ...), welche detektiert werden können [Hah o. J.]. Als erstes und grundlegendes Problem gealterter Transformatoren wird jedoch das Wasser angesehen [Alt07-1]. Die Grenzwerte sind in der Norm festgehalten [DIN13]. In der früheren Version IEEE Std 62 -1995 wurde der Wassergehalt in der Festisolierung (Kraftpapier und Transformerboard) wie folgt definiert [Spa07]: trockene Isolierung 0-2 %, feuchte Isolierung 2-4 % und sehr feuchte Isolierung >4 %. In der neueren Version IEEE Std C57.106-2002 wird der zulässige Feuchtegehalt in der Festisolierung durch die Messung des Wassergehaltes im Öl abgeleitet [Spa07]. Dabei wird die thermische Stabilität sowie der Gleichgewichtszustand zwischen Papier- und Öl-Isolierung vermutet/vorausgesetzt [Spa07]. Als größte Quelle (von Wasser) wird in der Literatur die umgebende Atmosphäre genannt [Gla09]. Eine Unterscheidung wird wie folgt vorgenommen [Cig08]: die direkte Wasseraufnahme aus der Umgebung, die Wasseraufnahme durch diffusiven Fluss sowie die Auswirkung von Unterdruck und den viskosen Fluss von Wasser. Das Wasser liegt meistens als gelöstes oder gebundenes Wasser im Isolieröl vor [Alt07-1]. Beim Überschreiten der Wassersättigung kann das Wasser darüber hinaus auch als freies Wasser im Isolieröl vorliegen. Hierbei ist die Kenntnis der Wasserlöslichkeit von Öl (für jedes Öl spezifisch) von Bedeutung. Diese wird in der Literatur durch die Arrhenius Konstanten beschrieben [Lew02], [Du01], [Ara07]. Die Wasserlöslichkeit von Öl ist abhängig von der Temperatur und wird zusätzlich durch die Absorptions- und Desorptionsprozesse (Öl-Papier) beeinflusst. Steigende Temperaturen setzen Wasser/Feuchte aus der Papieroberfläche frei, umgekehrt wird bei sinkenden Temperaturen Wasser/Feuchte ins Papier absorbiert [Gas07], [Vai17]. Diese Prozesse laufen unterschiedlich schnell ab, sodass die Diffusion des Wassers zurück ins Papier wesentlich langsamer abläuft [Vai17], [Bue05], [Sar17]. Gelöstes Wasser im Isolieröl ist dabei der primäre Faktor, wobei das gebundene Wasser, z.B. an organischen Säuren, nur begrenzt für den Austausch zur Verfügung steht. Ein wesentlicher Nachteil von Wasser im Isolieröl ist der Einfluss auf das Durchschlagsverhalten. Bereits ab geringen Mengen von Wasser wird die Durchschlagsspannung signifikant gesenkt (siehe *Abbildung 2*). Bei einer entsprechenden Menge von Wasser in der festen Isolierung können bei größeren Temperaturerhöhungen Dampfblasen entstehen, welche das Auslösen eines Durchschlags im Isolieröl begünstigen [Gla09].

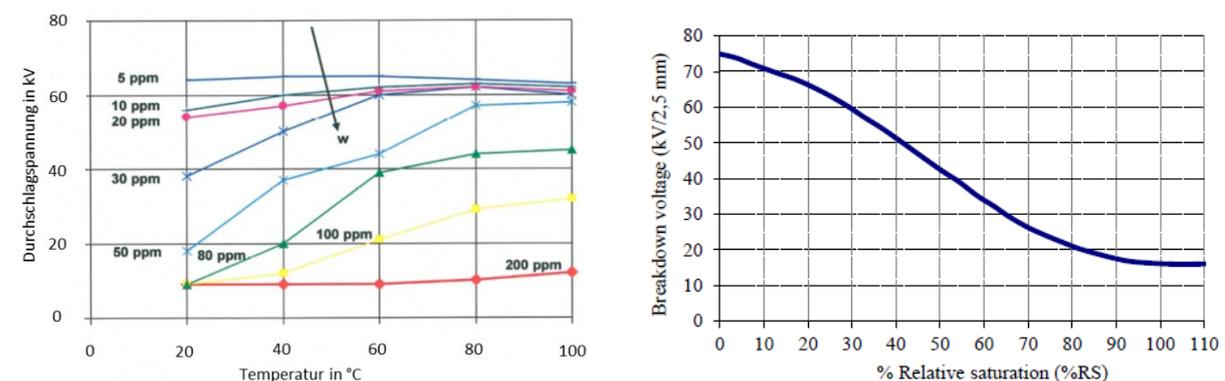


Abbildung 2: Links: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit des w = Wassergehalts, Rechts: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der relativen Wassersättigung [Gla09], [Cig18]

Für eine hohe Leistungs- und lange Einsatzfähigkeit des Transformators muss der Zustand der Isolation kontinuierlich überwacht werden.

3.2 Forschungsziele

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Anwendbarkeit von Ultraschalltechnik im Bereich der Isolieröle in Hochspannungstransformatoren. Die Betrachtung der Messbarkeit von Alterungsprodukten, welche im Laufe eines Transformatorbetriebs durch innere/äußere Einflüsse bzw. Fehler entstehen können, steht im Fokus der Ultraschallvermessungen. Der Schwerpunkt liegt auf der Analyse der Messbarkeit von Feuchte im Isolieröl, wobei für die Messungen Isolierölproben mit definierten Feuchtegehalten hergestellt werden. Zusätzliche Umgebungseinflüsse wie Temperatur und Druck werden bei der Messdurchführung mitberücksichtigt. Die Betrachtung weiterer Alterungsparameter wie Gas, Säure und Feststoff ist ebenfalls ein Teil dieser Arbeit (reduzierter Untersuchungsumfang).

3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Um die angestrebten technisch-wissenschaftlichen Forschungsziele zu erreichen, sind insgesamt 5 Arbeitspakete vorgesehen. Hierbei werden AP1 und AP2 der ersten Phase des Projektes und AP3, AP4 und AP5 der zweiten Phase des Projektes zugeordnet.

Die **Phase 1** dient der Entwicklung und Umsetzung eines Prüf- und Messkonzepts sowie die Entwicklung von Verfahren für die Herstellung von Isolierölproben:

AP1: Entwicklung und Umsetzung eines Prüf- und Messkonzepts. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung eines geeigneten Prüfgefäßes, welches verschiedene Anforderungen eines kontrollierbaren und beeinflussungsfreien Untersuchungsumfeldes vereint. Zusätzlich erfolgt die Auswahl passender Hardwarelösungen und die Entwicklung einer Datenerfassungssoftware der Umgebungsparameter.

AP2: Entwicklung eines Befeuchtungs- und Trocknungsverfahrens für die Herstellung von Isolierölproben mit definierten Feuchtegraden. Zusätzlich werden weitere Abhängigkeiten in einem reduziertem Umfang mitbetrachtet für welche ebenfalls ein Herstellungsprozess der Proben realisiert werden soll. Die daran anschließende **Phase 2** dient der Durchführung von Untersuchungen mit dem realisiertem Befeuchtungs- und Trocknungsverfahren sowie dessen Auswertung und Analyse. Dabei ist ein Tool für die Aufbereitung, Auswertung und Analyse entwickelt worden. Zusätzlich erfolgt in dieser Phase die Recherche möglicher Einsatzbereiche der Ultraschallprüfköpfe im Transformatorsystem.

AP3: Durchführung praktischer Untersuchungen mittels Ultraschall. Hier werden Zusammenhänge zwischen akustischen Eigenschaften und dem Feuchtegehalt im Isolieröl (in Abhängigkeit von der Temperatur und Druck) untersucht und die Ergebnisse dargestellt. Den Schwerpunkt bildet die Untersuchung der Feuchte im Isolieröl, wobei der Einfluss von Gas, Säure und feuchten Feststoff auf das Ultraschallsignal in reduziertem Umfang parallel betrachtet wird.

AP4: Die Recherche möglicher Einsatzbereiche des Ultraschallprüfkopfes im Transformatorsystem. In Abhängigkeit vom Einsatzort ergibt sich die Betrachtung elektromagnetischer Feldeinwirkung auf die Ultraschallprüfköpfe.

AP5: Entwicklung eines Analysetools. Dabei stehen die Aufbereitung, Visualisierung, Auswertung und Analyse von Daten im Vordergrund.

4 AP 1: Entwicklung und Umsetzung eines Prüf-/Messkonzepts

Ziel ist, die für die Ultraschalluntersuchungen notwendigen Rahmenparameter wie einen druckdichten Behälter mit Anschlussmöglichkeiten für kapazitive Messsensoren, Drucksensoren, Ultraschallprüfköpfe, Ventile, Ein- und Auslässe sowie das dazugehörige Messkonzept zu entwickeln und zu realisieren. Die Durchführung der Arbeiten für die Entwicklung eines geeigneten Prüfgefäßes erfordert grundlegende Überlegungen über mögliche Einflüsse und Auswirkungen während der Messung. Das beinhaltet u.a. die Betrachtung der thermischen Einwirkung auf verwendete Materialien (wie z.B. Ultraschallprüfkopf und Reflektor innerhalb des Prüfgefäßes). Konstitutive Betrachtungen im Bereich der thermischen Kapazität des Prüfgefäßes, Ölverträglichkeit der verwendeten Materialien, der Druckverteilung innerhalb des Prüfgefäßes sowie der verwendeten Sensoren werden durchgeführt. Es werden Werkstoffe verwendet, welche keine Verunreinigungen oder Beeinflussungen der Isolierölprobe durch die Temperatur- und Feuchteregelung zur Folge haben. In dieser Arbeit beschränken wir uns auf einen für Transformatoren relevanten Arbeitsbereich von 20-60°C. In einem weiteren Schritt wird die Nachbildung einer Zirkulation des Isolieröls realisiert. Dabei wird die realitätsnahe Abbildung des zirkulierenden Isolieröls im Transformator unter definierten Bedingungen untersucht. Im Nachfolgenden wird auf die Umsetzung näher eingegangen. Nachstehend wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Umsetzung eines Prüf-/Messkonzepts in folgende Punkte unterteilt:

- Entwicklung eines Prüfgefäßes
 - Messkonzept unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung
 - Hermetische Abdichtung
 - Temperatursteuerung durch Heizmatten
 - Prüfgefäßherstellung
- Realisierung eines Messkonzepts
 - Messsensoren und Messgeräte
- Ultraschallprüfköpfe und Datenerfassung der Ultraschallsignale
 - Ultraschallprüfköpfe und Reflektor
 - Messmethode
 - Datenerfassung der Ultraschallsignale
- Umsetzung der Ultraschallvermessung

4.1 Entwicklung eines Prüfgefäßes

Für die Durchführung der Untersuchungen wird ein spezielles Prüfgefäß benötigt, in welches die Isolierölproben gefüllt werden. Das Prüfgefäß muss spezielle Anforderungen erfüllen. Die angefertigten CAD-Zeichnungen der Prüfgefäße sind in der *Abbildung 3* dargestellt. An den Seiten sind große Öffnungen angebracht an welchen Ultraschallprüfköpfe unterschiedlicher Größenordnungen angebracht werden können. Für die Untersuchung der Isolierölproben werden Ultraschallprüfköpfe verwendet. Für die Befestigung der Prüfköpfe werden Kabelverschraubungen (M25 x 1,5 Gewinde) mit resistenten Dichtungen (Temperaturbeständigkeit, Ölbeständigkeit, ... usw.) genutzt.

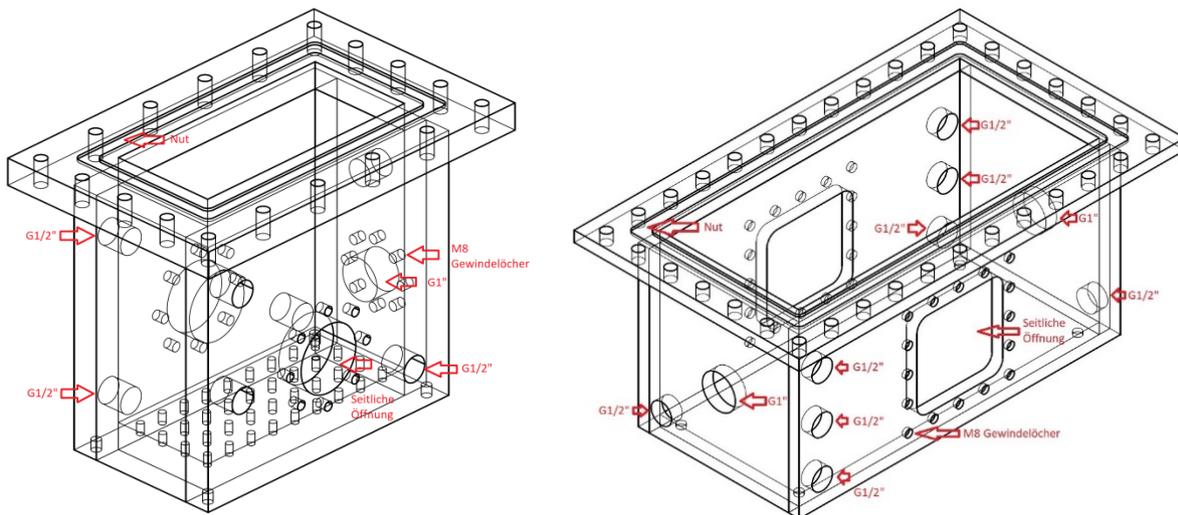


Abbildung 3: CAD Zeichnung Prüfgefäß 1 (links) und Prüfgefäß 2 (rechts)

Da der Einfluss von Temperatur ebenfalls untersucht wird, werden Anschlüsse für PT100 Temperatursensoren benötigt. Die PT100 Sensoren haben ein Edelstahlgehäuse, welches mit G1/2" Klemmverschraubungen montiert wird.

Die Prüfgefäße bestehen aus Edelstahl mit 1.4571 Werkstoffgüte, welches eine gute chemische Resistenz bietet. Das Volumen im Behälter wird auf eine geeignete Größe festgelegt, damit nicht zu viel Isolieröl benötigt wird bzw. die Ultraschallprüfköpfe eine geringe Eingangsstörgröße aufweisen. Die beiden Behälter wurden von der Firma WAGNER GMBH ansässig in Mannheim hergestellt. *Abbildung 4* und *Abbildung 5* zeigen das Prüfgefäß kurz nach der Fertigstellung. In nachfolgendem Kapitel wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren eingegangen.

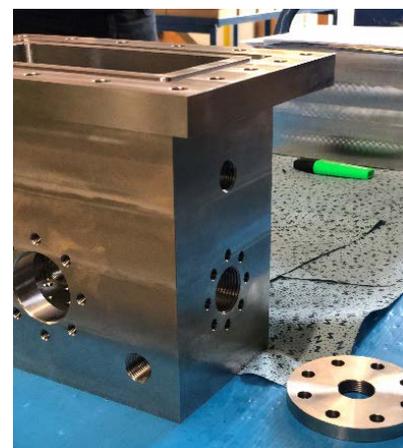
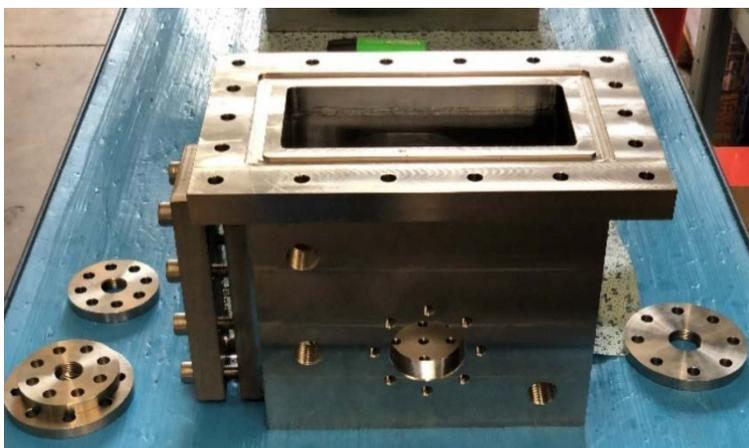


Abbildung 4: Prüfgefäß 1a

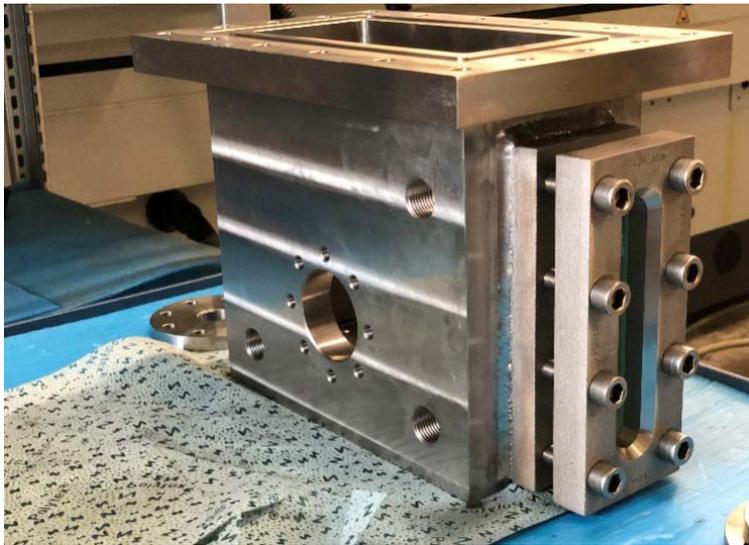


Abbildung 5: Prüfgefäß 1b

Von besonderer Bedeutung sind die Dichtigkeit, das Material sowie definierte Öffnungen (Gewindebohrungen für bereits vorhandenen Sensoren/Ventile, Pt 100 Sensoren, Steuerungsventile, Überdruckventile, Ein- und Auslassventil usw.). Die speziell gefertigten PTFE Dichtungen sind in *Abbildung 6* dargestellt. Die G1/2" und G1" Gewindelöcher werden für die Montage der PT100, Öl in Feuchte Sensoren mittels Klemmverschraubungen, der Ventile, Ein- und Auslässe verwendet.



Abbildung 6: Dichtringe für den Deckel und Verschraubungen

Für die Nachbildung der Betriebstemperatur in einem begrenzten Bereich wurden für die Prüfgefäße passende Heizmatten mit integrierten Temperatursensoren hergestellt (*Abbildung 7*). Diese wurden an den Seiten und der Bodenplatte der beiden Prüfgefäße angebracht. Der Deckel und das Schauglas wurden hier nicht berücksichtigt. In *Abbildung 8* ist die Befestigung am Beispiel von Prüfgefäß 1 dargestellt.



Abbildung 7: Heizmatten mit integrierten Temperatursensoren für die Temperaturregelung

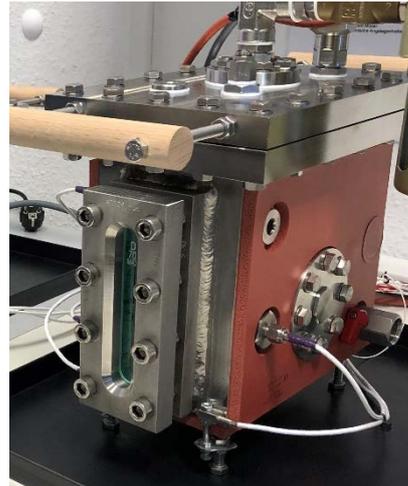
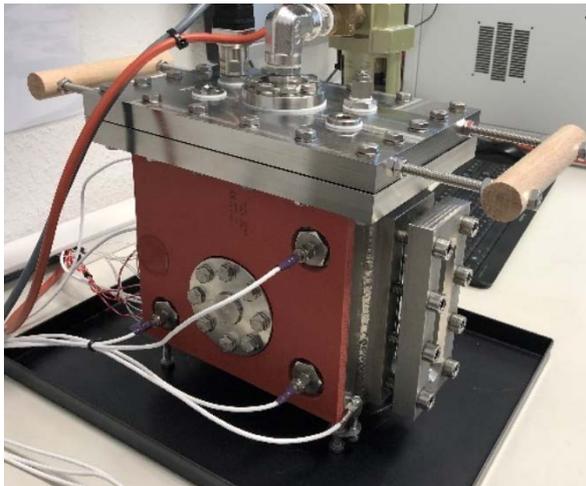


Abbildung 8: Befestigte Heizmatten mit integrierten Temperatursensoren für die Temperaturregelung am Beispiel von Prüfgefäß 1

4.2 Realisierung eines Messkonzepts

An den Prüfgefäßen wurden auf unterschiedlichen Ebenen und Tiefen verschiedene Sensoren eingebaut.

- Temperatursensor (1)
- Feuchtesensor (2)
- Drucksensor – Digital / Manometer (3)
- 3 x Ultraschallprüfköpfe auf gleicher Ebene (4)
- Ein- und Auslassventile (5)
- Probeentnahmestellen (6)
 - Zusätzlich außerhalb des Prüfgefäßes im Zirkulationskreislauf (Kapitel 5)

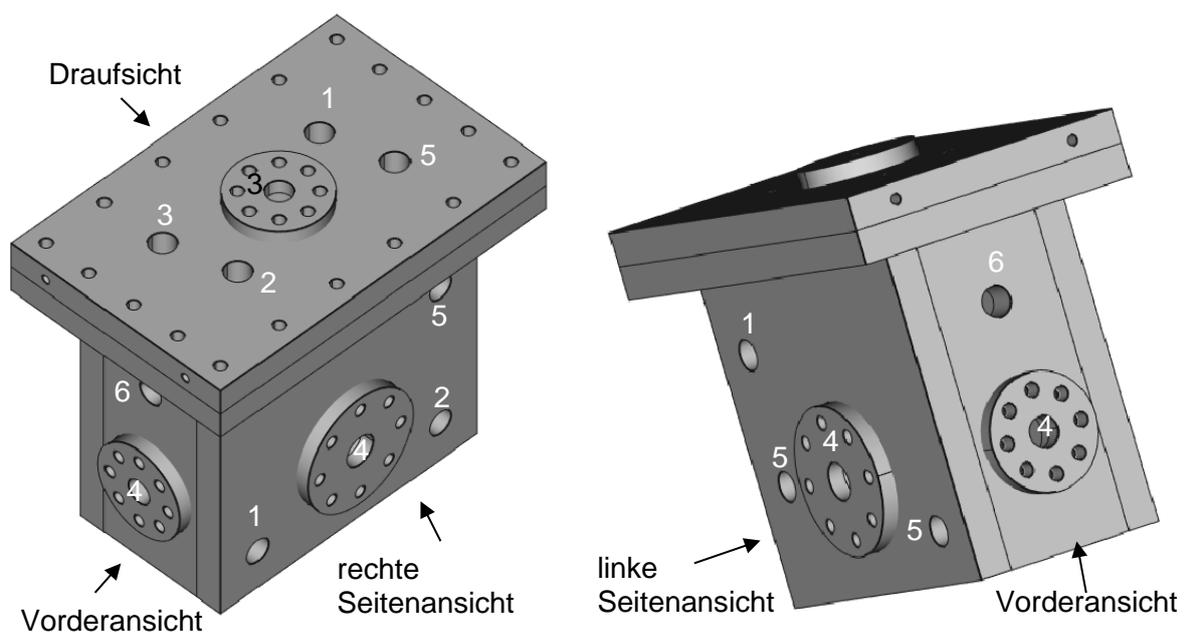


Abbildung 9: 3D Darstellung vom Prüfgefäß mit unterschiedlichen Anschlusspunkten

An den Prüfgefäßen wurden auf unterschiedlichen Ebenen verschiedene Ein- und Auslassventile eingebaut. Diese erfüllen verschiedene Aufgaben (Vakuumananschluss, Zirkulationsanschlüsse, Entnahmestellen für Isolierölproben usw.). Die Temperatur wird in drei verschiedenen Höhen gemessen. Zusätzlich gibt es außerhalb des Prüfgefäßes weitere Stellen (Zufuhr und Entnahme) für die Isolierölproben. In *Abbildung 71* ist der Gesamtaufbau dargestellt. Ein Feuchte- und Temperatursensor befindet sich auf gleicher Höhe mit den Ultraschallprüfköpfen.

Messsensoren und Messgeräte

Temperatur

Die Temperatur wird mit PT100 Klasse A Sensoren erfasst. Diese PT100 Sensoren haben drei Leiter, ein Edelstahlgehäuse mit der Materialgüte 1.4571 und eine PTFE Anschlussleitung. Sie sind somit für die Untersuchungen geeignet.

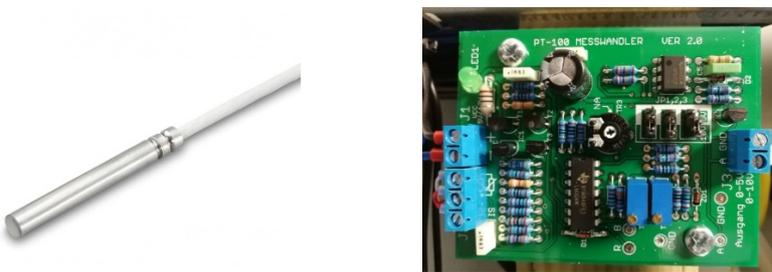


Abbildung 10: Temperatursensor PT100 Klasse A (links) und Messwandler (rechts)

Zur umfassenden Erfassung der Temperaturen im und am Prüfaufbau werden PT100 Sensoren verwendet. Über den PT100 Messwandler V2.0 (*Abbildung 10*) werden die Sensordaten an die zentrale Datenerfassungseinheit übertragen, welche auf Basis eines Raspberry's realisiert wurde. Der Wertebereich der Sensordaten erstreckt sich von 0 bis 10 V. Im Rahmen eines Grob- und Feinabgleiches jeder Sensor- Messwandlerkombination wird eine Kalibrierung durchgeführt.

Druck

Mit dem Drucktransmitter ifm electronic PU5415 wird der Relativdruck mit $\pm 0,5$ % Genauigkeit gemessen.



Abbildung 11: Drucktransmitter [Aut22]

Feuchte

Aufgrund der Schwerpunktbetrachtung der Feuchte im Isolieröl in dieser Arbeit wird näher auf zwei zentrale Verfahren eingegangen:

- Absolute Feuchtemessung mit Karl-Fischer-Titration
- Relative Feuchtemessung mit kapazitiven Sensoren

Im Anschluss werden die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren bzw. Messgeräte vorgestellt.

Direkte Feuchtemessung mit Karl-Fischer Titration

Die Titration ist ein chemisches Verfahren, bei dem einer unbekanntem Substanz (Probenlösung) ein Reagenz (Maßlösung) mit bekannter Konzentration so lange zugefügt wird bis die Konzentration ausgeglichen ist [Koc06]. Bei der Karl-Fischer-Titration haben sich drei Grundformen durchgesetzt [Hon22]:

- die volumetrische Titration mit Einkomponenten-Reagenz
- die volumetrische Titration mit Zweikomponenten-Reagenz
- die coulometrische Bestimmung (mit und ohne Diaphragma)

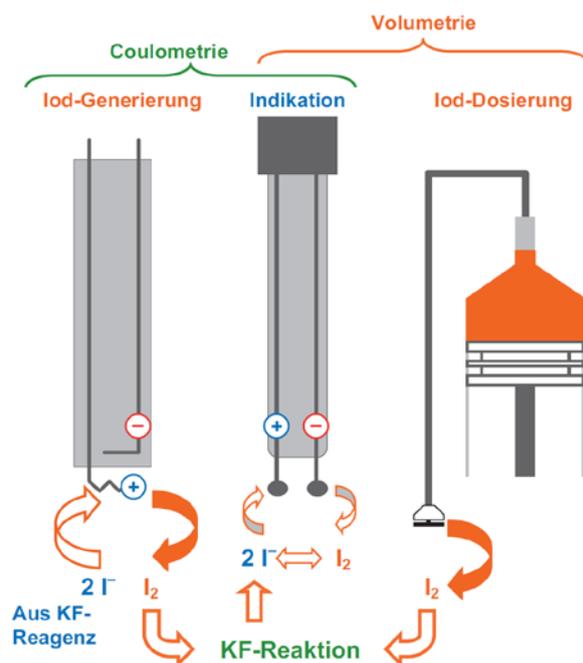


Abbildung 12: Iod Dosierung bei coulometrischer und volumetrischer Karl-Fischer-Titration [Pet22]

Abbildung 12 zeigt die beiden Dosierverfahren der Coulometrie und Volumetrie. Die benötigte Iodmenge wird bei der volumetrischen Titration mit dem Titriermittel beigegeben.

Bei der coulometrischen Titration erzeugt eine Generatorelektrode das Iod elektrolytisch. Es wird eine Spannung an der Indikatorelektrode angelegt, die dafür sorgt, dass das Iodid an der positiven Anode sein Elektron abgibt und zu Iod wird. An der Kathode wird das Elektron abgegeben und es entsteht wieder Iodid. Das Ende der Reaktion wird über den Strom, der zwischen Anode und Kathode fließt, erkannt [Git07].

Die Vorgehensweisen der vier wesentlichen Varianten werden vorgestellt:

1. Volumetrische Titration mit Ein-Komponenten-Reagenz [Hon22]

Bei der volumetrischen Titration mit Ein-Komponenten-Reagenz enthält die Lösung alle reaktiven Komponenten. Das Reagenz wird rasch in die Titrierzelle gefüllt und mit ein wenig trockenem Methanol aufgefüllt. Die Titrierzelle und das Reagenz werden für die Messung konditioniert, wobei das vorhandene Wasser beseitigt wird, um die fehlerhafte Messabweichung vom tatsächlichen Wassergehalt der Probe zu reduzieren. Die Probe wird unter möglichst geringem Einfluss von Umgebungsluftfeuchte eingewogen und in die Titrierzelle injiziert. Die Titriergeschwindigkeit wird auf die zu erwartende Wassermenge angepasst. Dabei wird zu Beginn rasch titriert und bei Annähern des Endpunktes die Titriergeschwindigkeit reduziert. Sobald ein stabiler Endpunkt der Titration erreicht wird, wird ein Wassergehalt der Probe errechnet. Das Reagenz kann für Folgetitrationen mit gleichartiger Probe verwendet werden.

2. Volumetrische Titration mit Zwei-Komponenten-Reagenz [Hon22]

Bei der volumetrischen Titration mit Zwei-Komponenten-Reagenz wird eine geeignete Probenlösung und Titrier-Reagenz verwendet. Ein stabiler Endpunkt und hohe Genauigkeit der Wasserbestimmung bei hoher Titriergeschwindigkeit wird so gewährt. Das Arbeitsmedium wird in die Titrierzelle gefüllt und mit dem Titriermedium aufgefüllt. Der restliche Vorgang ist ähnlich dem des Ein-Komponenten-Reagenzes, welches sich geringfügig durch die Titrationsgeschwindigkeiten und der Begrenzung der Probeneinwaage durch die maximale Wasseraufnahmekapazität des Arbeitsmediums unterscheidet. Es empfiehlt sich, das austitrierte Arbeitsmedium abzusaugen; es kann jedoch bei nicht Überschreiten der Wasserkapazität für Folgetitrationen weiterverwendet werden.

3. Coulometrische Titration mit Diaphragma [Hon22]

Die coulometrische Titration mit Diaphragma verwendet eine Titrierzelle die in zwei Kammern unterteilt ist: dem Anoden- und dem Kathodenraum. Die Generatorzelle (Kathodenraum) wird mit einem Katholyt gefüllt, welches den Strom zur Kathode transportiert. Die Titrierzelle (Anodenraum) wird mit einem Anolyt (Probenlösung) gefüllt. Das Anolyt enthält Iodid, welches an der Anode der Generatorzelle zu Iod oxidiert. Gleichzeitig entsteht an der Kathode Wasserstoff, welches unter Blasenbildung aufsteigt. Es entsteht ein Ungleichgewicht. Das Wasser reagiert während der Titration mit dem entstandenen Iod.

4. Coulometrische Titration ohne Diaphragma [Hon22]

Die coulometrische Titration ohne Diaphragma verwendet eine Titrierzelle ohne Kathodenraum, in der sowohl Anoden- als auch Kathodenreaktionen stattfinden. Eine besondere Zellkonstruktion ist dafür notwendig, sodass bei der Kathodenreaktion des Anolyt nur Wasserstoff gebildet wird. Es findet keine Reaktion statt die das Iod zu Iodid oxidieren lässt [Hon22].

Die volumetrische Titration wird vorzugsweise für die Bestimmung von Wassermengen mit 1 bis 100 mg verwendet. Die coulometrische Titration eignet sich für die Spurenanalyse bei Wassermengen von 10 µg bis 10 mg [Hon20]. Die Karl-Fischer-Titration errechnet die tatsächlich im Öl gelöste Wassermenge, die absolute Feuchte (angegeben in ppm).

In dieser Arbeit wird ein Gerät bzw. das Verfahren nach coulometrischer Titration mit Diaphragma benutzt.

Indirekte Feuchtemessung mit kapazitiven Sensoren

Der kapazitive Feuchtesensor besitzt zwei Elektroden mit einem hygroskopischen Dielektrikum dazwischen (*Abbildung 13*). Die Wassermoleküle der umgebenden Flüssigkeit diffundieren durch das Dielektrikum. In Abhängigkeit der relativen Feuchtigkeit erhöht sich die Kapazität des Sensors aufgrund der großen Permittivität von Wasser $\epsilon_W = 80$. An einem RC-Oszillator wird die Änderung in eine variable Frequenz umgeformt und kann gemessen werden. Andere im Öl befindlichen Bestandteile wie Alterungsprodukte können ebenfalls durch das Polymer diffundieren und die Kapazität verändern. Aufgrund der geringen Permittivität der Alterungsprodukte ist der Einfluss deutlich geringer, wodurch nur ein geringer Messfehler entsteht. Als Ergebnis wird ein relativer Feuchte-Wert ausgegeben, welcher durch zwei ölspezifische Konstanten in einen absoluten Feuchte-Wert relativ zum Gewicht umgerechnet werden kann. Die Konstanten sind je nach Zusammensetzung des Isolieröls unterschiedlich und hängen vom Grad der Verunreinigung, Alterungszustand und somit von der Fähigkeit ab, Wasser zu binden [Koc06-1].

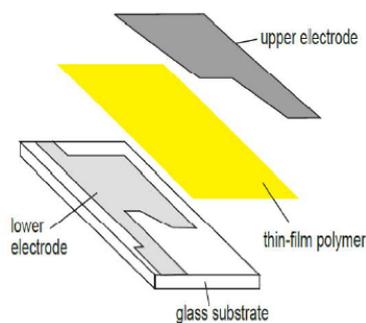


Abbildung 13: Aufbau eines kapazitiven Sensors [Ata20]

Im Prüfgefäß wird die relative Feuchte im Öl mit Sensoren der Firma E+E Elektronik gemessen. Für die Untersuchung kommen die Messumformer EE360 und EE381 zum Einsatz (*Abbildung 14*). Diese Messumformer messen die Wasseraktivität a_w und die Temperatur ϑ . Mit diesen Werten und entsprechender Formel kann der Wassergehalt berechnet werden, welcher ebenfalls von den Sensoren angezeigt wird.

In dieser Arbeit wird die Feuchte in den Isolierölproben auf zwei verschiedenen Wegen erfasst. Zum einen erfolgt die Messung der relativen Feuchte im Prüfgefäß selbst und zum anderen mittels Karl-Fischer-Titration (KFT) außerhalb des Prüfgefäßes mittels entnommener Proben. Die genauere Vorgehensweise wird im Kapitel 5 beschrieben.

Zusätzliche Informationen sind den Datenblättern zu entnehmen [EPU-1 22], [EPU-2 22].



Abbildung 14: EE360 mit multifunktionalem Display (links) und EE381 (rechts)

Für die Referenzmessung soll die Untersuchung des Wassergehalts im Labor nach der Karl-Fischer-Methode erfolgen, welche eine hohe Genauigkeit aufweist. Um eine qualitative Vergleichbarkeit hergestellter Feuchtegrade von Isolierölproben zu ermöglichen, werden diese nach der Herstellung mit einem Karl-Fischer-Titrator überprüft. Danach können die mittels Ultraschall durchgeführten Messungen, bei welchen vorab der Feuchtegrad mit dem Karl-Fischer-Titrator als Referenz überprüft wurde, eindeutig zugeordnet und verglichen werden. Bei der Karl-Fischer-Methode gibt es zwei Verfahren. Zum einen das coulometrische Verfahren, welches bei einem kleineren Wassergehalt geeignet ist ($<< 500$ ppm) und in diesem Bereich eine hohe Genauigkeit produziert. Zum anderen das volumetrische Verfahren, welches erst bei einem höheren Wassergehalt (> 500 ppm) Anwendung findet. Aufgrund der kleineren Wassergehaltgrenzen, welche in diesem Vorhaben Gegenstand von mehreren Untersuchungen sein werden (zwischen ca. 5 ppm und 40 ppm), wird hier das coulometrische Verfahren angewandt. Die Anforderungen maximaler Anwendersicherheit sowie der Ausschluss jeglicher Einflüsse bei der Probenverarbeitung wird durch den 917 Coulometer von Metrohm gewährleistet. Die Messungen der absoluten Feuchte werden mit einem Karl-Fischer-Titrator (917 Coulometer mit 860 KF Thermoprep von Methohm (*Abbildung 15*) durchgeführt. Der 917 Coulometer von Metrohm ist ein coulometrischer Titrator mit Diaphragma. Es wird eine direkte Messung durch Injektion der Probe in die Titrierzelle verwendet. Hydranal als Entwickler der Reagenzien der Karl-Fischer-Titration gibt für die zu erwartende minimale absolute Wassermenge von unter $10 \mu\text{g/g}$, eine Einwaage von 10 g als Orientierung an [HON20]. Generell ist bei einer geringeren zu erwartenden Wassermenge eine größere Einwaage empfehlenswert. Der Gerätehersteller hält eine Einwaage von 2,5 g als ausreichend. Das Messsystem gerät bei einem Wassergehalt von unter $10 \mu\text{g/g}$ an seine Grenzen, ein sauberes Arbeiten wird vorausgesetzt. Eine Vielzahl von Messungen hat gezeigt, dass eine Einwaage von 1 - 2,5 g auch bei sehr geringen Wassermengen ausreichend ist.

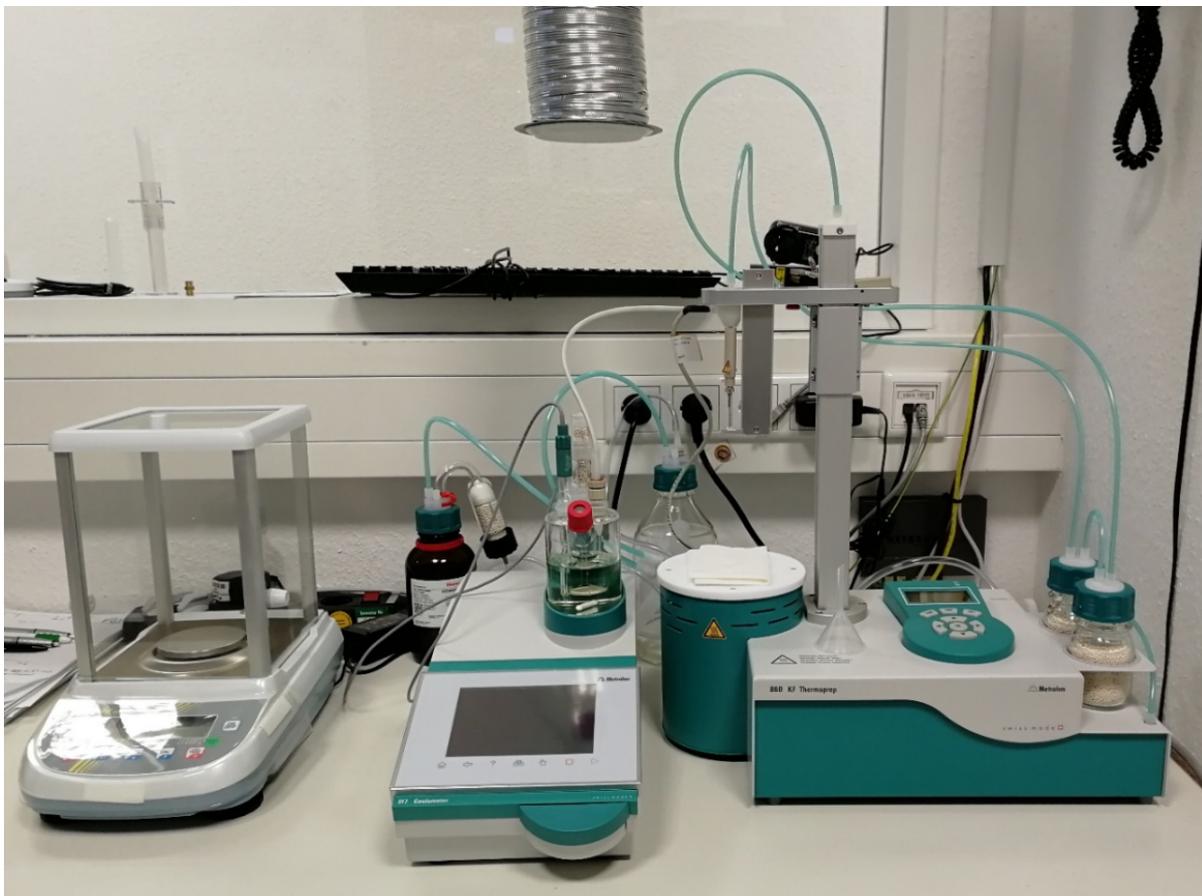


Abbildung 15: Karl-Fischer-Titrator mit Ofen (links) und Präzisionswaage (rechts)

Für die Probenentnahme wird eine Einwegspritze mit Kanüle verwendet. Es wird eine ca. 1 - 2,5 g Probe entnommen und mit der hochpräzisen Waage eingewogen. Die Titration wird grafisch in einem Diagramm gezeigt. Sobald die Titration beendet ist, wird eine absolute Feuchte $[c_W] = ppm = \frac{\mu g}{g}$ mit einer Unsicherheit im Bereich 10 μg bis 1000 μg von ± 3 ppm ausgegeben.

Messung weiterer Abhängigkeiten

In dieser Arbeit steht die Untersuchung der Feuchte im Vordergrund. Zusätzlich werden weitere Abhängigkeiten während der Feuchteuntersuchung und in einer separaten Betrachtung in einem reduzierten Umfang mituntersucht. Dabei sind drei Faktoren von Bedeutung:

- Säuregehalt
- Gasgehalt
- Durchschlagsspannung

Die für die Referenzmessung herangezogenen Messgeräte sind:

- Säuretitorator der Firma ECH Elektrochemie Halle GmbH
- Prüfgerät für die Durchschlagsspannungsmessung der Firma Baur Prüf- und Messtechnik
- Gaschromatograph mit Direktinjektion der Firma Labexchange



Abbildung 16: Säuretitorator (links), Durchschlagsspannungsmessung (Mitte) und Gas in Öl Analyse (rechts)

4.3 Steuerung und Datenerfassung der Umgebungsparameter

Die Unterbringung der verschiedenen Einheiten für die Versorgung, Steuerung, Regelung und Sicherheitskreise erfolgte in einem Schaltschrank (*Abbildung 17*).

Die Messwandler und Netzteile sind auf Hutschienen in einen Schaltschrank verbaut. Der Raspberry Pi 4B mit MCC118 Boards und Platinen sind im unteren Bereich befestigt. Die Feuchte- und Drucksensoren geben Spannungen als Messwerte aus, diese werden direkt auf die Spannungseingänge der MCC18 Boards gelegt. Die PT100 Sensoren werden über die Messwandler mit den Spannungseingängen der MCC118 Boards verbunden. Die einzelnen Elemente sind über verschiedene Sicherungen und Sicherheitskreise (temperaturabhängig) abgesichert. Ein Sicherheitsregler für die Versorgung der Heizmatten wird integriert, welcher bei Überschreiten eines festgelegten Temperaturwertes mit einem Not-Schutz abschaltet. Die eigentliche Steuerung der Zieltemperatur der Heizmatten erfolgt über eine softwareseitig im Raspberry implementierte Hysterese, welche aktuelle Temperaturmessdaten berücksichtigt und Überschwingen verhindert. Als Programmiersprache wird grundsätzlich Python verwen-

det. Für den Raspberry Pi 4B und den Erweiterungsmodulen für die Spannungsmessung stehen somit Bibliotheken zur Verfügung. Eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) wird mit PyQt5 aufgebaut. Grafische Steuerelemente zur Regelung der Heizmatten (HM1, HM2, ...) werden integriert. Jegliche Messwerte werden mit Zeitstempel in einem festgelegten Zeitintervall, welches in einer Parameterdatei festgelegt wird, gespeichert. Über Checkboxes können die einzelnen Sensoren zur Speicherung ausgewählt werden.

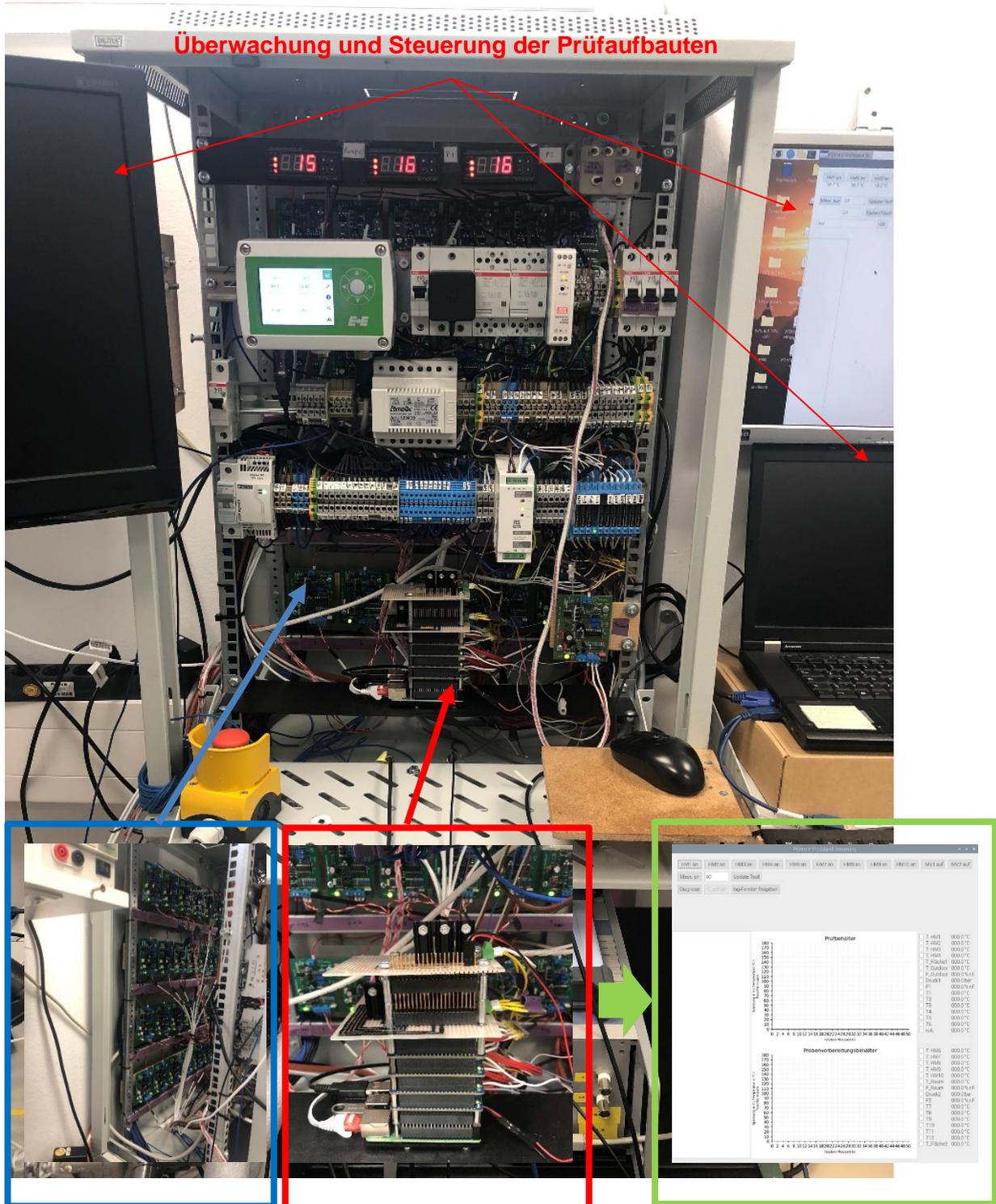


Abbildung 17: Zentrale Steuerungseinheit im Kompaktschaltschrank mit den verschiedenen Einheiten (Versorgung, Steuerung, Regelung, Datenerfassung und Sicherheit)

4.4 Ultraschallprüfköpfe und Datenerfassung der Ultraschallsignale

Ultraschallprüfköpfe und Reflektor

Die Messung wird mit drei Ultraschallprüfköpfen unterschiedlicher Frequenzen durchgeführt:

- 2 MHz, 4 MHz und 10 MHz

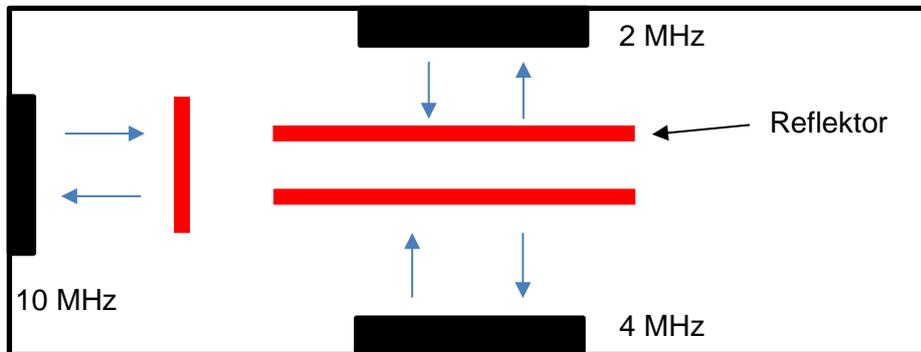


Abbildung 18: Innenansicht Prüfgefäß mit Anschlussposition der drei Ultraschallprüfköpfe

Die Ultraschallprüfköpfe wurden mit temperatur- und ölbeständigen Verschraubungen an dem Prüfgefäß montiert. Zusätzlich wurde eine Vorrichtung hinter die Ultraschallprüfköpfe angebracht, welche Ausdehnungen der Befestigungsmaterialien im Zuge von Druckbeanspruchung verhindert, sodass die exakte Position der Prüfköpfe über die gesamte Messdauer gewährleistet ist. Der Reflektor (*Abbildung 19*) wurde aus Edelstahl gefertigt. Für die drei Ultraschallprüfköpfe wurden jeweils ein eigener Reflektor in dem Prüfgefäß platziert. In diesem Projekt sind Reflektordicken für die drei Ultraschallprüfköpfe zwischen 1 – 3 mm verwendet worden.

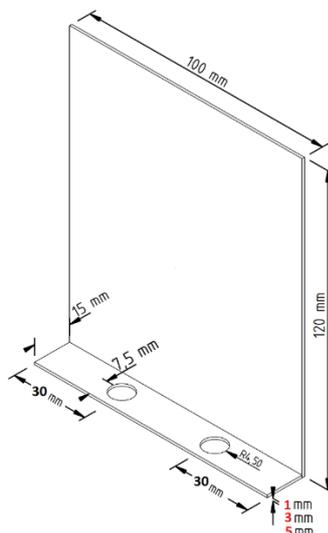


Abbildung 19: Reflektor aus Edelstahl

Messmethode

Die traditionelle Anwendung der Ultraschalltechnik liegt in der Prüfung von metallischen und polymeren Werkstoffen. Es wird im Allgemeinen zwischen zwei Methoden unterschieden. Zum einen existiert die Impuls-Echo-Methode (*Abbildung 20*, links), bei welcher der Ultraschallprüfkopf gleichzeitig als Sender und Empfänger der Ultraschallsignale fungiert. Zum anderen werden bei der Durchschallungsmethode Ultraschallsender und -empfänger gegenüber angeordnet (*Abbildung 20*, rechts). Trifft der gesendete Schallimpuls auf eine Grenzfläche zu

einem angrenzenden Medium (bspw. $Z_W \leftrightarrow Z_1$), so wird der Schallimpuls teilweise transmittiert und reflektiert. Die reflektierten, empfangenen Ultraschallimpulse werden im Amplituden-Laufzeit-Diagramm (A-Scan) dargestellt, wobei jede Grenzfläche einen Amplitudenausschlag verursacht. Im Gegensatz dazu wird bei der Durchschallungsmethode lediglich der transmittierende Teil der Schallimpulse empfangen.

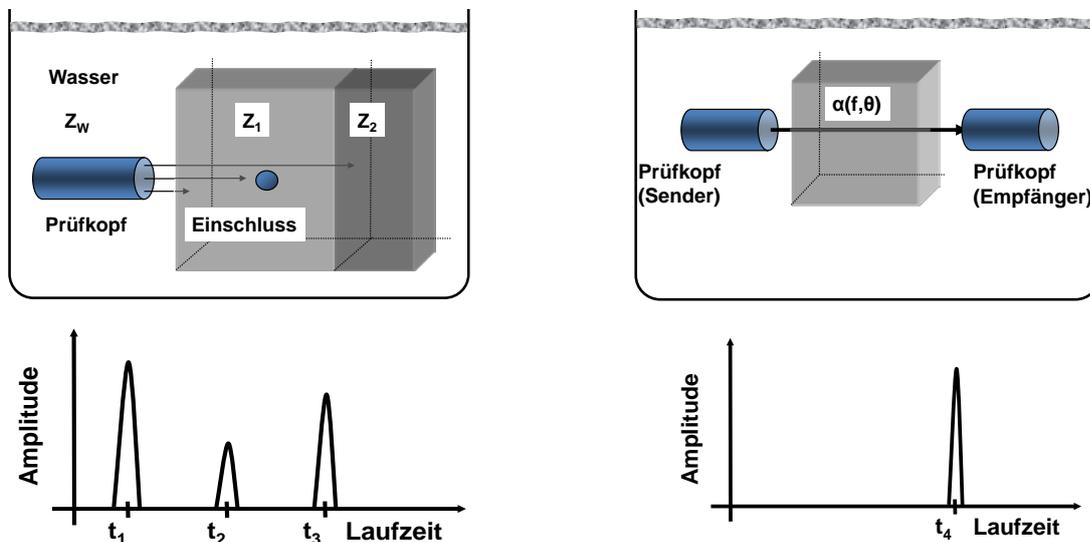


Abbildung 20: Ultraschallmessverfahren mit resultierenden Amplituden-Laufzeit-Diagrammen, links: Impuls-Echo-Verfahren, rechts: Durchschallungsverfahren

In dieser Arbeit wird für die Untersuchungen primär die Impuls-Echo-Methode verwendet.

Die Schallimpulse erfahren während der Ausbreitung in den Medien eine materialspezifische Schwächung $\alpha(f, \theta)$ des Schalldruckes. Die Druckänderung ist dabei proportional der durchlaufenden Strecke x und dem Anfangsschalldruck p_0 . Abbildung 20 zeigt die möglichen Auswertansätze im Zeit- und Frequenzbereich.

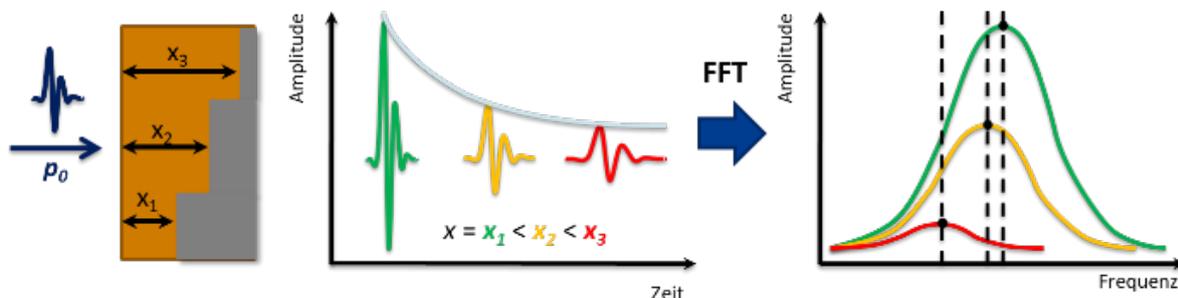


Abbildung 21: Auswirkung der Schalländerung in Zeit- und Frequenzbereich

Datenerfassung der Ultraschallsignale

Die Datenerfassung der Ultraschallmessung erfolgt mit dem Oszilloskop PicoScope 5401D. Das Oszilloskop bietet bei veränderlicher Auflösung eine gleichbleibende Echtzeit-Abtastung von bis zu 1 GS/s. Für die Untersuchungen wird eine Abtastrate von 500 MS/s bei einer Bildbreite von 200 μ s mit einer Abtastung in 2 ns Schritten verwendet, wodurch die Messgenauigkeit der Laufzeiterfassung um den Faktor 5 gegenüber handelsüblichen Ultraschallgeräten verbessert werden konnte.

4.5 Umsetzung der Ultraschallvermessung

Impuls Echo Verfahren

In dieser Arbeit werden für die Untersuchungen das Impuls-Echo Verfahren und das Durchschallungsverfahren angewendet. Im nachfolgenden wird auf die Umsetzung und die jeweiligen Anwendungsgebiete der beiden Verfahren eingegangen. Das Impuls-Echo Verfahren wurde für die Ultraschallvermessung der Isolierölproben mit Feuchte, Gas und Säure angewendet. Die Eckdaten für die in dieser Arbeit durchgeführten Ultraschallvermessung sind wie folgt:

Start der Messung (Zeit):	xxx
Ende der Messung (Zeit):	xxx
Speicherabstand:	1.0s
Messungen/s:	xxx
Messwerte:	xxx
Bildbreite:	200 μ s
Verstärkung:	24 dB - 2 MHz USPK, 28 dB - 4 MHz USPK und 34 dB - 10 MHz USPK
Pulsspannung:	200 V

Die oben festgehaltene Verstärkung für die einzelnen Prüffrequenzen resultiert aus dem Dämpfungsverhalten an dem in dieser Arbeit verwendeten Isolieröl. Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wurde bei der Auswertung der Rohdaten eine Normierung durchgeführt. Die *Abbildung 22* zeigt am Beispiel eines 2 MHz Ultraschallprüfkopfes die empfangenen Echosignale bei einer Ultraschallvermessung nach der Impuls-Echo Methode.

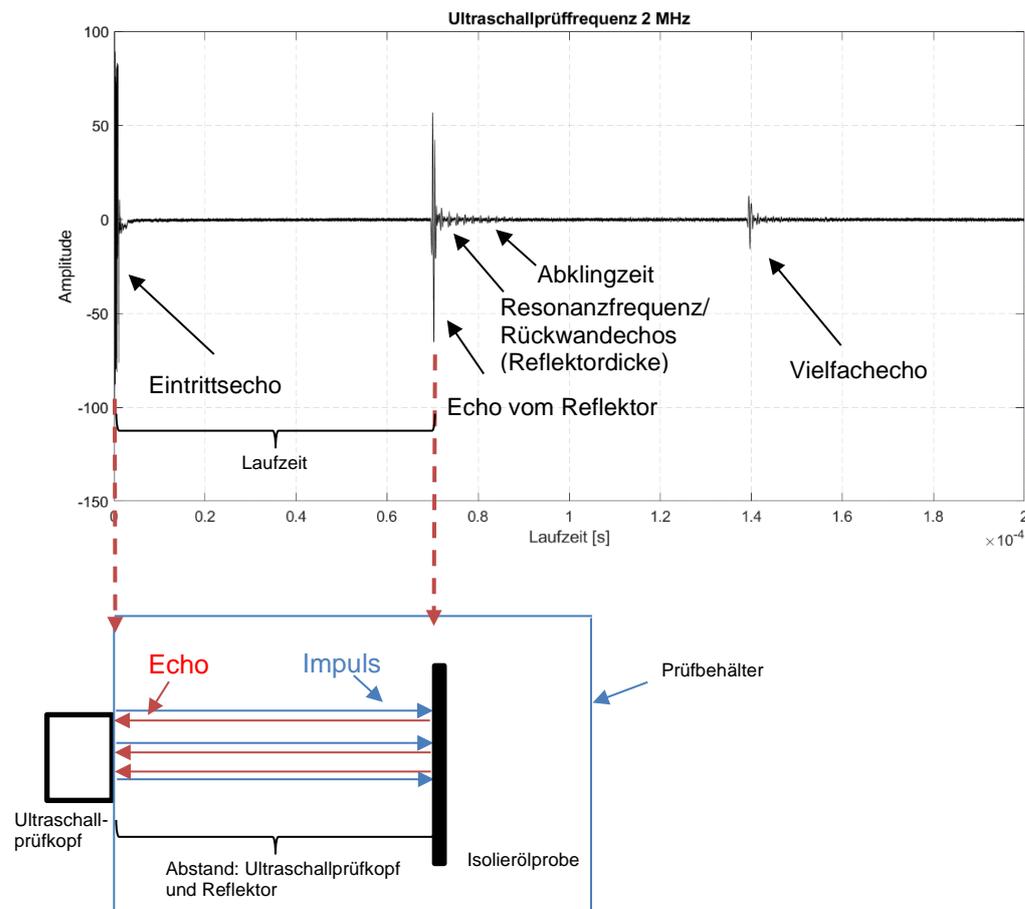


Abbildung 22: oben: Die empfangenen Echosignale am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes, unten: Die Prüfkopf- und Reflektoranordnung bei der Ultraschallvermessung nach der Impuls-Echo-Methode

Für die Auswertung ist das Signal am Reflektor von Bedeutung. Dieses Signal ist in der *Abbildung 23* dargestellt. Darin veranschaulicht sind die Auswertungsansätze. Unabhängig von der verwendeten Ultraschallprüffrequenz werden die Amplitude (max2) und die Schallgeschwindigkeit (mzc) ausgewertet.

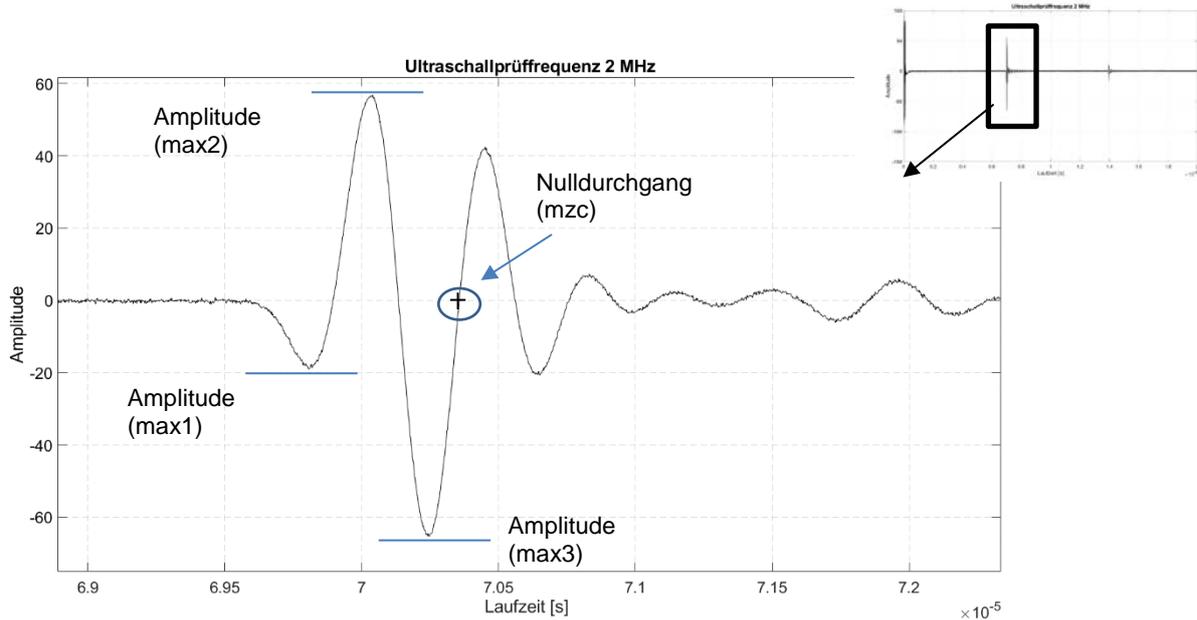


Abbildung 23: Der Auswertungsansatz des Zeitsignals am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes

Zusätzlich wird eine Analyse des Spektrums durchgeführt. In *Abbildung 24* sind die Auswertungsansätze veranschaulicht wie maximale Amplitude (specMax), Spitzenfrequenz (specfMax), Bandbreite sowie die Betrachtung der Steigung im oberen und unteren Frequenzbereich (specU46 / specO46).

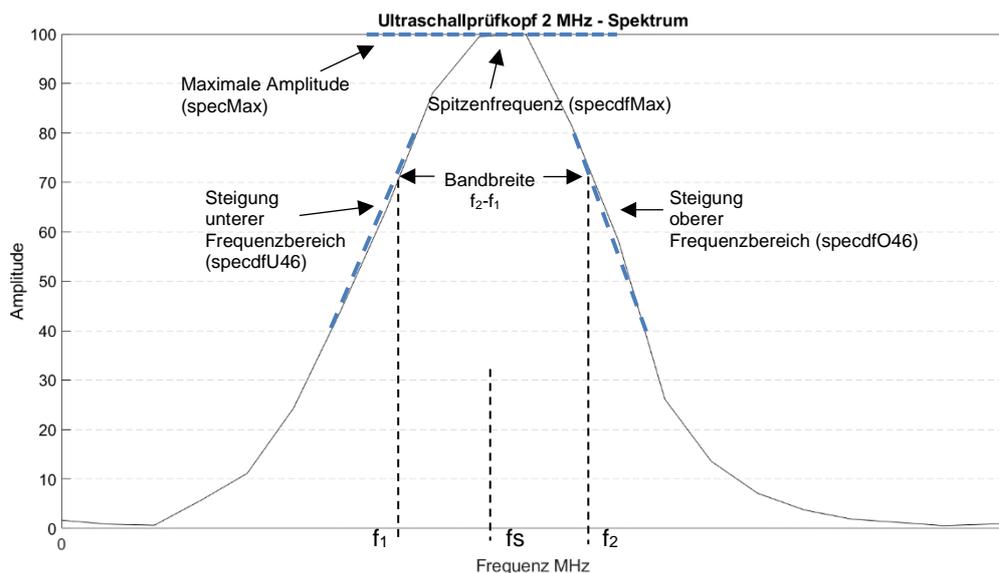


Abbildung 24: Der Auswertungsansatz des Spektrums am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes

Es wurde zusätzlich eine Temperaturkompensation durchgeführt, um bei der Analyse feuchter Isolierölproben den Temperatureinfluss zu eliminieren.

Durchschallungsverfahren

Das Durchschallungsverfahren wurde bei den Ultraschallvermessung von feuchten Feststoffproben im Isolieröl angewendet. In *Abbildung 25* sind die Auswertungsmöglichkeiten veranschaulicht. Die Vorgehensweise ist identisch, wie in *Abbildung 23* und *Abbildung 24* vorgestellt.

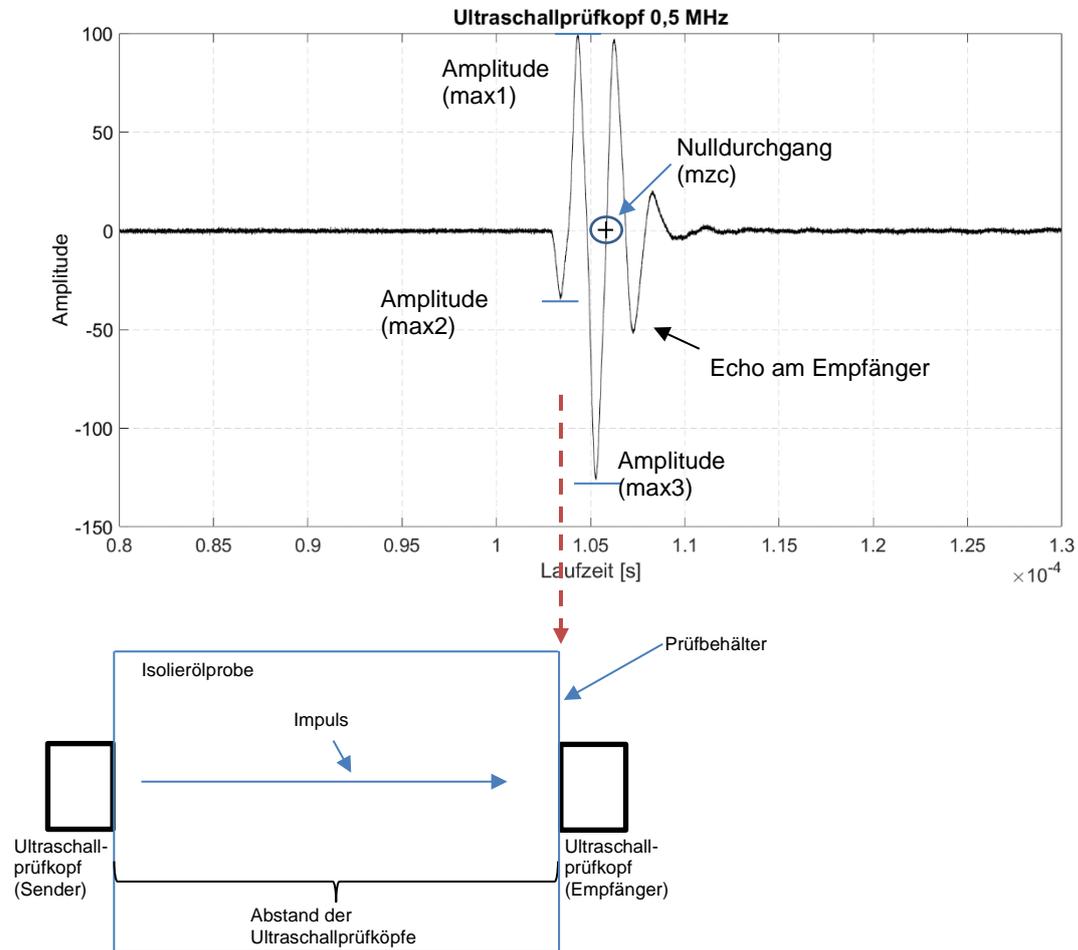


Abbildung 25: oben: Das empfangene Ultraschallsignal am Beispiel des 0,5 MHz Ultraschallprüfkopfes, unten: Die Prüfkopf-anordnung bei der Ultraschallvermessung in diesem Projekt nach der Durchschallungsmethode

5 AP 2: Materialqualifikation

Ziel ist die Herstellung der für die experimentellen Untersuchungen benötigten Isolierölproben mit Blick auf die Durchführung von Ultraschallmessungen an stetig veränderbaren Isolierölproben mit definierten Feuchtegraden bei Raumtemperatur und bei Temperaturänderung in einem kontinuierlichen Prozess ohne Umgebungseinflüsse. Während der Bearbeitung des Projektes wurden neben dem primären Ziel der Feuchtebetrachtung auch weitere Abhängigkeiten in einem reduziertem Umfang betrachtet. In den nachfolgenden Erläuterungen wird die Vorgehensweise bei der Herstellung von Isolierölproben in zwei Punkte unterteilt:

- Materialauswahl
- Probenherstellung
 - Feuchte (Schwerpunkt)
 - Probenherstellung weiterer Abhängigkeiten (Gas-, Säure- und Papieruntersuchung mit reduziertem Untersuchungsumfang)

5.1 Materialauswahl

Für die Untersuchung stehen folgende Isolieröle zur Verfügung:

- Nynas Nytro Lyra X
- Nynas Nytro 4000 X
- Shell Diala S4 ZX-I
- Nynas Nytro Taurus

Für die Untersuchung wurde das Isolieröl Nynas Nytro Taurus verwendet. Unter Rückmeldung der Projektpartners wurde sich auf dieses Isolieröl verständigt, da die Eigenschaften für andere in der Praxis verwendete Isolieröle vergleichbar sind und es in ausreichendem Maße für die unterschiedlichen Untersuchungen erhalten werden kann. Zusätzlich haben Voruntersuchungen vergleichbare Werte (Laufzeit/Amplitude) für Nynas Nytro Taurus, Nynas Nytro LyraX und Nynas Nytro 4000X ergeben. Kleine Unterschiede sind auf die Temperaturdifferenzen der einzelnen Isolierölproben zurückzuführen, bei welcher die Ultraschallvermessung durchgeführt wurde. Auf die Temperaturabhängigkeit der Ultraschallvermessung wird im AP 4 näher eingegangen. Shell Diala S4 ZX-I zeigt aufgrund des Unterschieds im strukturellen Aufbau eine bereits vermutete Abweichung bei der Ultraschallvermessung in Vergleich zu den Nynas Nytro Isolierölen. Auf die Untersuchung mit Shell Diala S4 ZX-I wird auf die Promotion verwiesen, welche auf diesem Thema nach Abschluss des Projektes erarbeitet wird.



Abbildung 26: Bereitgestellte Isolierölmengen vom kooperierenden Unternehmen in diesem Projekt

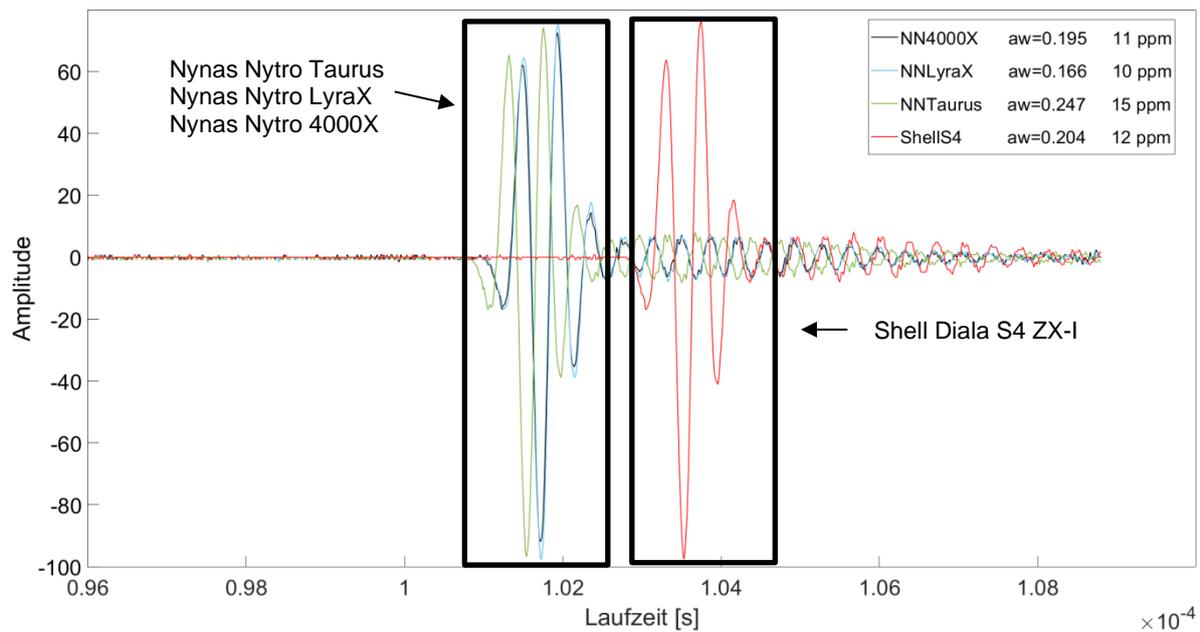


Abbildung 27: Zeitsignale am Beispiel des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes

In nachstehender Tabelle sind die Daten für Nynas Nytro Taurus aus dem Produktdatenblatt dargestellt:

Tabelle 1: Datenblatt Nynas Nytro Taurus

EIGENSCHAFTEN	EINHEIT	TESTMETHODE	GRENZWERTE		TYPISCHE KENNWERTE
			MIN	MAX	
1 - Eigenschaften					
Viskosität, 40°C	mm ² /s	ISO 3104		12.0	10.0
Viskosität, -30°C	mm ² /s	ISO 3104		1800	1000
Pour Point	°C	ISO 3016		-40	-48
Wassergehalt	mg/kg	IEC 60814		30	<20
Durchschlagsspannung					
- vor Behandlung	kV	IEC 60156	30		40-60
- nach Behandlung	kV		70		>70
Dichte, 20°C	kg/dm ³	ISO 12185		0.895	0.870
DDF bei 90°C		IEC 60247		0.005	<0.001
2 - Raffination/Stabilität					
Reinheit		IEC 60296	Klar, frei von Feststoffen		entspricht
Neutralisationszahl	mg KOH/g	IEC 62021		0.01	<0.01
Grenzflächenspannung	mN/m	EN 14210	40		45
Gesamtschwefelgehalt					
Korrosiver Schwefel		DIN 51353	nicht anwesend		nicht anwesend
Potenziell Korrosiver Schwefel		IEC 62535	nicht anwesend		nicht anwesend
Korrosiver Schwefel		ASTM D 1275 B	nicht anwesend		nicht anwesend
DBDS	mg/kg	IEC 62697-1	nicht anwesend	nicht anwesend	nicht anwesend
Inhibitoren	Gew%	IEC 60666		nicht anwesend	nicht anwesend
Metallpassivator Zusatzstoffe	mg/kg	IEC 60666	nicht anwesend	nicht anwesend	nicht anwesend
Gehalt an 2-Furfural und verwandter Verbindungen	mg/kg	IEC 61198		0.05	<0.05
Aromatengehalt	%	IEC 60590			9
3 - Elektrische Eigenschaften					
Oxidationsstabilität bei at 120°C, 164 h		IEC 61125 C			
Säurezahl gesamt	mg KOH/g			1.2	0.50
Schlammgehalt	Gew%			0.8	0.15
DDF bei 90°C				0.500	0.080
4 - Gesundheit, Sicherheit und Umwelt					
Flammpunkt, PM	°C	ISO 2719	135		152
PAK	Gew%	IP 346		3	<3
PCB		IEC 61619	nicht nachweisbar		nicht nachweisbar

5.2 Probenherstellung Feuchte

Es wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Entwicklung eines Trocknungs- und Befeuchtungskonzepts
- Umsetzung eines kontinuierlichen Prozesses
- Druckvariation
- Untersuchung bei unterschiedlichen Temperaturstufen
- Referenzmessungen
- Vorgehensweise bei der Herstellung von definierten Feuchtegehalten in Isolierölproben
- Ergebnisse realisierte Feuchtegrade

Entwicklung eines Trocknungs- und Befeuchtungskonzepts

Die Idee ist, dass das Isolieröl im ersten Schritt in einem kontinuierlichen Prozess, unabhängig von seinem aktuellen Trocknungszustand, auf einen gewünschten Grad getrocknet wird. In einem zweiten Schritt wird der gewünschte Feuchtegrad durch eine kontinuierliche Befeuchtung auf den gewünschten Grad eingestellt. Der Vorgang wird solange durchgeführt und gegebenenfalls korrigiert bis der gewünschte Endzustand erreicht ist (siehe Konzept *Abbildung 37*). Im Folgenden werden die einzelnen Methoden erläutert, welche für die Befeuchtung und Trocknung herangezogen werden.

Ultraschallvernebler – Befeuchtung von Proben

Der Ultraschallvernebler benötigt Wasser, welches als dünner Film über schwingfähige Bauteile (Keramikblättchen bzw. piezokeramisches Element) geführt wird. Die Bauteile werden mechanisch mit über 20 kHz bis hin zu 3 MHz in Schwingung versetzt. Die Schwingung der Keramikblättchen geht in Form von Kapillarwellen ins Wasser über. Die Wellen erzeugen mikrofeine Tröpfchen in Größe von 2-4 μm , wodurch ein Nebel wahrzunehmen ist. Mit einem Ventilator wird der Nebel ausgeblasen, sodass ein Austausch mit der Umgebungsfeuchte satt findet [45].

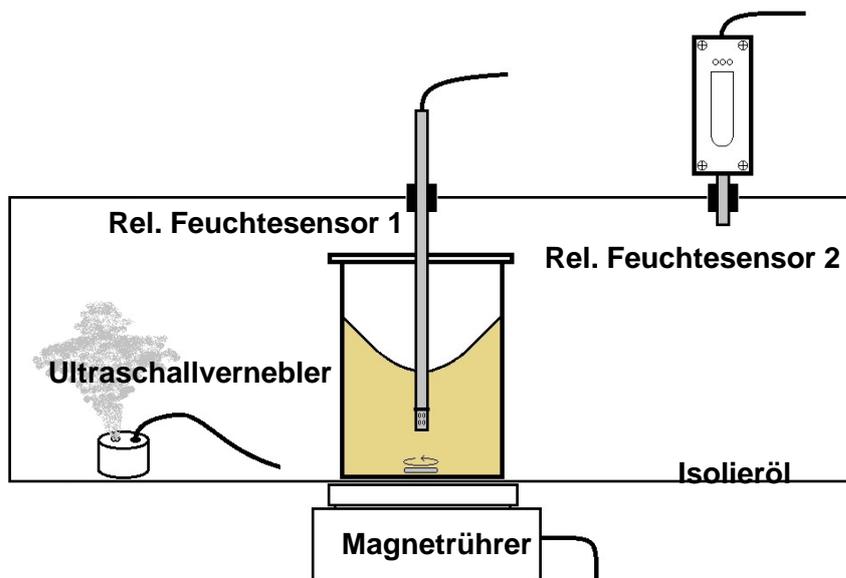


Abbildung 28: Vorgehen Probenherstellung Feuchte mit Ultraschallvernebler

Salzlösungen – Trocknung und Befeuchtung von Proben

Der Kristall eines reinen Salzes nimmt Wasser auf und bildet eine Lösung, wenn die Luftfeuchte größer als die der charakteristischen Luftfeuchtigkeit des reinen Salzes, der Deliqueszenzfeuchtigkeit (DRH), ist. Voraussetzung ist, dass das reine Salz keinen Hydratationsprozessen unterliegt. Die Deliqueszenzfeuchtigkeit beschreibt das Phasengleichgewicht zwischen kristallinem Zustand und Salzlösung und zugleich das Gleichgewicht zwischen Salzlösung und der Luftfeuchtigkeit. Ist die DRH unterhalb der relativen Luftfeuchtigkeit, so nimmt das reine Salz Wasser aus der Umgebung so lange auf, bis die relative Luftfeuchtigkeit den Wert der DRH annimmt. Wenn die DRH oberhalb der relativen Luftfeuchtigkeit ist, so gibt die Salzlösung Wasser ab. Die relative Luftfeuchtigkeit erhöht sich bis zur DRH, wenn ausreichend Wasser in der Salzlösung vorhanden ist. Dies kann dazu führen, dass die Salzlösung vollkommen austrocknet [Sal20].

Diese Grundlage wird in der Praxis zum Regulieren der relativen Luftfeuchtigkeit, z.B. in Vitrinen oder Klimaschränken, verwendet [Sal20]. Die Luftfeuchtigkeit sorgt für eine Zu- oder Abnahme der Feuchte im Öl.

Tabelle 2: Deliqueszenzfeuchtigkeit einiger Salze [Sal20]

Salzlösung	Temperatur [° C]	15	20	25	30	35	40	45	50
		Relative Feuchte [%]							
Kaliumsulfat K ₂ SO ₄		97	97	97	96	96	96	96	96
Kaliumchlorid KCl		87	86	85	85	84	82	81	80
Ammoniumsulfat (NH ₄) ₂ SO ₄		81	81	80	80	80	79	79	78
Natriumchlorid NaCl		76	76	75	75	75	75	75	75
Natriumnitrit NaNO ₂		-	65	65	63	62	62	59	59
Ammoniumnitrat NH ₄ NO ₃		69	65	62	59	55	53	47	42
Magnesiumchlorid MgCl ₂		34	33	33	33	32	32	31	30

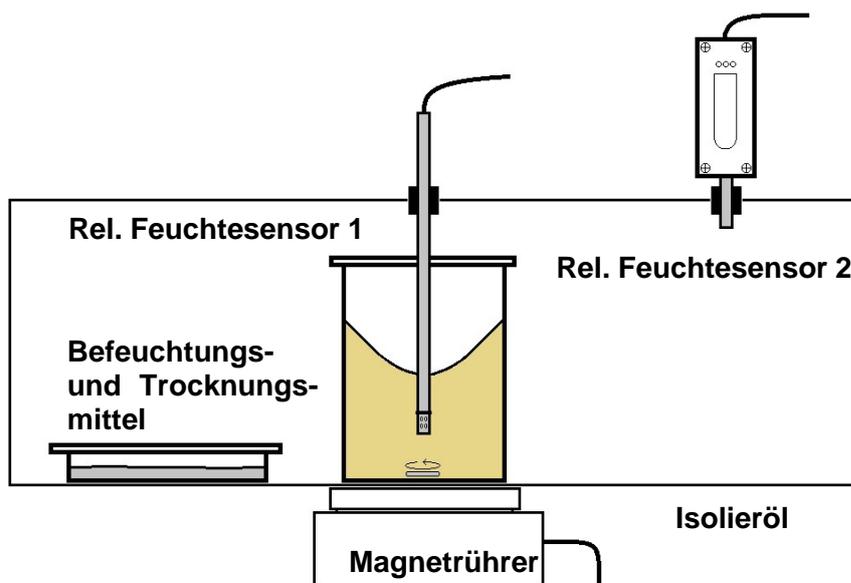


Abbildung 29: Vorgehen Probenherstellung Feuchte mit definierten Salzlösungen

Es gibt weitere Trocknungsmöglichkeiten, die hier vollständigheitshalber erwähnt werden:

- Papierfilter, Mikrofilter aus Glaswolle, Molekularsieb, Vakuum-Entgasungsanlage, Durchblasen von trockenem Stickstoff und Absorptionstrockner

In dieser Arbeit setzen wir die Realisierung eines Trocknungs- und Befeuchtungssystems mit Salzlösungen Natriumchlorid (gesättigt für die Befeuchtung – Lösung), Magnesiumnitrat Hexahydrat und Calciumchlorid (ungesättigt für die Trocknung – Pulver) ein, sowie Ultraschall-Vernebler als Zusatzoption. Der Vorteil liegt sowohl in der guten Integrierbarkeit des Verfahrens in kontinuierliche Messprozesse, als auch in der Möglichkeit, mit demselben Verfahren Öle zu befeuchten oder zu trocknen. Im ersten Schritt wurde durch einen Vorversuch der Ansatz erprobt. Die *Abbildung 30* zeigt einen hermetisch geschlossenen Behälter, in der ein Becherglas mit Salzlösung und ein Becherglas mit Isolieröl platziert werden. Das Isolieröl wird in das Becherglas gefüllt und der Behälter geschlossen. Ein Dichtband dichtet den Deckel und die Behälter ab. In den Deckeln werden mehrere abgedichtete Durchführungen installiert, durch die die kapazitiven Messsensoren geführt werden. Die Trocknung und Befeuchtung finden in verschiedenen Behältern statt.

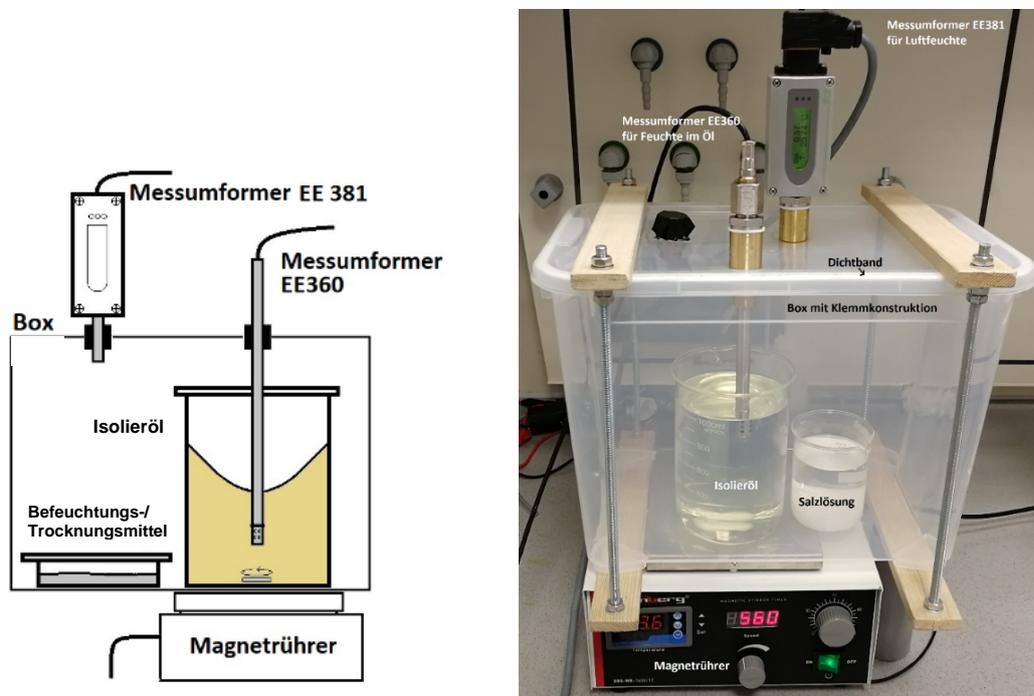


Abbildung 30: Trocknungs- und Befeuchtungsansatz im Vorversuch

Nachstehende Tabelle zeigt die Salzlösungen, mit denen definierte Feuchtwerte eingestellt werden.

Tabelle 3: Ausgewählte Salzlösungen für die Steuerung des Befeuchtungskonzepts

Salzlösung	Ziel
Calciumchlorid ungesättigt	Trockenes Öl
Natriumchlorid gesättigt	Feuchtes Öl

Die *Abbildung 31* und *Abbildung 32* zeigen die Ergebnisse der Vorversuche eines Befeuchtungs- und Trocknungsansatzes. Das Calciumchlorid wird ohne Zugabe von destilliertem Wasser in die Schale/Behälter gefüllt. Das Natriumchlorid wird in ein Becherglas mit ausreichend destilliertem Wasser für die Befeuchtung der Isolieröle befüllt, sodass

verdünnte Salzlösungen vorliegen. Frisches Nynas Nytro Taurus wird in ein Becherglas eingefüllt. Anschließend werden die Deckel mit Klemmvorrichtungen auf die Behälter gepresst. Zur Homogenisierung und Umwälzung des Öls kommt ein Magnetrührer zum Einsatz. Die Sättigung der Luft und des Isolieröls hat einen negativ exponentiellen Verlauf. Damit der Feuchtegehalt im Öl sich effektiv der DRH von 75 % annähert, muss eine durchgehende Umwälzung durchgeführt werden. *Abbildung 31* zeigt die ersten Ergebnisse des Befeuchtungsversuchs. Die Langzeitmessung der Trocknung mit Calciumchlorid zeigt eine exponentielle Abnahme der Feuchte im Isolieröl. *Abbildung 32* zeigt die ersten Ergebnisse des Trocknungsversuchs. Beide Verfahren funktionieren zuverlässig. Für höhere Temperaturen können Ultraschallvernebler verwendet werden, welche die Luftfeuchtigkeit auch über eine temperaturspezifische Wassermenge der Luft weiter erhöht.

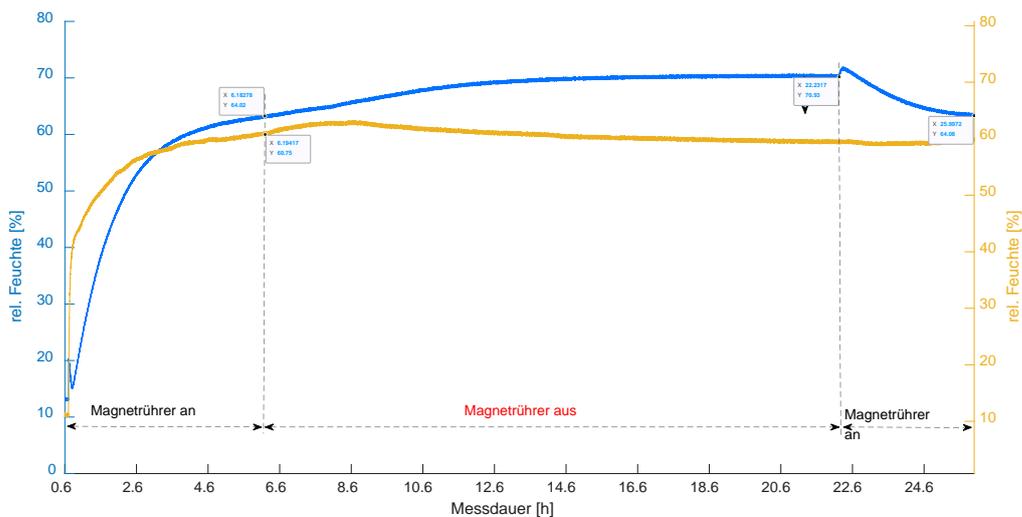


Abbildung 31: Erster Versuch einer Befeuchtung durch die Langzeitmessung mit Natriumchlorid und Calciumchlorid bei Raumtemperatur, blau = rel. Feuchte im Behälter / gelb = rel. Feuchte in der Ölprobe

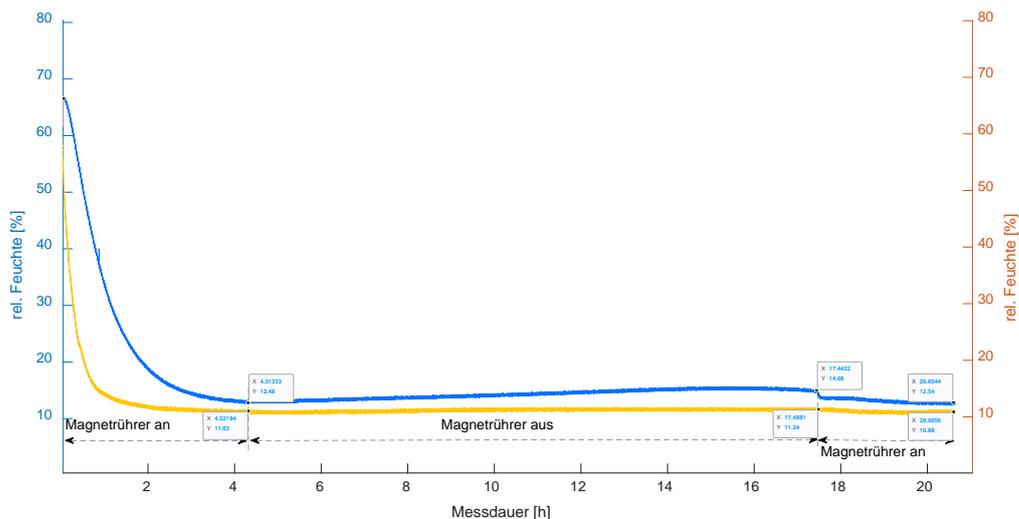


Abbildung 32: Erster Versuch einer Trocknung durch die Langzeitmessung mit Natriumchlorid und Calciumchlorid bei Raumtemperatur, blau = rel. Feuchte im Behälter und gelb = rel. Feuchte im Isolieröl

Nach erfolgreichen Vorversuchen mit dem favorisierten Ansatz für die Befeuchtung und Trocknung von Isolierölproben wurde in einem weiteren Schritt die Effizienz des Trocknungs- und Befeuchtungsprozesses optimiert. Eine mehrstufige Plattenanordnung fungiert als

Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Öl und Umgebungsraum, sodass der Anpassungsprozess des Öls an die Umgebungsfeuchte deutlich schneller verläuft. *Abbildung 33* zeigt die Anordnung schematisch und im Einsatz. Hierdurch sind bei dem Trocknungsprozess Werte < 2 ppm absolute Feuchte realisierbar.

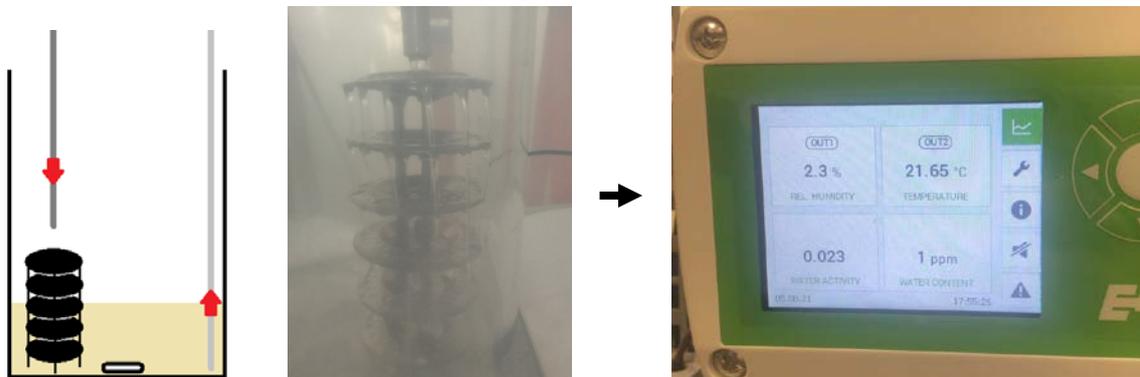


Abbildung 33: links: Anordnung für die Erzielung einer schnelleren und effizienteren Trocknung, rechts: Referenzmessung mit EE 360 – relative Feuchte von 2,3 % mit 1 ppm absoluter berechneter Feuchte bei 21,65 °C

In einem letzten Schritt wurden die herausgearbeiteten Ansätze in zwei verschiedenen Gefäßen – jeweils getrennt für Trocknung und Befeuchtung – eingebracht und mit entsprechenden Elementen miteinander verbunden. Durch Klemmleiste und Spanngurte wird zusammen mit Dichtungsbändern die nötige hermetische Abgeschlossenheit gewährleistet. In den Gefäßen sind jeweils 10 Liter Borosilikatgläser eingebracht, aus welchen durch $\frac{1}{4}$ Zoll Edelstahlrohre das Isolieröl mit einem Zulauf und Ablauf in einen Kreislauf außerhalb der Behälter geleitet wird bzw. in den von außerhalb ein Isolieröl in den Behälter eingeleitet werden kann. Der Zugang auf der oberen Seite wird durch Ventile geregelt.

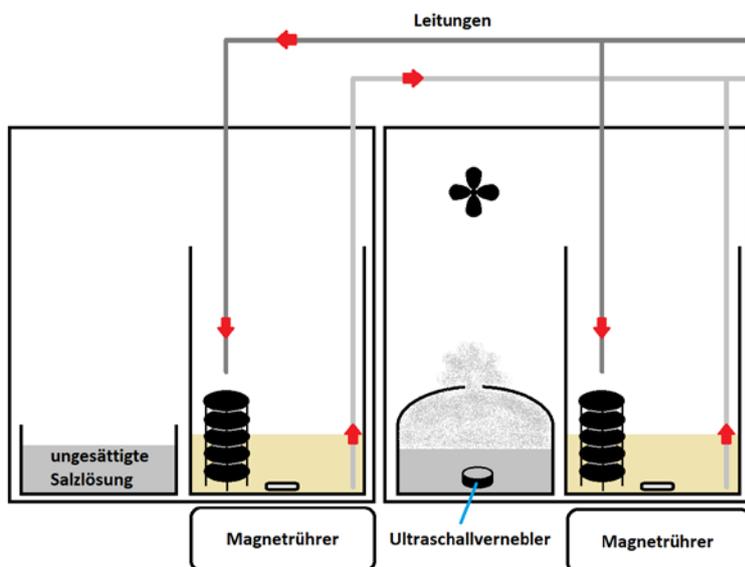


Abbildung 34: Trocknungsbehälter (links) und Befeuchtungsbehälter (rechts), es wurde für die Befeuchtung eine gesättigte Salzlösung verwendet

Umsetzung eines kontinuierlichen Prozesses

Für eine kontinuierliche Feuchteuntersuchung mit einstellbaren Feuchte- und Temperaturstufen ohne äußere Einflüsse ist der nachfolgende Ansatz mit integrierter Zirkulation realisiert. Zur weiteren Unterstützung der Homogenisierung der Feuchte im Öl wird ein Magnetrührer,

welcher außerhalb der Konditionierungsgefäße positioniert wird, eingesetzt. Die Pumpe wird aktiv gekühlt, wodurch eine thermische Beeinflussung des zirkulierenden Öls größtenteils verhindert wird (*Abbildung 35*).

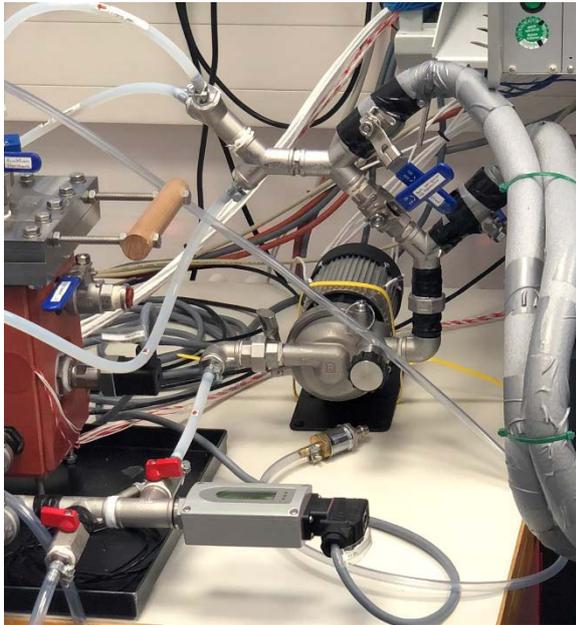


Abbildung 35: Umwälzpumpe zwischen den Trocknungs- bzw. Befeuchtungsbehältern und den Prüfgefäßen

Zwischen den Prüfgefäßen und den Trocknungs-/Befeuchtungsgefäßen sind die Ölkreisläufe hermetisch abgeschlossen mit Edelstahlfittings, Edelstahlventilen, Edelstahlrohren, PTFE Dichtungen sowie PTFE Rohren realisiert um mögliche Umgebungseinflüsse auf die zirkulierende Isolierölprobe zu verhindern.

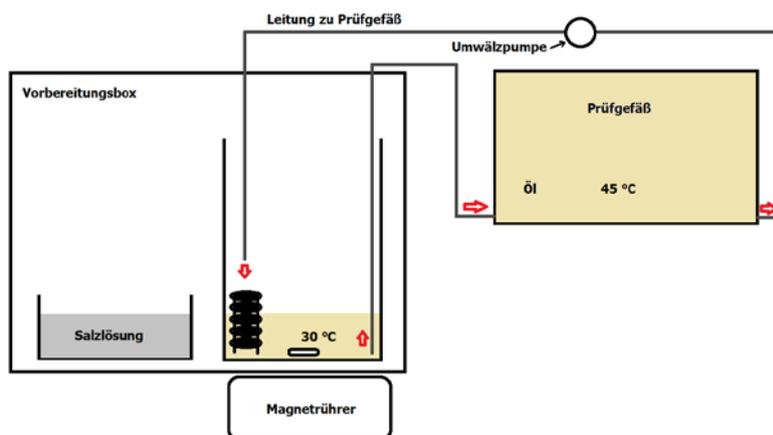


Abbildung 36: Konzept für die Zirkulation mit Zirkulationspumpe aus Edelstahl mit Magnetkopplung

In einem weiteren Modifikationsvorgang sind beide Prüfgefäße mit den Befeuchtungs- und Trocknungsgefäßen verbunden (*Abbildung 37*). Die Prüfgefäße können durch entsprechende Ventileinstellung unabhängig voneinander in die Ölzirkulation eingebunden werden.

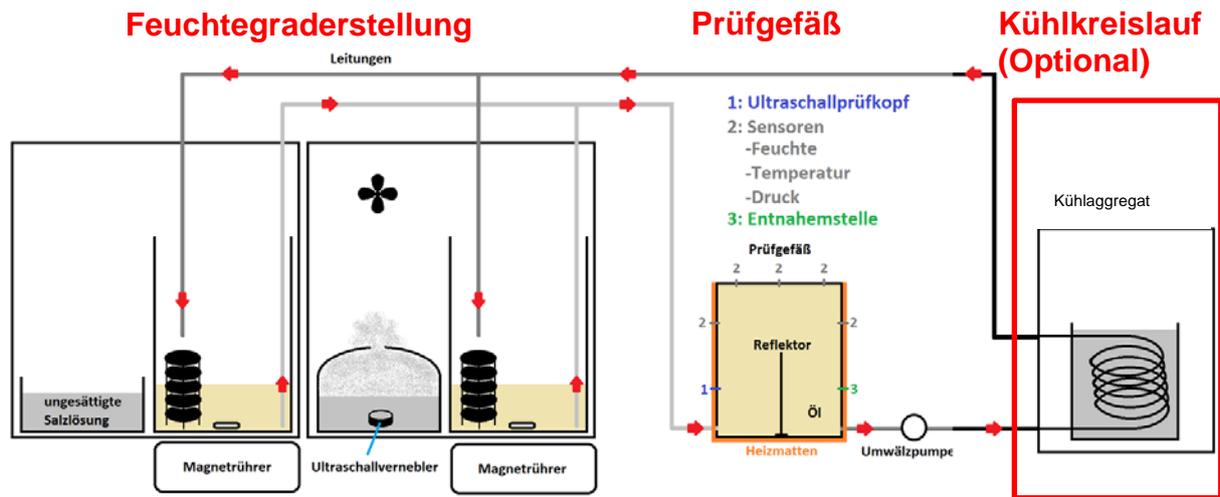


Abbildung 37: Konzept für die Integration des Befeuchtungs- und Trocknungsprozesses in das Gesamtsystem der Feuchtegradrealisierung

Die Untersuchungen der Isolierölproben mit unterschiedlichen Feuchtegraden bei unterschiedlichen Temperaturstufen (*Abbildung 39*) werden in diesem Projekt werden mit und ohne Zirkulation durchgeführt.

Bei der Umsetzung eines kontinuierlichen Prozesses war es wichtig, eine gleichmäßige Verteilung des Isolieröl in dem Prüfgefäß zu realisieren. Hierzu wurde eine Umlenk wand aus Edelstahl im Prüfgefäß eingebaut. In der *Abbildung 38* ist beispielhaft der Effekt der Ölverteilung innerhalb des Prüfgefäßes mit künstlich erzeugter Reaktion vor und nach dem Einbau der Umlenk wand dargestellt. Ersichtlich sind rechts die eingebrachten Gasblasen, die sich gleichmäßig verteilen, wohingegen rechts – ohne Umlenk wand – keine Blasen erkennbar sind.

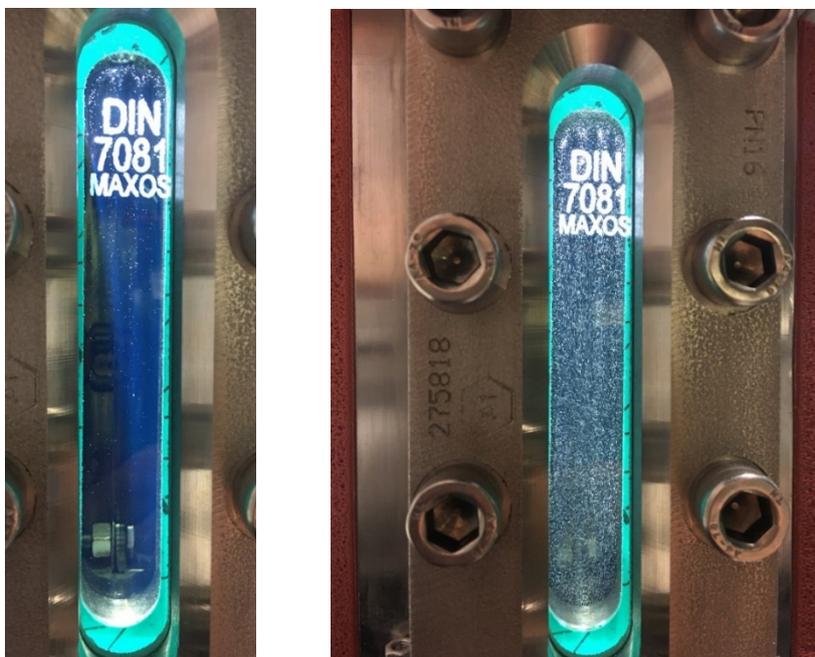


Abbildung 38: Links: Ölverteilung ohne Umlenk wand, rechts: mit Umlenk wand im Prüfgefäß

Untersuchung mit unterschiedlichen Temperaturstufen

Für die Ultraschallvermessung wurden unterschiedliche Feuchtegrade bei Variation der Temperatur vermessen. In *Abbildung 39* sind die Messpunkte der einzelnen Temperaturstufen in Abhängigkeit der gewünschten Feuchtegrade dargestellt. Dabei wurde die maximale

Temperaturstufe durch die maximale Temperaturbeständigkeit einiger Sensoren begrenzt (Ultraschallsensor, Drucksensor, ...). Die Vorgehensweise bei der Erstellung einzelner Proben ist in *Abbildung 45* dargestellt. Das Ergebnis der einzelnen Feuchtegrade ist beispielhaft in *Abbildung 46* und *Abbildung 47* für den 2 MHz Ultraschallprüfkopf ohne Zirkulation dargestellt.

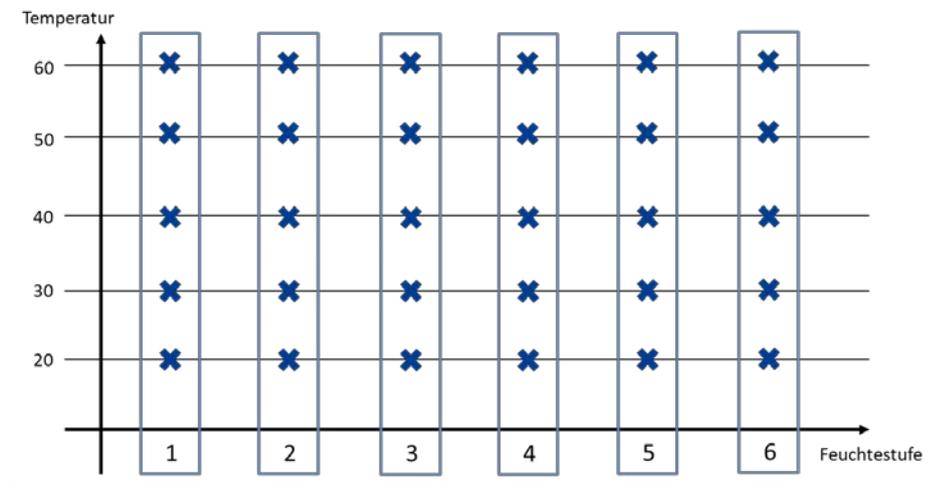


Abbildung 39: Untersuchung der Abhängigkeit bei unterschiedlichen Temperaturstufen mit definierten Feuchtegehalt und Druck

Druckvariation

In einem realen Hochspannungstransformator ist ein hydrostatischer Druck, abhängig von der Betrachtungshöhe, von ca. 1-3 vorherrschend. Die Ultraschallvermessungen werden für jede Messreihe bei Umgebungsdruck durchgeführt. Nach Abschluss der Ultraschallvermessung einer Feuchte- und Temperaturstufe wurde eine Druckerhöhung durchgeführt. Der Druck wurde auf 1 bar erhöht und die Ultraschallvermessung neugestartet. Das Ganze wurde für jeden Ultraschallprüfkopf wiederholt. In Vorfeld der Feuchteuntersuchung wurde eine kleine Messreihe gestartet, bei welcher die Auswirkung der Druckerhöhung (Umgebungsdruck → 1 bar → 1,5 bar) auf die Ultraschallgeschwindigkeit untersucht wurde. In unserem Aufbau sind aufgrund der sensiblen Sensoren nicht größere Drücke realisierbar, was für den realen Betrieb im Transformator annähernd übertragbar ist. Für Die Druckmessung wurde das Stickstoff 6.0 mit hohem Reinheitsgrad verwendet. Der schematische Aufbau ist in der *Abbildung 40* dargestellt

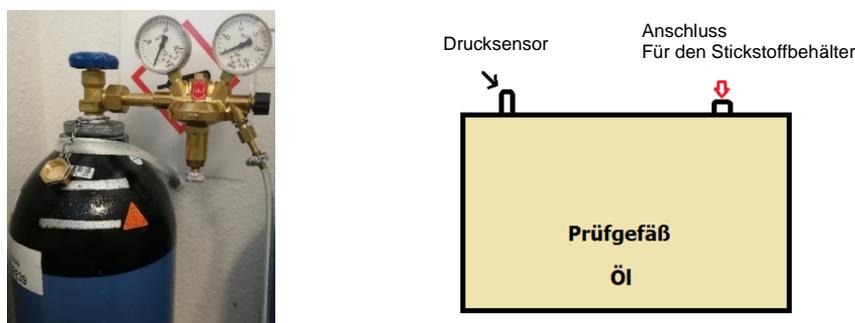


Abbildung 40: Aufbau Druckmessung
(rechts: Anschluss Prüfgefäß, links: Druckbehälter mit Stickstoff 6.0)

Referenzmessung

Bei der Referenzmessung der Feuchte wurden zwei Bereiche unterschieden. Zum einem wurde die relative Feuchte mit dem EE360 Sensor (*Abbildung 14*), welcher auf der Höhe der Ultraschallprüfköpfe angebracht ist kontinuierlich im Prüfgefäß, erfasst. Zusätzlich wurde der

EE381 Sensor in den zirkulierenden Kreislauf außerhalb des Prüfgefäßes eingebracht. Des Weiteren wurden in definierten Zeitabständen Isolierölproben entnommen und mittels Direkttitration (KFT) unmittelbar nach der Entnahme vermessen (Abbildung 41). Die Messinstrumente (EE360, EE381, KFT und Messwaage) wurden in regelmäßigen Zeitabständen einer Kalibrierung unterzogen.



Abbildung 41: Referenzmessung: Direkttitration während eines Befeuchtungsprozesses

Die Untersuchung der Feuchte wird in einem reduziertem Umfang durch die Messung der Durchschlagsspannung begleitet. Dabei wird direkt aus dem Prüfgefäß, durch eine dafür entwickelte Vorrichtung, das Isolieröl entnommen. Als erster Schritt werden, nach der vorausgegangenen Reinigung der Prüftasse, einige Spülgänge durchgeführt. Dazu wird die Innenseite der Prüftasse sowie die Elektroden vollständig mit der zu prüfenden Isolierölprobe benetzt (Abbildung 42, Punkt 1 und 2). Dieser wird mehrmals wiederholt und das Restöl entsorgt. Danach wird die Prüftasse mit dem zu prüfenden Isolieröl unter Vermeidung von Luftbläschen gefüllt (Abbildung 31 Punkt 3 – abgeschrägter Schlauch an der Wandinnenseite). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

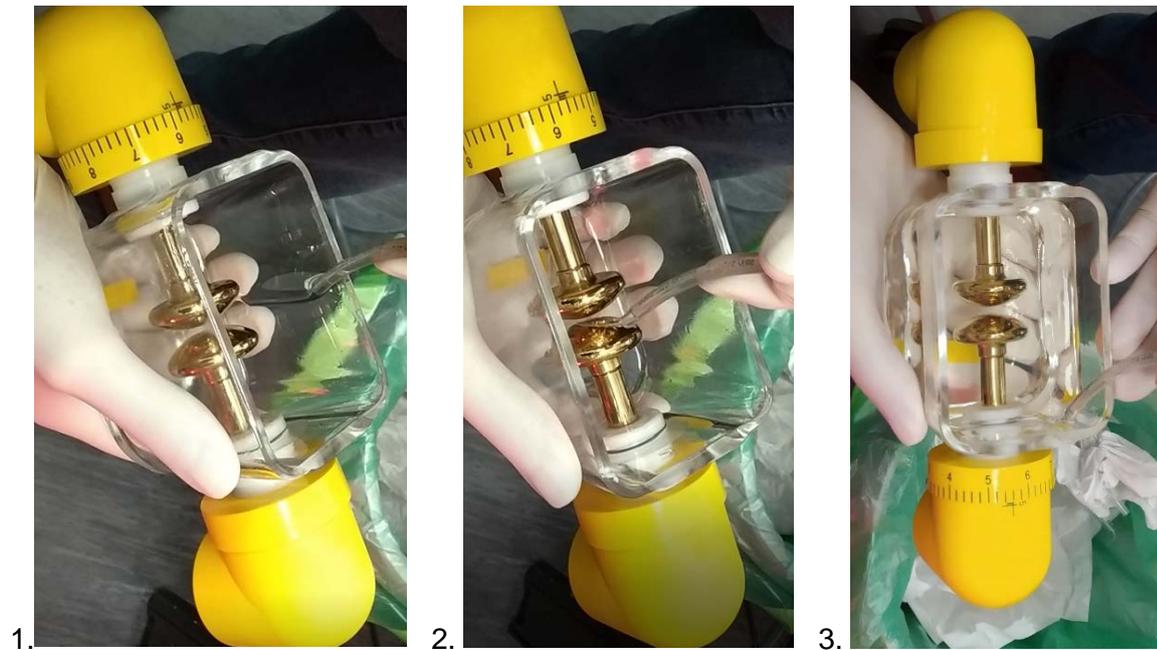


Abbildung 42: Referenzmessung Durchschlagsspannung mit 1. Benetzung der Innenseite Prüftasse, 2. Benetzung der Elektroden und 3. Befüllen der Prüftasse

Die Messung des Säuregehalts (*Abbildung 43*) nach der durchgeführten Untersuchung war ebenfalls ein Bestandteil der Referenzuntersuchung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

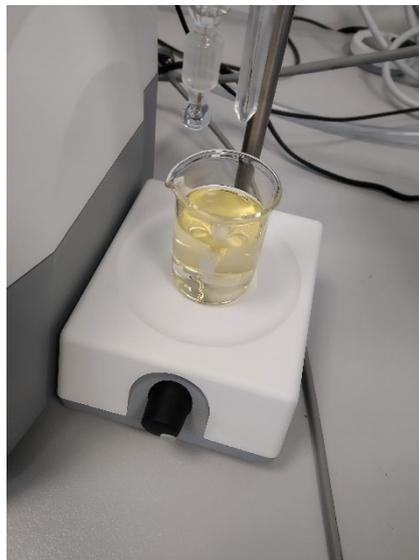


Abbildung 43: Säuretitration

Zusätzlich wurde die Gas-in-Öl Untersuchung (*Abbildung 44*) als weitere Referenzmessung am Ende eines Untersuchungsabschnitts der Feuchtebetrachtung herangezogen. Beispielhaft ist in der *Abbildung 48* ein Ergebnis der GC-Untersuchung dargestellt.

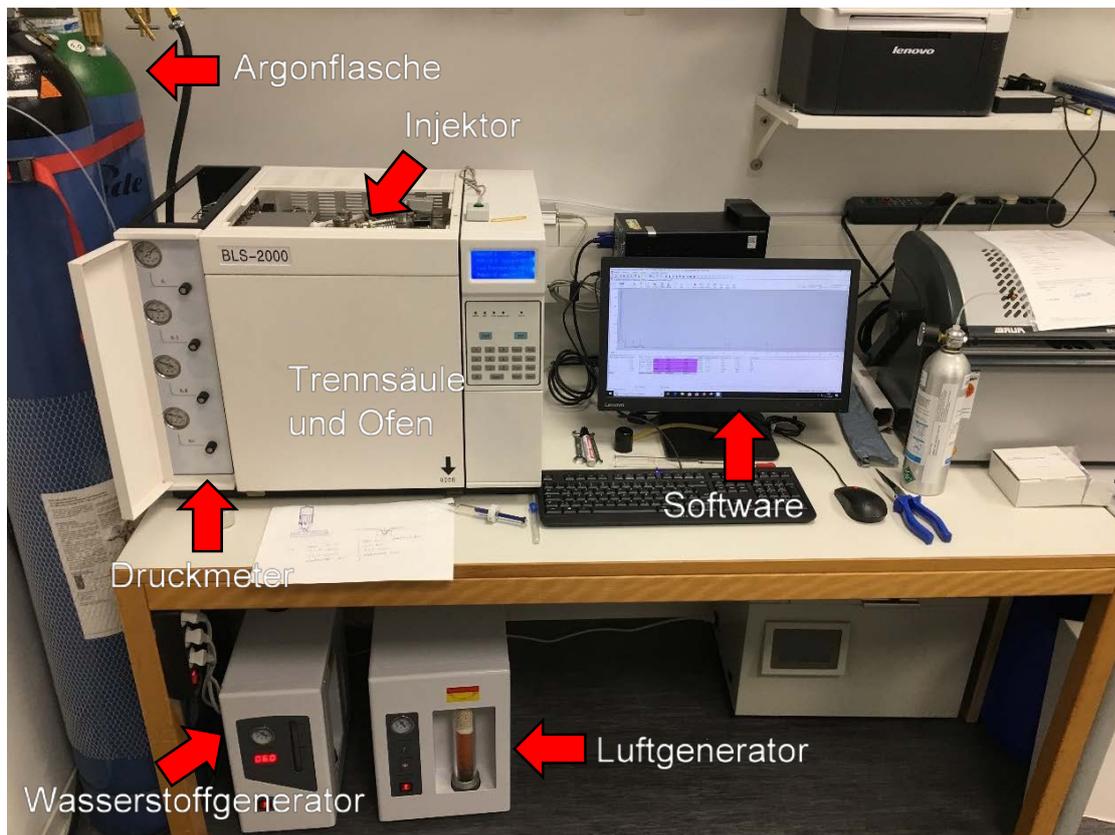


Abbildung 44: Gaschromatograph bei der FGH e.V.

Die Referenzmessung der Temperatur innerhalb und außerhalb der Prüfgefäße wurde mit den PT 100 Sensoren (*Abbildung 10*) und Temperatursensoren integriert in den Feuchtesensoren (*Abbildung 14*) erfasst.

Vorgehensweise bei der Herstellung von definierten Feuchtegehalten in Isolierölproben

Im Nachfolgenden ist die Vorgehensweise bei der Herstellung von Isolierölproben unterschiedlicher Feuchtegrade unter definierten Umgebungsbedingungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Herstellungsprozess grundsätzlich mit einer maximalen Trocknung der Probe beginnt. Nach Erreichen des minimalen Feuchtegehalts und der gewünschten Temperaturstufe, welcher durch die Referenzmessungen verifiziert wird, startet die Befeuchtung zum Zielgehalt der Feuchte im Öl. Wenn die gewünschte Zielprobe erreicht ist, wird die Ultraschallvermessung mit den drei ausgewählten Sensoren bei zwei Druckstufen (0 und 1 bar) durchgeführt. Danach wird der ganze Prozess für die nächste Feuchtestufe wiederholt.

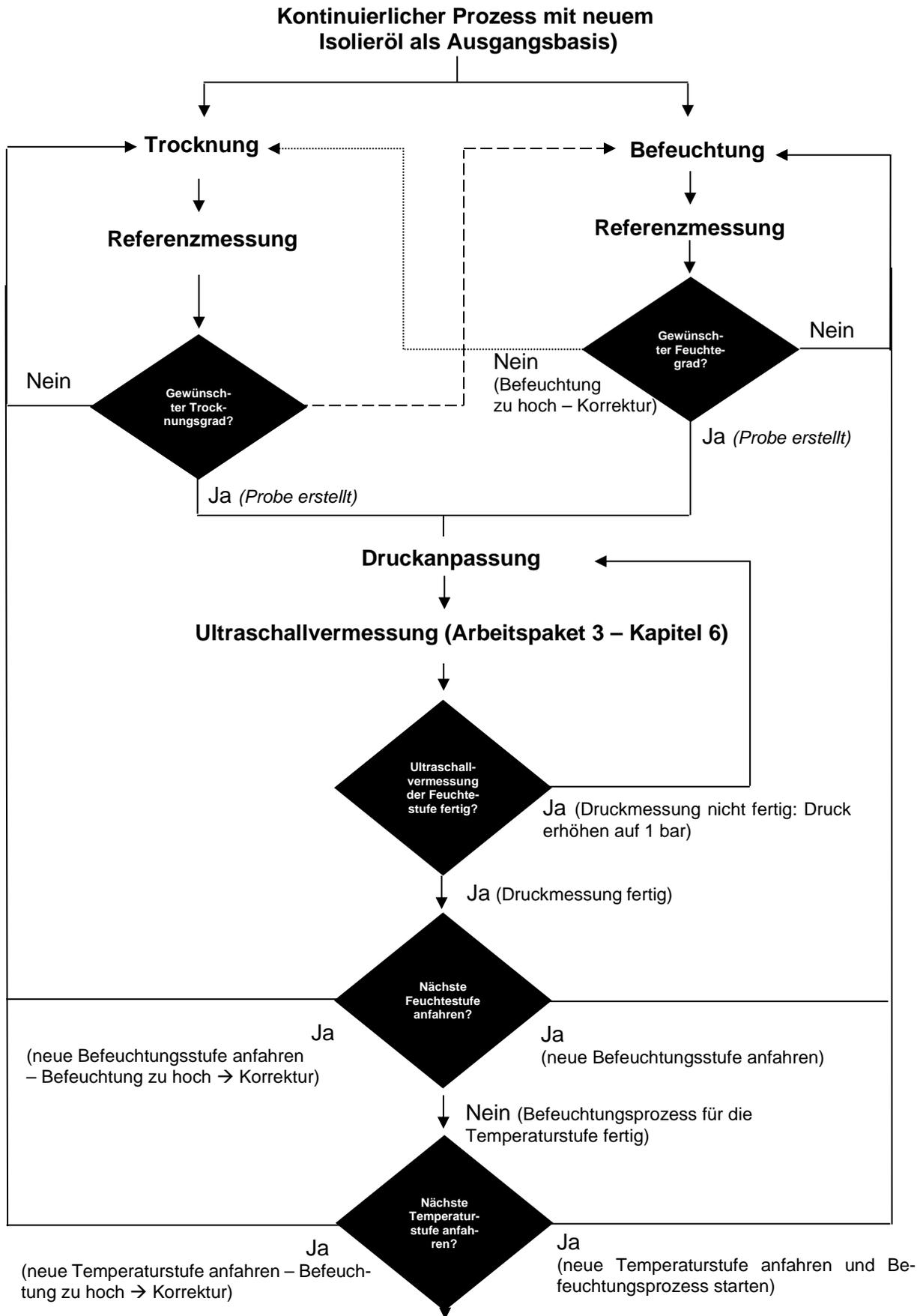


Abbildung 45: Vorgehensweise bei der Probenherstellung von Isolierölproben mit definierter Feuchte; Referenzmessung beinhaltet die Messung der absoluten Feuchte (mit KFT - *Abbildung 15*) die relative Feuchte (mit Sensor - *Abbildung 14*), der Temperatur (*Abbildung 10* und *Abbildung 14*) und des Drucks (*Abbildung 11*)

Ergebnisse realisierte Feuchtegrade

Es wurden 6 Messreihen für die Ultraschallvermessung hergestellt. Jede Messreihe bedeutet eine Temperaturstufe (*Abbildung 39*). In jeder Temperaturstufe wurden sechs unterschiedliche Feuchtegrade erstellt (*Abbildung 46*). Die Messung der absoluten Feuchtwerte erfolgt vor dem Start der Ultraschallvermessung, nachdem die Zielwerte der Feuchte und der Temperaturstufe erreicht sind. Die Zielwerte der absoluten Feuchte gemessen mit KFT, sind im Nachfolgendem dargestellt. Es wurden drei bis vier Messungen wiederholt und der Mittelwert gebildet. Der Toleranzbereich liegt bei +/- 2 ppm:

- Messreihe 1 → 3 ppm
- Messreihe 2 → 11 ppm
- Messreihe 3 → 16 ppm
- Messreihe 4 → 21 ppm
- Messreihe 5 → 26 ppm
- Messreihe 6 → 35 ppm

Während der Messung wurde die relative Feuchte für jeden Ultraschallprüfkopf kontinuierlich erfasst. Dadurch kann auch die errechnete absolute Feuchte mit Hilfe der aufgezeichneten Temperatur und den Konstanten A und B mittels folgender Formel berechnet werden:

$$F_{\text{ppm}} = F_{\%} / 100 * (10^{(A/(T+273,15)+B)})$$

Die Konstanten A und B sind aus der Cigre Broschüre [Cig18] für das Nynas Nytro Taurus entnommen und gemittelt. In nachfolgendem sind beispielhaft die realisierten Feuchtwerte für den 2 MHz Ultraschallprüfkopf ohne Zirkulation dargestellt.

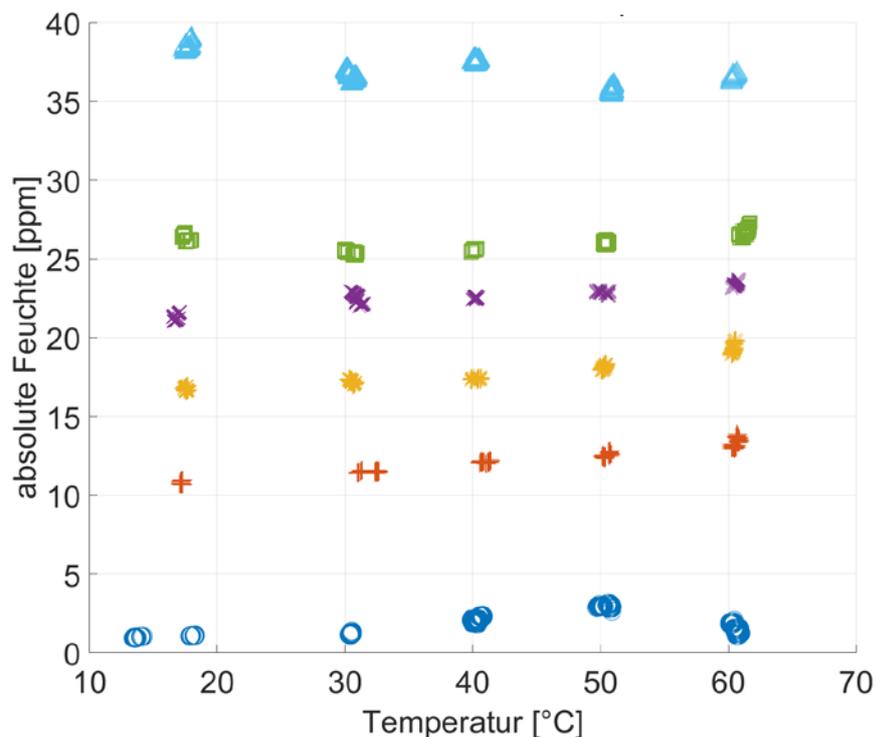


Abbildung 46: Realisierte Feuchtwerte des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes ohne Zirkulation für die Ultraschallvermessung (berechnete ppm Werte)

Die gemessenen relativen Feuchtwerte sind in der *Abbildung 47* dargestellt.

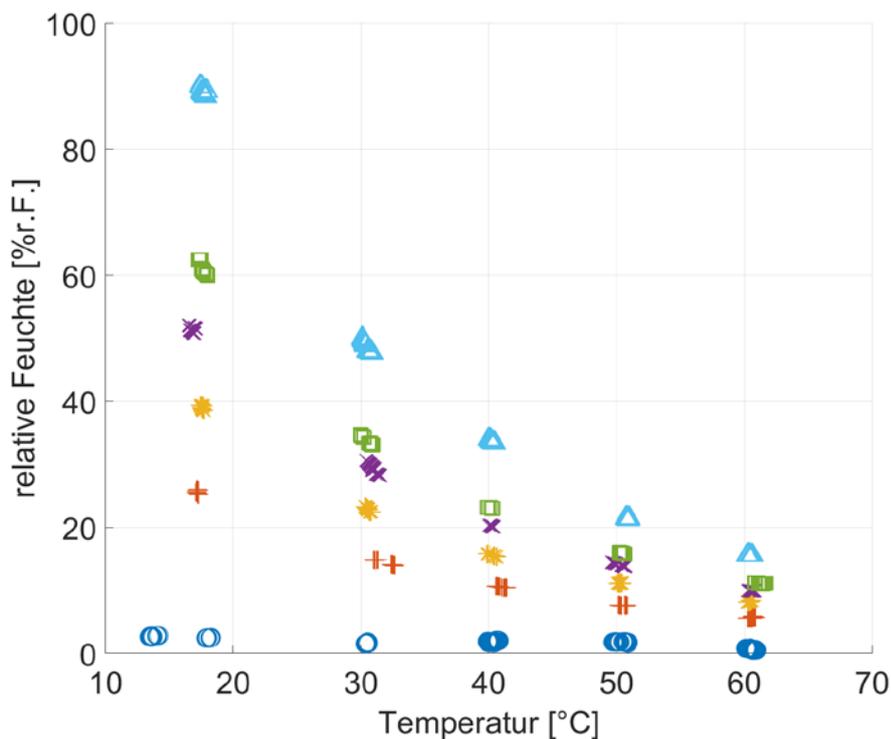


Abbildung 47: Realisierte Feuchtwerte des 2 MHz Ultraschallprüfkopfes für die Ultraschallvermessung (gemessene relative Feuchtwerte)

In der Legende bei der Darstellung der Ergebnisse dieser Feuchteuntersuchung sind die Messreihen 1 bis 6 dargestellt. Die Ergebnisse der Durchschlagsspannung sind in Tabelle 4 festgehalten. Referenziert wurde die Messreihe bei Raumtemperatur (*Abbildung 46*).

Tabelle 4: Ergebnisse der Referenzmessung

Durchschlagsspannung – Mittelwert aus 6 Messung in [kV] IEC 60475:2011		
Messreihe	Durchschlagsspannung [kV]	Absolute Feuchte gemessen KFT / berechnet [ppm]
1	>75	3,58 / 3
2	>75	10,67 / 11
3	61,6	15,09 / 15
4	39,4	22,09 / 21
5	33,1 / 36,9	26 / 26
6	16,2	34,56 / 37

Die Ergebnisse der Säuremessung sind in Tabelle 4 festgehalten. Referenziert wurde die Messreihe bei Raumtemperatur (*Abbildung 46*).

Tabelle 5: Ergebnisse Säuremessung nach der Feuchteuntersuchung

Säuregehalt gemessen mit Säuretitorator in [mg KOH/g Öl] IEC 6021-1:2003	
Messung 1	0,00
Messung 2	0,01
Messung 3	0,00
Messung 4	0,01

Nachfolgend ein exemplarisches Ergebnis der GC Messung einer frischen Isolierölprobe.

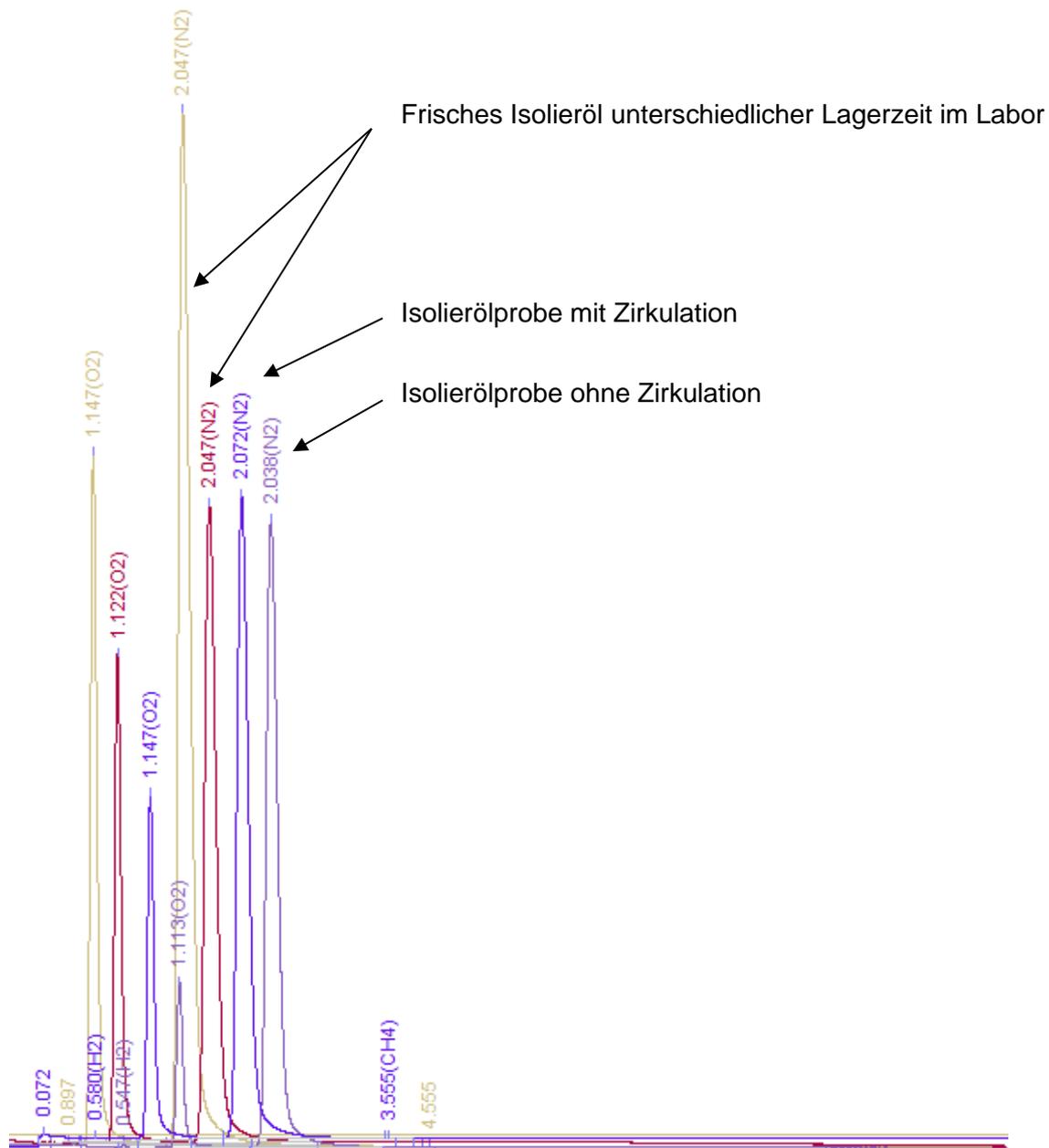


Abbildung 48: Auszug GC-Messung von 4 Isolierölproben

Der Herstellungsprozess ist sehr zeitintensiv und erfordert präzises Arbeiten unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussmöglichkeiten auf die Herstellung einer definierten Feuchtegradprobe sowie in unmittelbarem Anschluss die Messung mittels Ultraschall in einem

kontinuierlichen Prozess. Das Resultat bildet die Grundlage für die Herstellung und Messung definierter Isolierölproben in dieser Arbeit.

Die Untersuchungen der Feuchte im Isolieröl inklusive des Herstellungsprozesses sind der Fokus dieser Arbeit. Zusätzliche Abhängigkeiten von Gas, Säure und Feststoff, werden in einem reduzierten Umfang mitbetrachtet (Kapitel 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3). Die Herstellung von gezielten und reinen Proben für diese Untersuchungen ist sehr umfangreich und komplex, sodass eine Beschränkung der Betrachtungen erfolgen musste, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen und um den Fokus der Feuchtebetrachtung im ausreichenden Maß untersuchen zu können.

5.3 Probenherstellung zusätzlicher Abhängigkeiten

5.3.1 Gas

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung des Herstellungsprozesses für die Untersuchungen mit Gas in Ölproben vorgestellt.

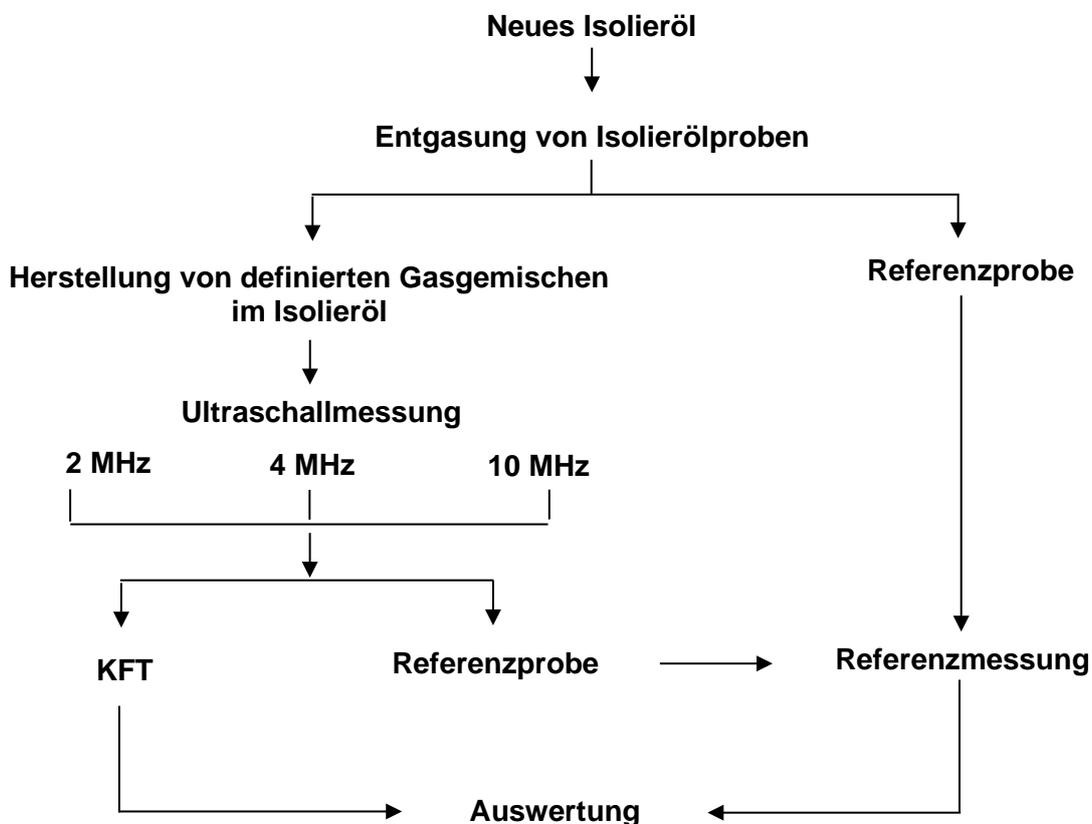


Abbildung 49: Vorgehen Probenherstellung Gas

Auf folgende Punkte wird näher eingegangen:

- Entgasung von Isolierölproben
- Herstellung von definierten Gasgemischen im Isolieröl
- Einbringen des Öls in das Prüfgefäß zwecks Ultraschallmessung
- Referenzmessung

Entgasung von Isolierölproben

Um die Gas-Öl-Gemische mithilfe von Ultraschall zu untersuchen, ist vor allem ein sauberes entgastetes Isolier-Öl für die Herstellung notwendig. In dieser Arbeit wird die Entgasungsmethode der Vakuumextraktion nach IEC 60507 eingesetzt.



Abbildung 50: Realisierung eines Entgasungssystems (links) mit Vakuumfalle (Mitte/rechts)

Wie in *Abbildung 50* dargestellt, besteht das Vakuumextraktionssystem aus einer Vakuumkammer, einer Vakuumpumpe und einem Argondruckbehälter. Die Vakuumkammer wird über Schläuche und zwei Ventile mit der Pumpe und der Argondruckbehälter verbunden. Durch die Ventile werden die Schlauchkanäle geregelt. Für die erfolgreiche Vakuumextraktion des Isolieröls ist eine geeignete Pumpe erforderlich. Nach IEC 60567 ist bei der Entgasung ein Vakuum in der Vakuumkammer bis zu 1 Pa zu erzeugen. Zur Erzeugung des Vakuums wird eine zweistufige ölgedichtete Drehschieber-Vakuumpumpe TRIVAC D16A von der Firma Leybold eingesetzt.

Herstellung von definierten Gasanteilen im Isolieröl

Das Öl wird nach der Vakuumextraktion in 500 ml Großspritzen für die Herstellungen von Gas-Öl-Gemischen übertragen. Die entwickelte Anordnung sorgt für einen bläschenlosen und luftfreien Übertragungsprozess.

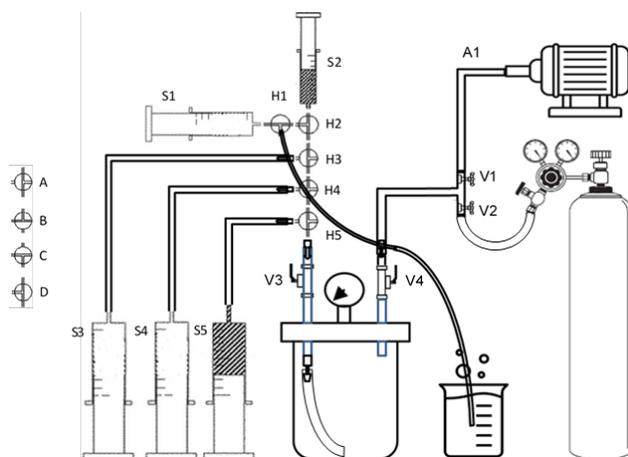


Abbildung 51: Gesamtaufbau der Isolierölentnahme mit Vakuumkammer (Entgasung)

In *Abbildung 51* ist die schematische Darstellung für den ersten Schritt der Probenherstellung dargestellt (Anordnung zur Übertragung der Ölproben-Entgasung). Die Gasuntersuchung mit Isolieröl ist gegen äußere Umgebungseinflüssen (Luftbläschen) sehr sensibel. Diese können sich sehr schnell in der entgasten Isolierölprobe lösen und verfälschen die gesamte Probe. Die Vorgehensweise ist nachstehend erläutert:

Nach der Vakuumextraktion entsteht ein Vakuum in der Kammer um ca. 1 Pa. Für die Entnahme vom entgasten Öl aus der Vakuumkammer wird diese bis zu 0,95 bar mit Argon gefüllt (ermittelt durch Vorversuche), um eine luftfreie Umgebungsbedingung zu schaffen. Als erstes werden die Schläuche durch Argon gespült, damit keine Luft in den Schläuchen verbleibt. Dafür wird Schlauch A1 von der Pumpe abgenommen, und die Ventile V1 und V2 geöffnet. Die Luft in den Schläuchen wird durch Argon von Schlauch A1 ausgespült. Danach wird das Ventil V4 vorsichtig geöffnet, damit das Argon in die Vakuumkammer fließen kann. Dabei muss beachtet werden, dass das Ventil V4 nicht komplett geöffnet ist. Als nächstes werden alle Ventile geschlossen und Schlauch A1 wird wieder mit der Pumpe verbunden.

Nachdem die Kammer mit Argon bis zu 0,95 bar gefüllt ist, sind die Dreiwegehähne H1, H3, H4, H5 auf Position A und der Dreiwegehahn H2 auf Position D gedreht. Das Ventil V3 wird geöffnet. Die 100 ml Glasspritze S1 wird aufgezogen, damit die Umgebungsverunreinigungen in den Dreiwegehähnen von der Spritze S1 aufgenommen werden können. Dann wird der Dreiwegehahn H1 auf Position B gedreht und die Stoffe in Spritze S1 durch den Schlauch in den Abfallbehälter gedrückt. Am Ende wird ca. 10 ml entgastes Öl in die Spritze S1 aufgezogen und das Ventil V3 geschlossen.

Obwohl die gasdichte Spritze S2 vorher gesäubert wurde, können sich im inneren noch Verunreinigungen (Luft) befinden. Deswegen wird die 100 ml gasdichte Spritze S2 mit dem entgasten Öl gespült. Die Hähne H1 und H2 werden auf Position A und B gedreht. Anschließend wird ein Öl von der Spritze S1 in die gasdichte Spritze S2 befördert. Der Kolben der gasdichten Spritze wird zügig geschlossen, damit Luft und Öl in der gasdichten Spritze rausgedrückt werden können. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich keine Luft mehr in der gasdichten Spritze befindet. Das Ventil wird danach geöffnet und 100 ml entgastes Öl mit der gasdichten Spritze eingezogen. Zu beachten ist, dass bei einem zu schnellen Aufziehen des Kolbens, die Spritze undicht wird und Luft entlang des Kolbens in die Spritze gelangen kann. Das Ventil V3 soll nach dem Aufziehen immer geschlossen werden.

Für die Ultraschallmessung werden ca. 1,35 Liter Ölprobe benötigt. Dafür werden 3 Spritzen mit ca. 500 ml Größe für die Probenherstellung benötigt. Die großen 500 ml Spritzen S3, S4 und S5 werden vor der Benutzung mit entgastem Öl gespült. Der Vorgang wird im Nachfolgenden am Beispiel der Spritze S3 erläutert. Die Dreiwegehähne H1, H2, H3, H4 und H5 sind auf Position C, A, B, A und A gedreht. Ungefähr 50 ml Öl im gasdichte Spritze S2 wird in die Spritze S3 befördert. In der oberen Hälfte der Spritze S3 sammelt sich Luft. Der Dreiwegehahn H2 wird auf Position C gedreht. Spritze S3 wird gedrückt, sodass die Luft vom System befördert werden kann. Danach wird der Hahn H2 auf Position A gedreht und das Öl in der gasdichten Spritze in die große Spritze S3 befördert. Wenn die Spritze S2 leer ist, wird das Ventil V3 geöffnet und mit 100 ml entgastes Öl wieder gefüllt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die große Spritze S3 mit 450 ml Öl gefüllt ist. Schließlich wird der Hahn H3 auf Position A gedreht. Der gleiche Übertragungsprozess wird für alle drei 500 ml Spritzen durchgeführt. Eine entgaste Isolierölprobe wird nach dem Prozess durch die gasdichte Spritze aus der Kammer gezogen (Referenzmessung).

In *Abbildung 52* ist der zweite Schritt der Probenherstellung dargestellt (Gaseinbringvorgang). Vorgehensweise:

Eine 500 ml Spritze S1 mit einem Dreiwegehahn H1 ist durch den Dreiwegehahn H2 mit einer 100 ml Spritze und einem Gasbehälter verbunden. Zuerst werden die Hähne H1 und H2 auf Position A gedreht. Das Ventil der Gasflasche wird geöffnet, sodass die Spritze S2 mit dem Gas gefüllt wird. Danach wird der Hahn H1 auf Position B gedreht und das Gas in Spritze S2 aus dem System befördert. Dieser Prozess wird mindestens 3x wiederholt, damit die Luft im System durch das Gas komplett herausbefördert werden kann. Die Spritze S2 wird mit dem Gas gefüllt. Die Hähne H1 und H2 werden auf Position C und B gedreht. Die Gasflasche wird so lange geöffnet, bis das Gasvolumen in der Spritze S1 < 50 ml ist. Danach wird das Gasvolumen in der Spritze S1 durch das vorhandene Gas in S2 auf genau 50 ml eingestellt. Dadurch ist ein feinerer Gasabgleich gewährleistet und somit eine präzisere Steuerung des Gasvolumens.

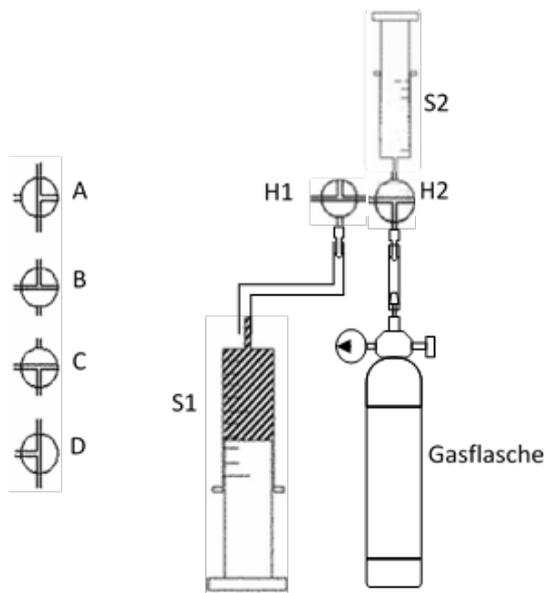


Abbildung 52: Gaseinbringvorgang mit Schema (links)

Nach Befüllen der Spritzen mit unterschiedlichen Gas-Öl-Gemischen wird das Gas mittels eines Rüttelprozesses im Öl gelöst (*Abbildung 53*).



Abbildung 53: Aufbau Rüttler

Referenzmessung

Nach dem Vakuumextraktionsverfahren und der Ultraschallmessung wird die Referenzmessung für die Isolierölproben durchgeführt. Isolierölproben wurden für die Referenzmessung im 100ml Spritzen gespeichert. Die Referenzmessung basiert auf dem Headspace-Verfahren [Ene20]. Im nachfolgendem wird die Vorgehensweise bei der Herstellung der Referenzprobe erläutert. Zunächst wird das Öl aus den 100 ml Spritzen in 50 ml DGA Spritzen übertragen. Die Probenentnahme ist in *Abbildung 54* dargestellt. Die Spritze S1 ist eine 100 ml Spritze, S2 ist eine 50 ml DGA Spritze und S3 eine 5 ml Spritze (*Abbildung 54*). Der Hahn H1 und H2 werden zuerst auf Position C gedreht. 10 ml Öl wird von der Spritze S1 in die Spritze S2 befördert, um den Dreiwegehahn H2 zu spülen. Die Luft und andere Verunreinigungen werden in der Spritze S2 gesammelt. Der Hahn H2 wird auf Position B gedreht und die Verunreinigungen in die 5 ml Spritze S3 befördert. Danach werden die Luft und andere Verunreinigungen in die Spritze S3 befördert. Der Hahn H1 und H2 werden auf Position C und A gedreht. 5ml Öl wird aus der Spritze S1 in die Spritze S3 gedrückt. Der Hahn H2 wird auf Position C gedreht. Die Spritze S2 wird durch S1 mit Öl bis ca. 30 ml gefüllt. Am Ende werden die Hähne H1 und H2 auf Position B gedreht.

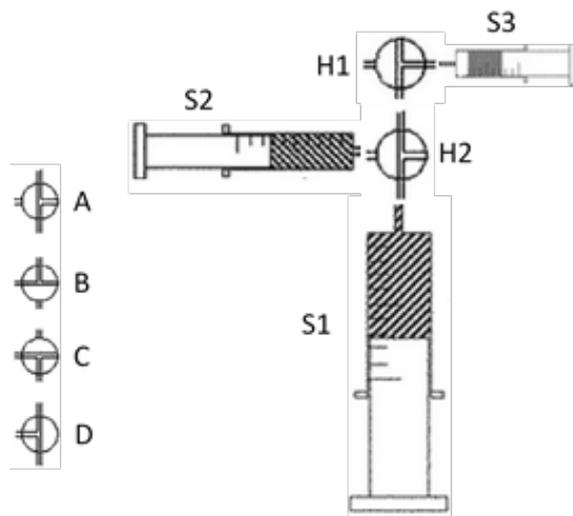


Abbildung 54: Probenentnahme für die Referenzmessungen

Der Gaseinbringvorgang ist in *Abbildung 55* dargestellt. Um das Gas im Öl zu untersuchen, wird zuerst ein Referenzgas (Methan/Argon) in die Spritze injiziert, um eine Gasphase in der Spritze zu erzeugen. Im Folgenden wird der Vorgang erläutert. Die Spritze S2 ist eine 5 ml Glasspritze. S1 ist eine 50 ml DGA Spritze. Zunächst wird die Spritze S2 mit Gas gespült. Der Hahn H1 und H2 werden auf Position C und A gedreht. Die Spritze S2 wird mit dem Gas aus der Flasche gefüllt. Der Hahn H2 wird auf Position B gedreht und das Gas durch H1 und H2 befördert. Die Spülung wird mindestens drei Mal wiederholt. Nach der Spülung werden die Hähne H1 und H2 auf Position A und C gedreht. Die Gasflasche wird geöffnet und die Spritze S1 wird mit ca. 20 ml Gas gefüllt. Danach wird der Hahn H2 auf Position B gedreht. Das Gasvolumen in der Spritze S1 wird durch den Ausgleich aus der Spritze 2 hergestellt. Dabei werden ca. 50 ml Gesamtvolumen (Gas + Öl) in die Spritze S1 eingebracht. Das Verhältnis 20/30 (Gas/Öl) basiert auf Erfahrungswerten.

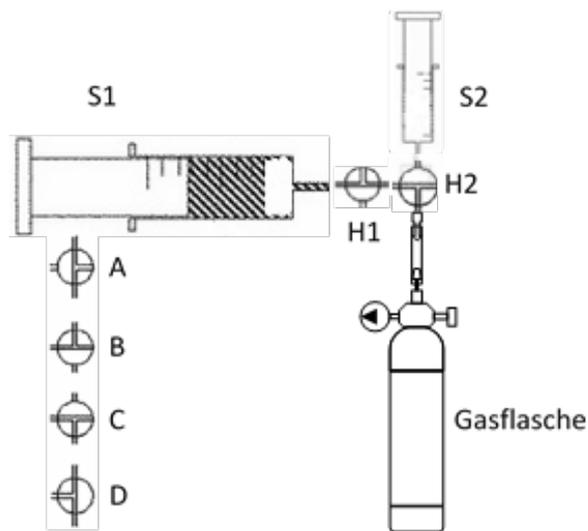


Abbildung 55: Gaseinbringvorgang

Anschließend wird die Probe in der Spritze bei Raumtemperatur einem Rüttelprozess (*Abbildung 53*) unterworfen. Dadurch wird ein Gleichgewicht in der Spritze hergestellt. Die gelösten Gase aus der Gasphase werden in einem GC gemessen. Das gelöste Gas in Öl wird mittels Ostwald-Koeffizient aus der GC-Messung berechnet. Das gelöste Gas aus der Gasphase (Spritze S1 nach dem Rüttelprozess) wird mit einer 1 ml Spritze entnommen. Die 1ml Spritze wird zwei bis drei Mal mit dem Gas in der 50 ml Spritze gespült. Danach wird die Spritze mit dem Gas gefüllt. Um einen Luftkontakt zu vermeiden, wird die Nadelspitze nach der Spülung mit einer Gummidichtung versehen. Das Gas aus der 1 ml Spritze wird im Anschluss in den GC injiziert. Das Gasvolumen in Isolierölproben ist die Addition des Gasvolumens der Gasphase und der Flüssigphase der Referenzisolierölprobe. Das Gasvolumen der Gasphase in der Referenzisolierölprobe wird mit den gemessenen GC-Werten und dem Volumen der Gasphase berechnet. Das Gasvolumen der Flüssigphase in der Referenzisolierölprobe wird mit Ostwald-Koeffizient und den GC-Werten berechnet. Die Gaskonzentration in Isolierölproben wird mit dem Gasvolumen und Ölvolumen berechnet. Durch die Formel ist die Gaskonzentration in Isolierölprobe zu berechnen:

$$C_{\text{gas in Ölprobe}} = \frac{C_{GC} \times E_i \times V_{\text{Flüssigphase}} + C_{GC} \times V_{\text{Gasphase}}}{V_{\text{Flüssigphase}}} \quad (5.1)$$

, wobei E_i für die Ostwald-Koeffizient steht.

In *Abbildung 56* sind die verwendeten Gase dargestellt.

- C₂H₄ - Ethylen
- CH₄ - Methan
- CO₂ - Kohlendioxid
- H₂ - Wasserstoff
- N₂ - Stickstoff
- O₂ - Sauerstoff



Abbildung 56: Verwendete Gase (vgl. Tabelle 4)

In der nachfolgenden Abbildung ist exemplarisch ein Ergebnis der GC-Messung nach der Probenherstellung mit Wasserstoff dargestellt.

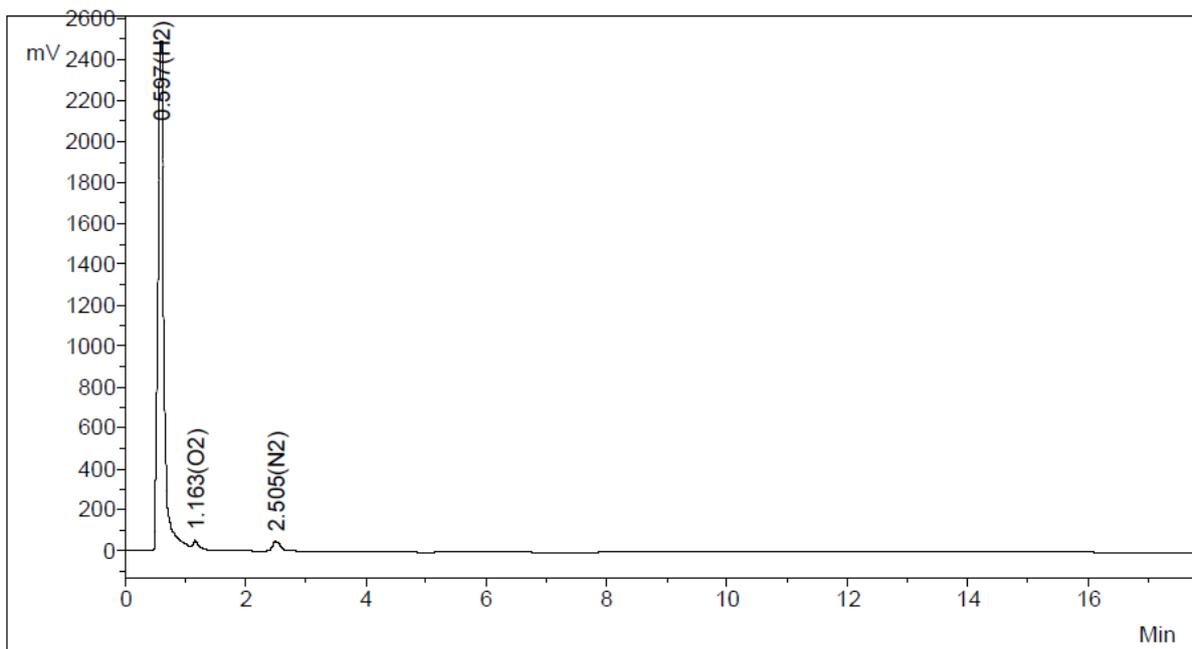


Abbildung 57: Auszug GC-Messung bei Probenherstellung mit Wasserstoff

Die Ergebnisse der Probenherstellung sind in der nachfolgenden Tabelle festgehalten.

Tabelle 6: *Hergestellte Isolierölproben mit bestimmter Gaskonzentration mit der Referenzmessung*

Isolierölproben	Gasvolumen (ml)	Ölvolumen (ml)	Konzentration (ppm)	Referenzmessung (Mittelwert)			KFT (Mittelwert) (ppm)
				N ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	Gasprobe (ppm)	
Entgaste Isolierölprobe - 1	0	1500	0	15301	6973	—	12,02
C ₂ H ₄	150	1350	111111	21799	10965	338326	22,86
CH ₄	160	1340	119403	—	14785	101688	17,98
CO ₂	150	1350	111111	75573	28640	93658	29,88
H ₂	150	1340	111940	53606	55771	39335	21,65
N ₂	150	1350	111111	103692	18608	—	13,88
O ₂	150	1315	114068	33875	92023	—	18,685

Für die Verifikation der Daten sind weitere Messreihen geplant.

Ultraschallmessung

Vor dem Start der Ultraschallmessung wird die Isolierölprobe von der 500 ml Spritzen in das Prüfgefäß umgefüllt. Dieser Vorgang wird in der *Abbildung 58* gezeigt.

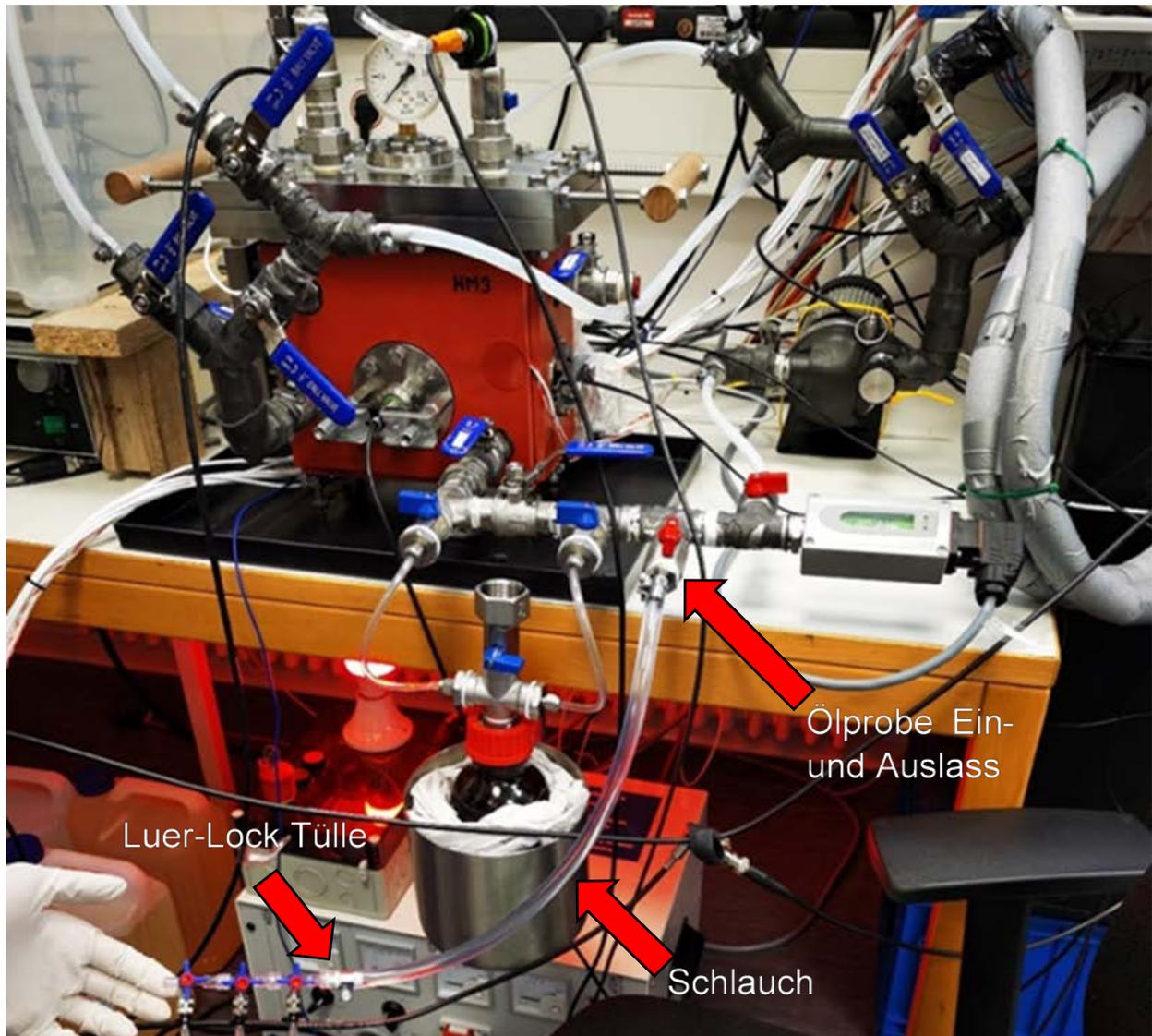


Abbildung 58: Einbringvorgang von Isolierölproben mit definiertem Gasgehalt in das Prüfgefäß für die Ultraschalluntersuchung

Die Spritzen sind durch Luer-Lock-Tülle und einem Schlauch direkt mit dem Prüfgefäß verbunden. Mit der Luer-Lock-Tülle ist eine saubere Handhabung des Überführungsprozesses möglich. Die Isolierölprobe wird durch gleichmäßige Druckausübung ins Prüfgefäß eingefüllt. Die Ultraschallvermessung erfolgte wie in Kapitel 4.5 beschrieben nach dem Impuls Echo Prinzip. Die Ergebnisse werden in AP 3, Kapitel 6 vorgestellt.

5.3.2 Säure

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung eines Herstellungsprozesses für die Untersuchungen von Isolierölproben mit Säuregehalt vorgestellt.

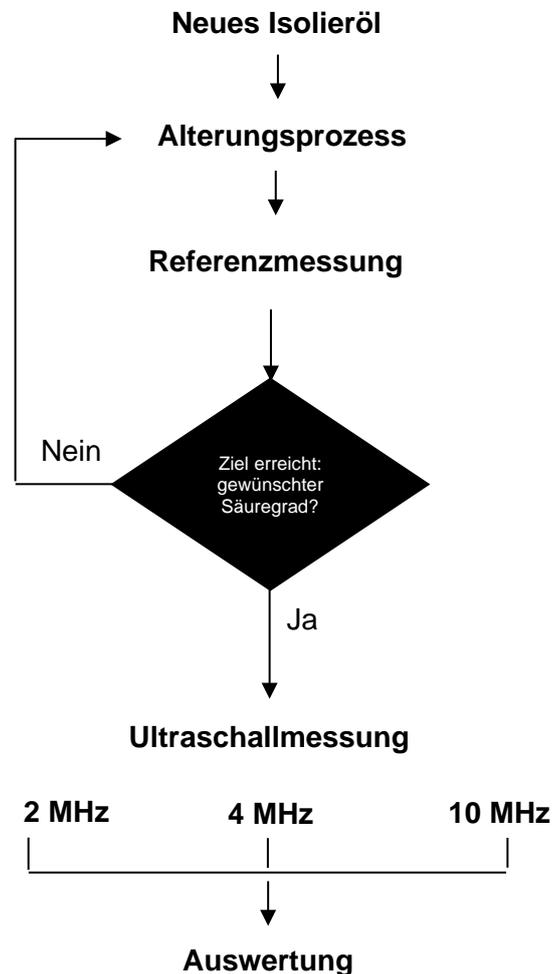


Abbildung 59: Vorgehen Probenherstellung Säure

Im Folgenden wird auf das Vorgehen eingegangen. Die relevanten Schritte unterteilen sich in:

- Ausgangsbasis
- Alterungsprozess
- Referenzmessung
- Ultraschallmessung

Ausgangsbasis

Durch verschiedene Materialien, welche aufgrund von Alterungsprozessen zur Säurebildung führen können, wird das Isolieröl einer Alterung ausgesetzt. Das Ziel ist, im Vergleich zu einem neuen Isolieröl (ca. 0,05 mg KOH/g [Kos09]), drei unterschiedliche Alterungsstufen der Proben zu erhalten (im Bereich 0,1 - 0,15 mg, KOH/g, 0,2 - 0,25 mg KOH/g und > 0,3 mg KOH/g). Stark gealterte Isolieröle haben einen Säuregehalt von ca. >0,2 mg/KOH/g [Kos09]. *Abbildung 60* zeigt die vorbereiteten Probenbehälter in Borosilikatgläsern.



Abbildung 60: Probenherstellung für die Säure im Isolieröl

Alterungsprozess

Um unterschiedliche Säuregrade zu erreichen, wird das Isolieröl in einem Borosilikatglas bei 110°C zusammen mit Papier und Kupfer gelagert. In der nachfolgenden Abbildung sind die Borosilikatgläser, gefüllt mit Isolieröl, in einem Ofen dargestellt. Die Alterung erfolgte über mehrere Monate.



Abbildung 61: Alterung von Isolierölproben im Ofen bei 110 °C

Referenzmessung

In definierten regelmäßigen Abständen werden die einzelnen Proben einer Referenzmessung unterzogen um den aktuellen Säuregehalt zu ermitteln. Die Proben werden kurzzeitig mit einem Magnetrührer umgewälzt und im Anschluss mittels eines Säuretitrators (*Abbildung 16*) nach IEC 62021-1:2003 gemessen. Die Referenzmessungen wurden bis zu Erreichung befriedigender Säurewerte in den Proben regelmäßig wiederholt. Zusätzlich wurde die absolute Feuchte der Probe mittels KFT (*Abbildung 15* mit Ofen) festgehalten und im Anschluss an die Ultraschallvermessung die Durchschlagsspannung nach IEC 60475:2011 (*Abbildung 16*) gemessen. In der nachfolgenden

Tabelle 7 werden die einzelnen Referenzwerte dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Referenzmessungen

Säuregehalt gemessen mit Säuretitrator in [mg KOH/g Öl] IEC 6021-1:2003			
Messreihe	1	2	3
Säurestufe 0 (neues Isolieröl)	0,00	0,00	0,01
Säurestufe 1	0,16	0,14	0,18
Säurestufe 2	0,22	0,24	0,21
Säurestufe 3	0,58	0,40	0,40
Absolute Feuchte gemessen mit KFT in [ppm] (gemessen mit KF THERMOPREP 860 zur thermischen Probenvorbereitung für die Karl-Fischer-Titration)			
Säurestufe 1	2		
Säurestufe 2	4		
Säurestufe 2	1		
Durchschlagsspannung – Mittelwert aus 6 Messung in [kV] IEC 60475:2011			
Säurestufe 1	45,4		
Säurestufe 2	45,4		
Säurestufe 2	43,8		

Ultraschallmessung

Die Ultraschallvermessung der erfolgreich gealterten Ölprobe erfolgte im Prüfgefäß 1. Die Isolierölprobe wurde in das Prüfgefäß eingebracht und mit den drei verschiedenen Ultraschallfrequenzen 2 MHz, 4 MHz und 10 MHz vermessen. Die Ultraschallvermessung erfolgte wie Kapitel 4.5 beschrieben nach dem Impuls Echo Prinzip. Die Ergebnisse werden in AP 3, Kapitel 6 vorgestellt.

5.3.3 Feststoff im Isolieröl

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung eines Herstellungsprozesses für die Untersuchungen von feuchten Feststoffproben im Isolieröl vorgestellt.

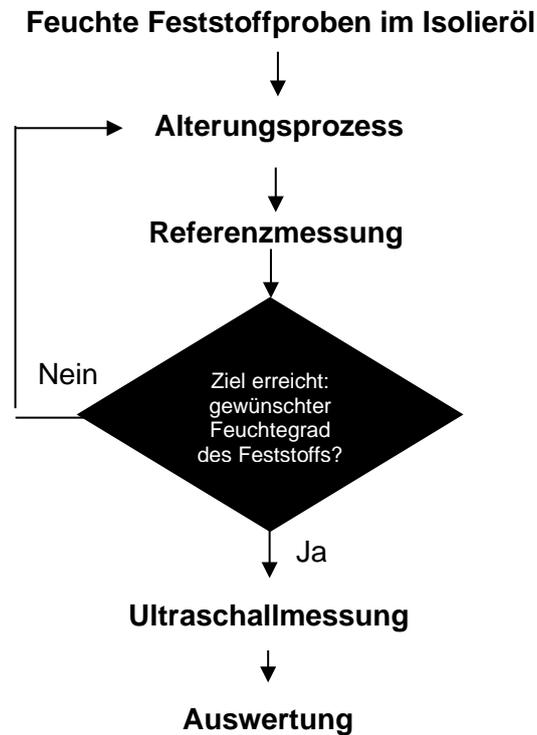


Abbildung 62: Vorgehen Probenherstellung Feuchte im Feststoff

Im Folgenden wird auf das Vorgehen eingegangen. Die relevanten Schritte unterteilen sich in

- Ausgangsbasis
- Alterungsprozess
- Referenzmessung
- Ultraschallmessung

Ausgangsbasis

In den Transformatoren sind verschiedene Feststoffe verbaut, welche unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit feuchten Feststoffproben. Mittels unterschiedlicher Feststoffproben bestimmter Feuchte sollen in einem mit Isolieröl gefüllten Prüfgefäß Ultraschallvermessungen durchgeführt werden. Angepasst auf die Abmessungen im Prüfgefäß wurden 100 x 100 mm große Feststoffplatten vorbereitet. Verschiedene Feststoffproben wurden für die Untersuchung herangezogen:

- PSP 3055 (kalandrierter Standard-Pressspan)
- PSP 3050 (kalandrierter Rollenpressspan naturfarben auf 100% Sulfat-Zellstoffbasis)
- Nomex 410 0,51 mm
- Nomex 410 0,13 mm
- CTU 125 (Cottrell – thermisch verbessertes Papier)
- TRR (Tullis Russel Rotherm)



Abbildung 63: Feststoffproben für den Alterungsprozess (links: Beispiel von PSP-Proben)

Alterungsprozess

Papier und Pressspan können bei Raumtemperatur bereits relativ hohe gebundene Feuchtigkeit aufweisen. Daher müssen die Feststoffproben vor der Messung getrocknet werden, so dass der Feuchtigkeitsgehalt weniger als 0,5 % beträgt. Der Trocknungsprozess erfolgt im Ofen bei 100 °C für 3-4 Stunden.



Abbildung 64: Trocknung (links) und Lagerung (rechts)

Danach werden die Proben in einem mit Isolieröl gefüllten Behälter verschlossen. Der Feuchtegehalt des Isolieröls wurde am Anfang des Prozesses für zwei unterschiedliche Behälter variiert:

- Behälter 1: 10 ppm
- Behälter 2: 40 ppm

Die Behälter sind hermetisch dicht verschlossen und haben eine Öffnung zur Abzapfung von Öl für die Referenzmessung. Die Lagerung erfolgte über mehrere Tage.

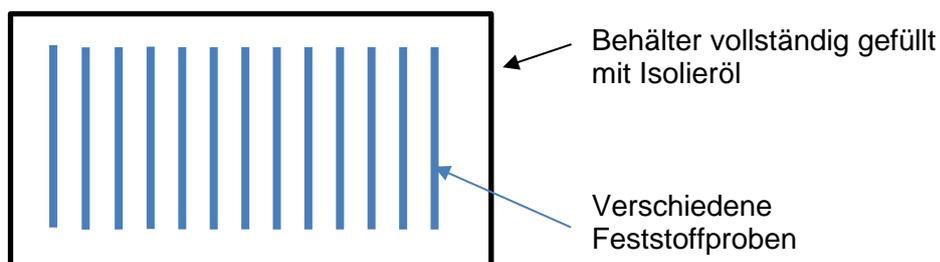


Abbildung 65: Lagerung von Feststoffproben im Isolieröl

Referenzmessung

In *Abbildung 66* und *Abbildung 67* sind Feuchtwerte der Isolierölprobe während der Ultraschallvermessung dargestellt. Die Feuchtwerte der einzelnen Proben müssen noch ausgewertet werden.

Tabelle 8: Ergebnisse der Referenzmessung

Absolute Feuchte gemessen mit KFT in [ppm] (gemessen mit KF THERMOPREP 860 zur thermischen Probenvorbereitung für die Karl-Fischer-Titration)		
Feststoffprobe	Gewicht der Referenzprobe [g]	Prozentualer Unterschied trockene Probe / aktuell gemessen [%]
PSP 3055	0,8425	- (Messung abgebrochen)
PSP 3050	0,7316	0,30 / 3,5
Nomex 410 0,13 mm	0,8371	0,28 / 0,7
Nomex 410 0,51 mm	0,8723	0,3 / 1,04
CTU 125	1,4415	- / 1,3
TRR	1,1747	- / 1,36

Die Feuchtigkeitswerte des Isolieröls im Prüfgefäß während der Messung ist in *Abbildung 66* und *Abbildung 67* dargestellt. Die Messung erfolgte im offenen Prüfgefäß und zeigt eine ansteigende Tendenz der Feuchtwerte aufgrund der erhöhten relativen Feuchte im Labor (Umgebung). Bevor die Messung gestartet wurde, ist eine Trocknungsprozess für das Isolieröl durchgeführt worden. Der Startwert liegt bei ca. 3,5 % rel. Feuchte.

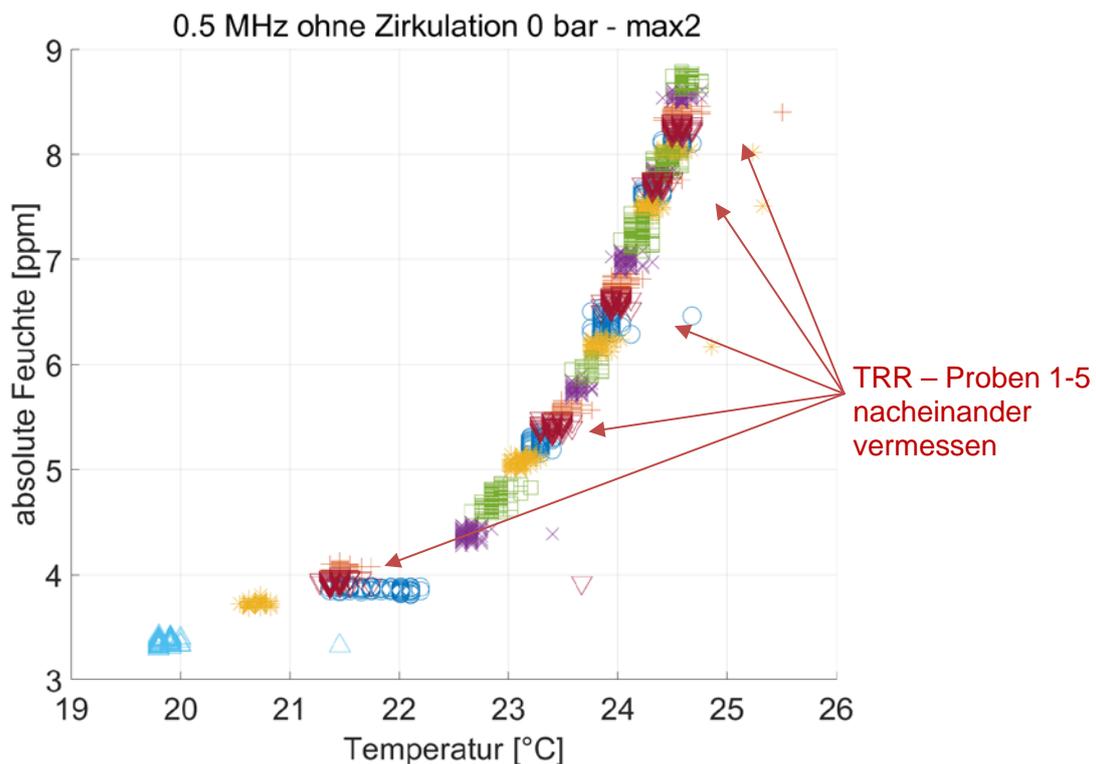


Abbildung 66: Feuchtegehalt des Isolieröls im Prüfgefäß während der Messung (absolute Feuchte in ppm berechnet)

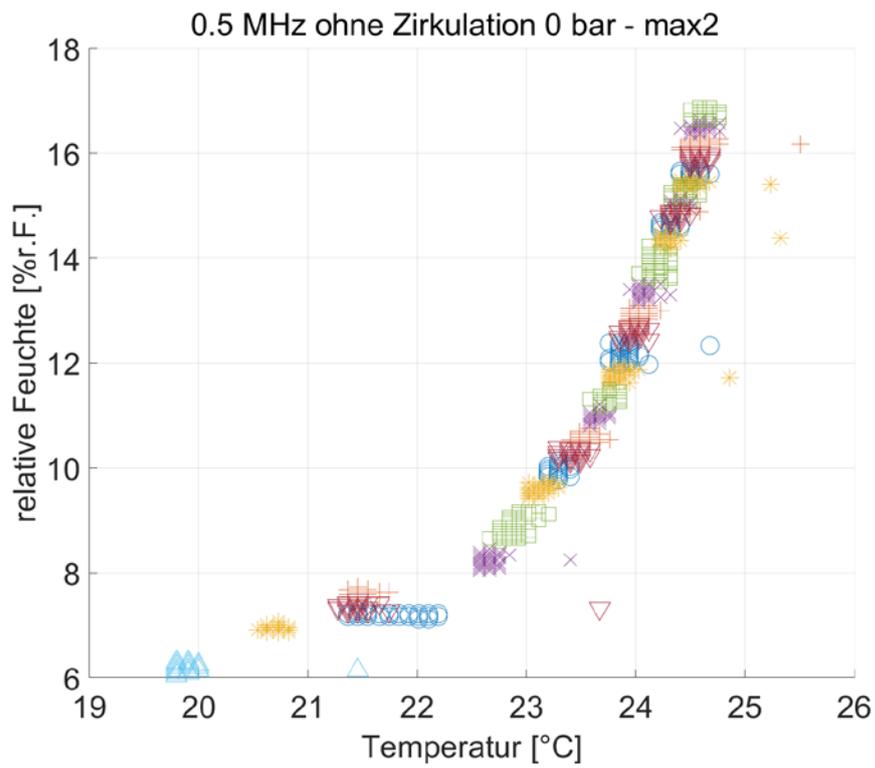


Abbildung 67: Feuchtegehalt des Isolieröls im Prüfgefäß während der Messung (relative Feuchte in %)

Ultraschallmessung

In der ersten Phase wurden einige Feststoffproben mittels Ultraschall vermessen. Die Feststoffproben wurden aus dem Aufbewahrungsbehälter während dem Alterungsprozesses einzeln in das Prüfgefäß eingebracht. *Abbildung 68* rechts zeigt den Aufbau im Labor (ohne Probe und Isolieröl). Die Feststoffproben der einzelnen Typen wurden nacheinander vermessen. Diese Messungen dienen der ersten Orientierung. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Prinzip der Ultraschallmessung mittels Durchschallungsverfahren.

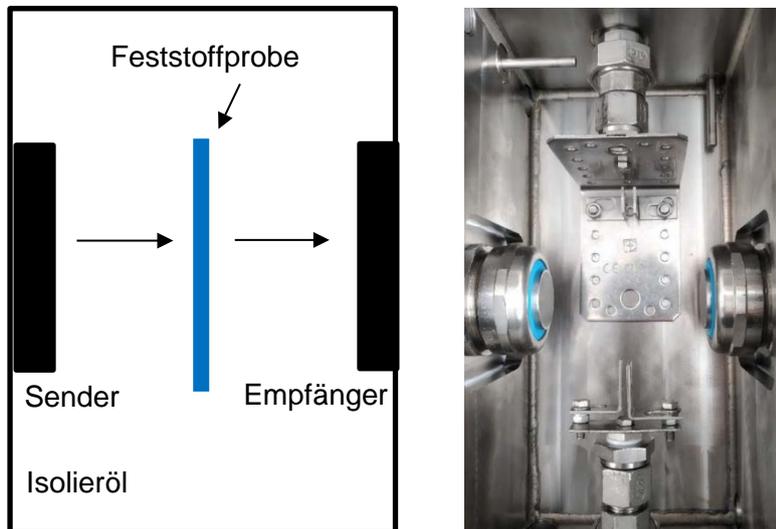


Abbildung 68: Ultraschallmessung nach dem Durchschallungsprinzip (links) und Aufbau im Prüfgefäß 2 ohne Probe

In der *Abbildung 69* ist die Befestigung einer Probe dargestellt. Für die Optimierung kann der Abstand der Ultraschallprüfköpfe durch die integrierten Flansche variiert werden.

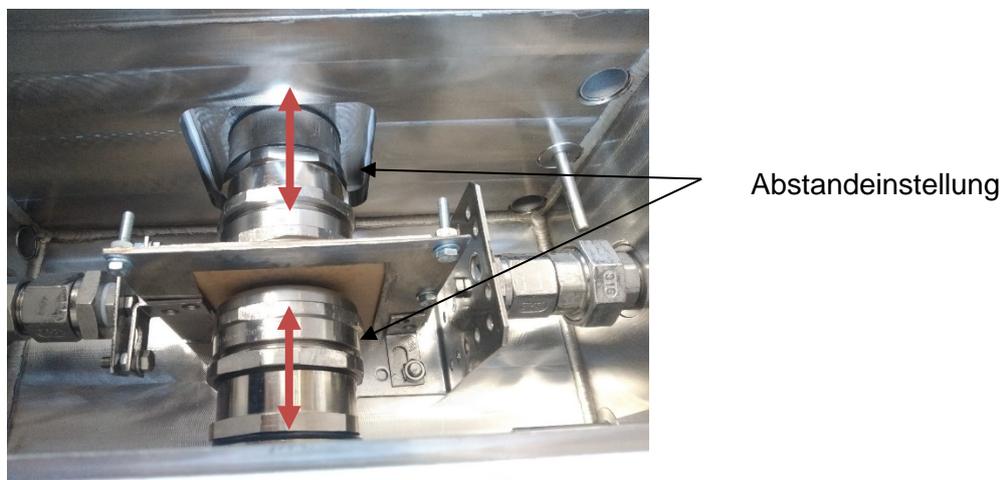


Abbildung 69: Ultraschallmessung nach dem Durchschallungsprinzip mit Probe ohne Isolieröl

Die Ultraschallvermessung erfolgte wie in Kapitel 4.5 beschrieben nach dem Impuls Echo Prinzip. Die Ergebnisse werden in AP 3 Kapitel 6 vorgestellt. Auf eine intensive Untersuchung in dem Bereich der Feststoffuntersuchung im Isolieröl mittels Ultraschall muss auf weitere Forschungsaktivitäten in diesem Bereich verwiesen werden.

6 AP 3: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

Ziel des Arbeitspakets 3 ist die Untersuchung mittels Ultraschall für die im Arbeitspaket 2 vorgestellten Isolierölproben. Folgende Untersuchungen werden nachstehend erläutert:

- Versuchsdurchführung der Ultraschallmessung
- Auswertungsparameter
- Ergebnisse mit Feuchte im Isolieröl
- Ergebnisse zusätzlicher Abhängigkeiten (Gas, Säure und Feststoff)
- Gesamtbeurteilung

6.1 Versuchsdurchführung mit Ultraschallvermessung

Im Nachfolgenden wird das Grundkonzept der Ultraschalluntersuchung dargestellt, auf deren Basis die Untersuchungen durchgeführt wurden

Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen das Konzept und die Realisierung des Gesamtsystems inklusive Isolierölprobenherstellung (Feuchte) und anschließender Ultraschallvermessung. Die Prüfgefäße werden gänzlich mit Isolieröl gefüllt, sodass der verbleibende Gasraum im Prüfgefäß möglichst klein ist und der Einfluss der Luftfeuchte eliminiert wird. Ein Kreislauf mit Umwälzpumpe sorgt für den Austausch zwischen den Konditionierungs- und den Prüfgefäßen. Alle Verbindungsstellen weisen Ventile auf, sodass der Austausch zwischen den Konditionierungs- und Prüfgefäßen manuell geregelt werden kann. Dadurch ergeben sich Einstellmöglichkeiten für flexible oder gar unabhängige Ölprobenkonditionierungen. Des Weiteren kann beim Erreichen des Feuchte-Sollwertes in der Isolierölprobe das Prüfgefäß aus dem Konditionierungskreislauf ausgekoppelt werden, so dass Ultraschallmessungen im zirkulierenden oder ruhendem Isolieröl durchgeführt werden können. Dadurch lässt sich unter anderem der Einfluss von Strömungen auf die Ultraschallmessung eruiieren. Die Konditionierung des restlichen Isolieröls läuft parallel unabhängig weiter, wodurch stabile Feuchtegrade im Öl aufrecht gehalten werden können.

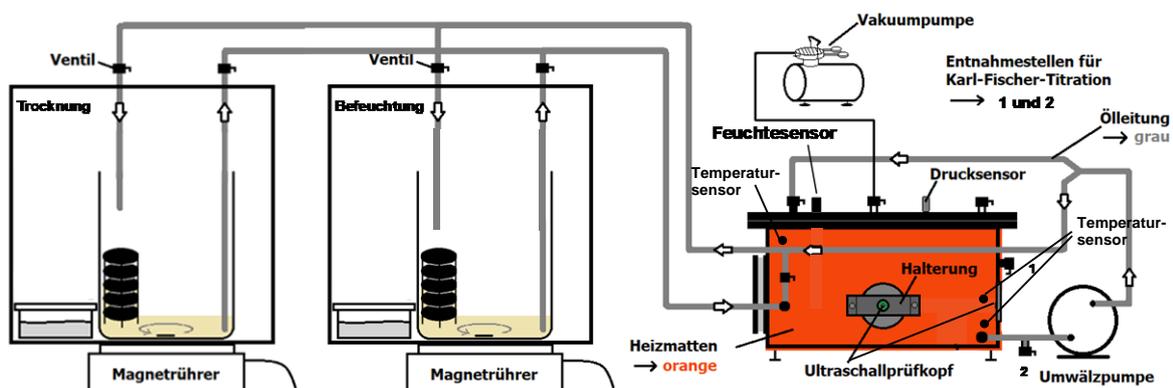


Abbildung 70: Konzept für die Integration des Befeuchtungs- und Trocknungsprozesses in das Gesamtsystem der Feuchtegradrealisierung

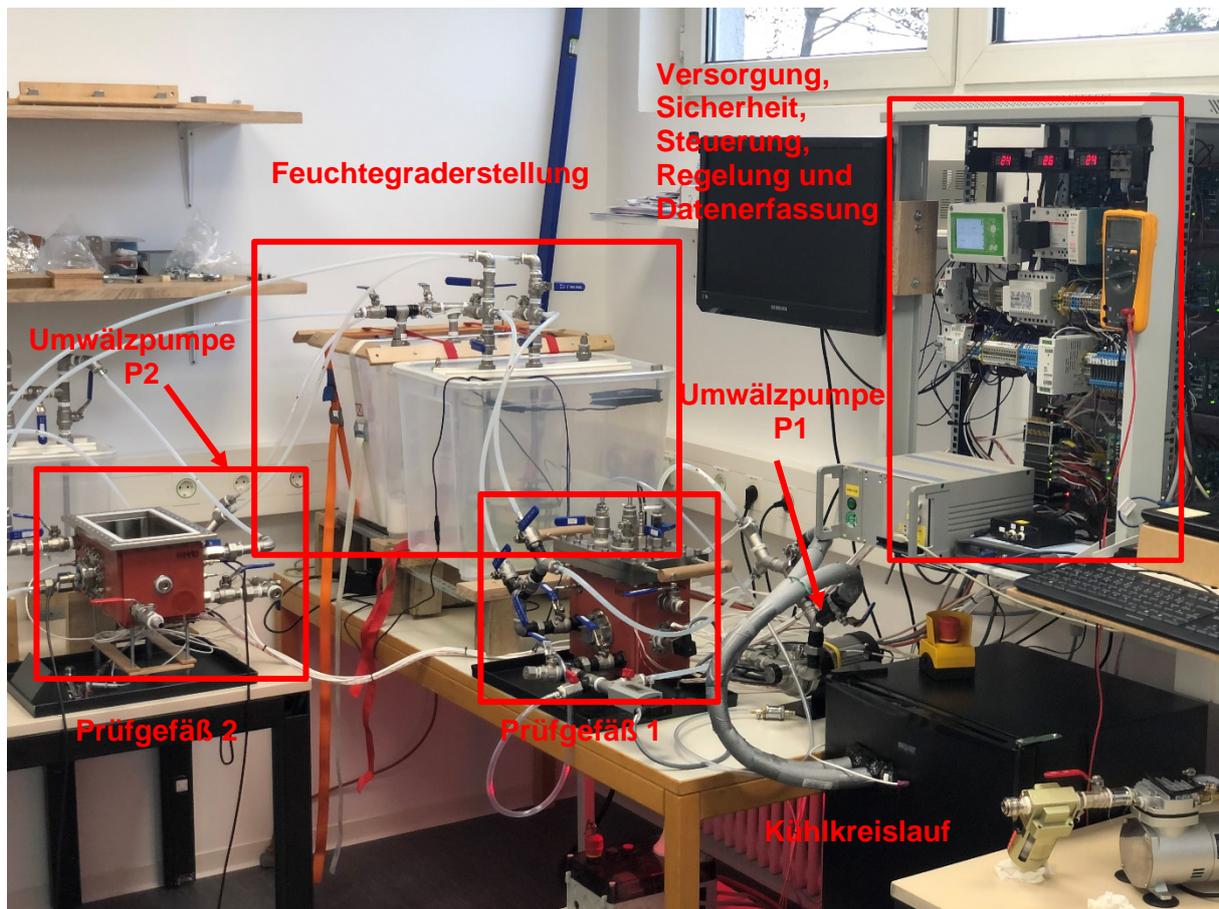


Abbildung 71: Gesamtaufbau im Labor bei der FGH e.V.

Die Dauer der Ultraschallvermessung einer definierten Feuchtestufe war von dem jeweiligen Prozess abhängig und erfolgte unter Berücksichtigung der vorherrschenden Rahmenbedingungen. Um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen, wurden Messungen mit und ohne Veränderung der Rahmenparameter – teilweise einige Stunden bis über mehrere Tage – durchgeführt.

6.2 Auswertungsparameter

Für die Auswertung wurden umfangreiche und komplexe Betrachtungsansichten ausgewählt und bewertet. In der *Abbildung 72* ist die Vorgehensweise bei der Auswertung der Daten dargestellt:

- Stufe 1 zeigt die 3 verwendeten Ultraschallprüffrequenzen
- Stufe 2 zeigt die Auswahlmöglichkeit mit und ohne Zirkulation
- Stufe 3 zeigt die Festlegung eines Bezugsrahmens für die Vergleichbarkeit der Daten
- Stufe 4 zeigt die Auswertungsmöglichkeiten
- In Stufe 5 erfolgt die Ergebnisanalyse

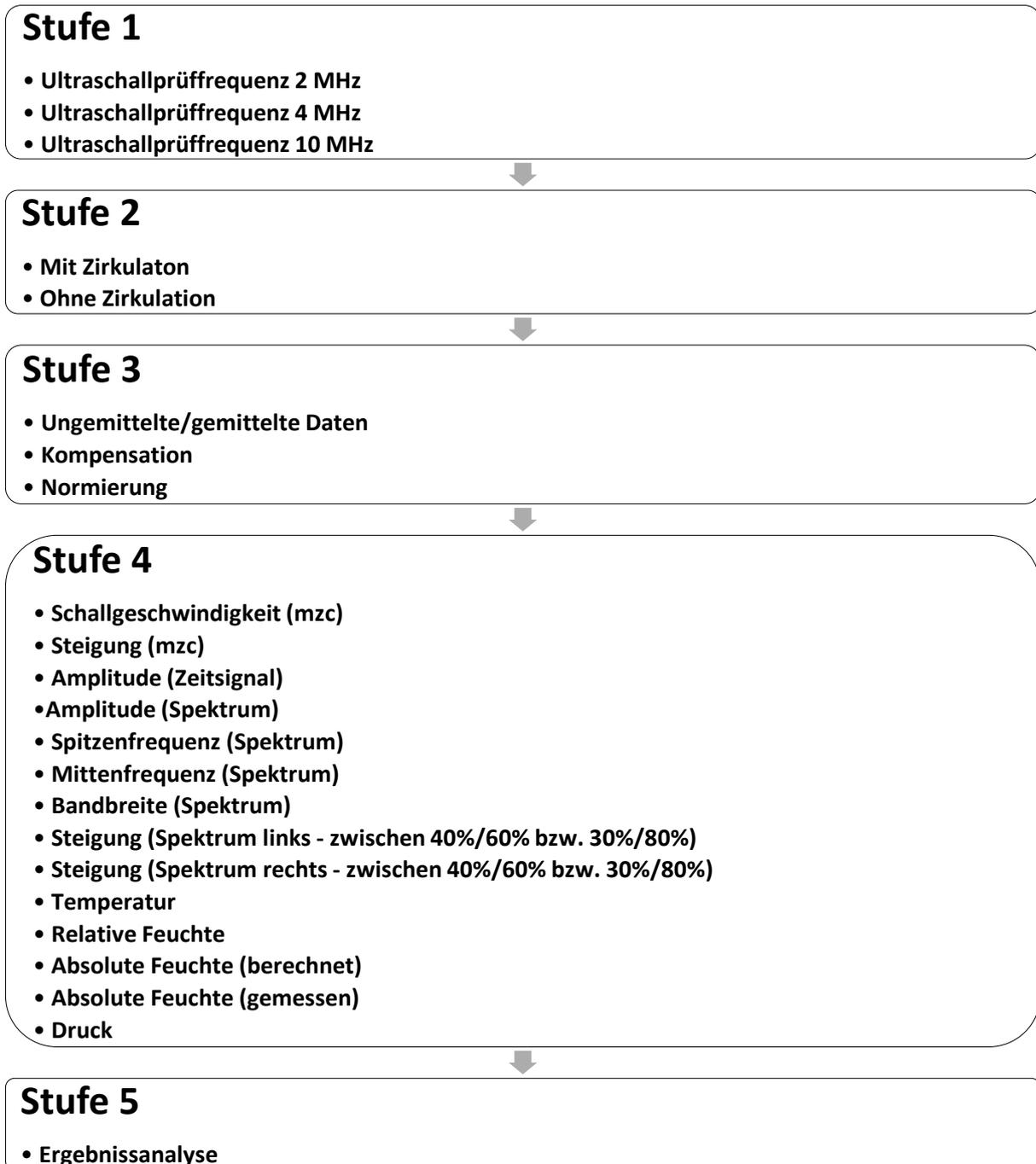


Abbildung 72: Vorgehensweise bei der Datenanalyse

Die Analyse der Ergebnisse wurde mit unterschiedlichen Ansätzen (*Abbildung 72*) durchgeführt. Jede der unter Stufe 4 aufgezeigten Parameter des Ultraschallsignals wurde dazu in Abhängigkeit der Feuchte und der Temperatur betrachtet. Im nachfolgendem sind die Auswertungskombinationen dargestellt, welche das Gesamtergebnis der vollständigen Untersuchung im Summe widerspiegeln.

6.3 Ergebnisse mit Feuchte im Isolieröl

Für die Untersuchung der Feuchte im Isolieröl ist die folgende Vorgehensweise (*Abbildung 73*) festgehalten. Die Feuchtegrade in den Abbildungen sind in der Legende durchgehend nummeriert und folgen beispielhaft den in *Abbildung 66* und *Abbildung 67* dargestellten Feuchtegraden. Die Ergebnisse sind in drei Vergleichsmerkmale unterteilt (*Abbildung 73* – rote Umrandung). Beispiel Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur:

- Ultraschallprüfkopf 2 MHz
- Ohne Zirkulation (0 bar) **↔** Mit Zirkulation (0bar)
- Ohne Temperaturkompensation (Rohdaten) **↔** Mit Temperaturkompensation

Alle nachfolgenden Ergebnisse entsprechen diesem Vergleichsschema.

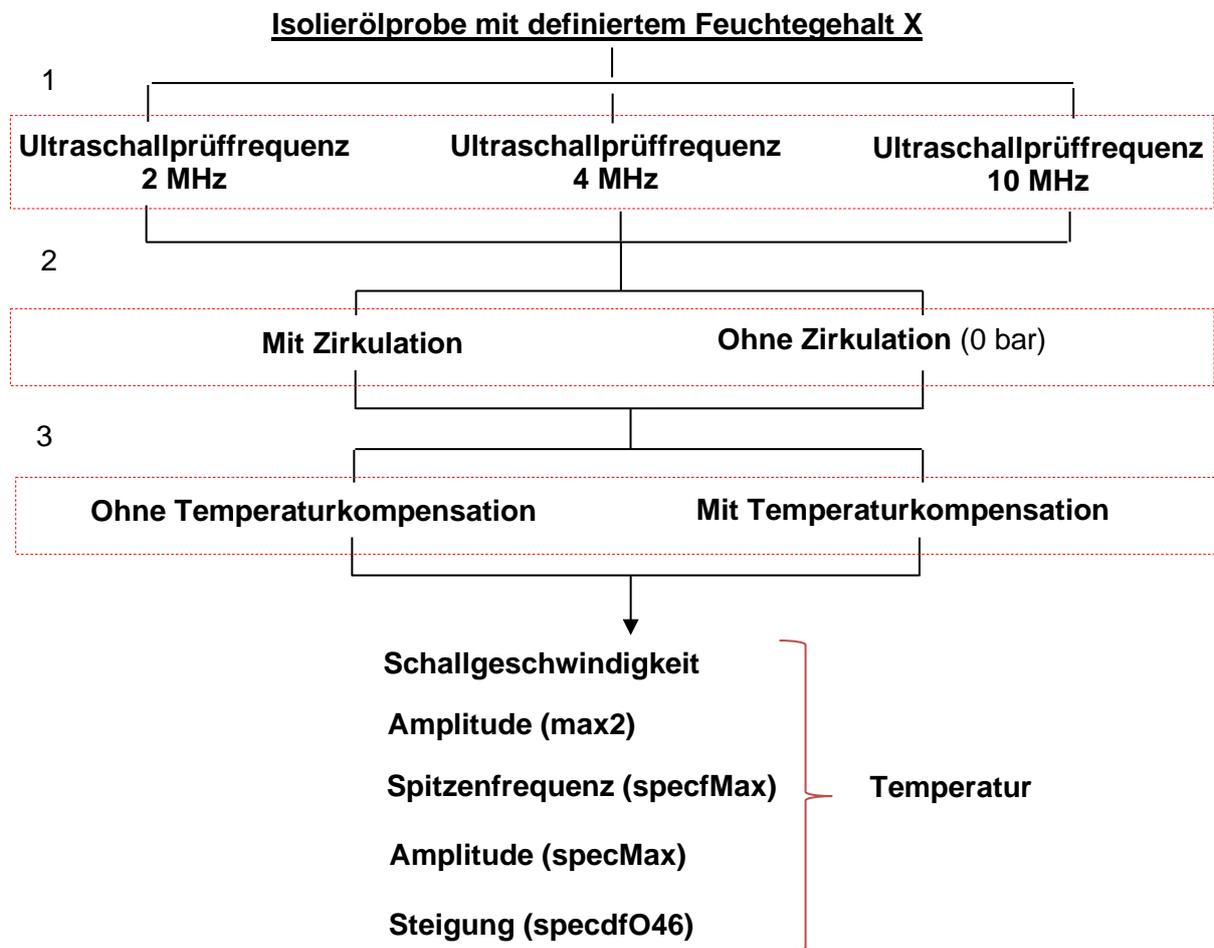


Abbildung 73: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Feuchteuntersuchung

Isolieröl dehnt sich bei zunehmender Temperatur aus. In dem hermetisch abgeschlossenen Prüfgefäß entsteht somit ein Überdruck mit steigender Temperatur. Zur Einordnung des Einflusses einer derartigen Druckerhöhung innerhalb des Prüfgefäßes auf die Ultraschallmessung wurde eine Voruntersuchung mit Druckvariation bei konstanter Temperatur und Feuchte durchgeführt.

Es werden im nachfolgendem nur die Ergebnisse dargestellt. Eine Bewertung erfolgt im Kapitel 6.5.

Druck – Kontinuierliche Variation (Umgebungsdruck (1) → 1 bar (2) → 1,5 bar (3))

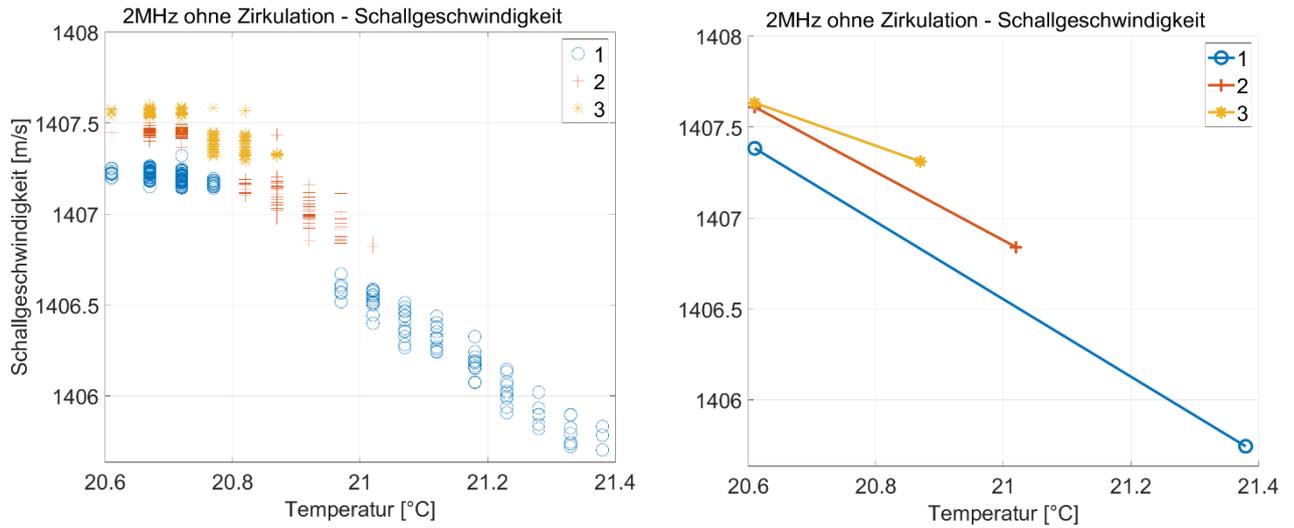


Abbildung 74: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK

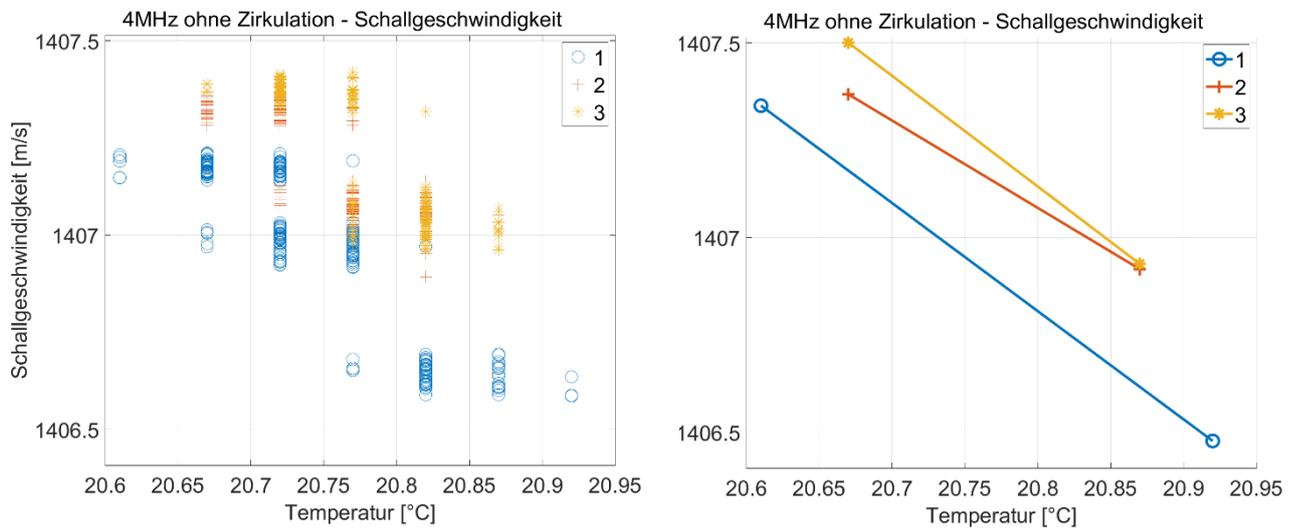


Abbildung 75: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK

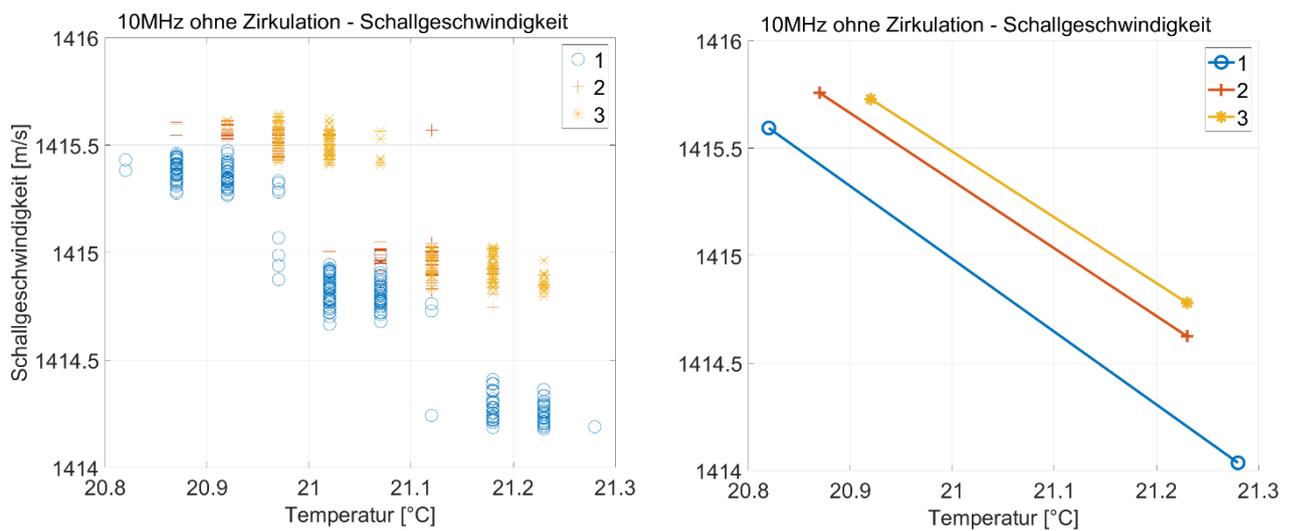


Abbildung 76: Druck: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK

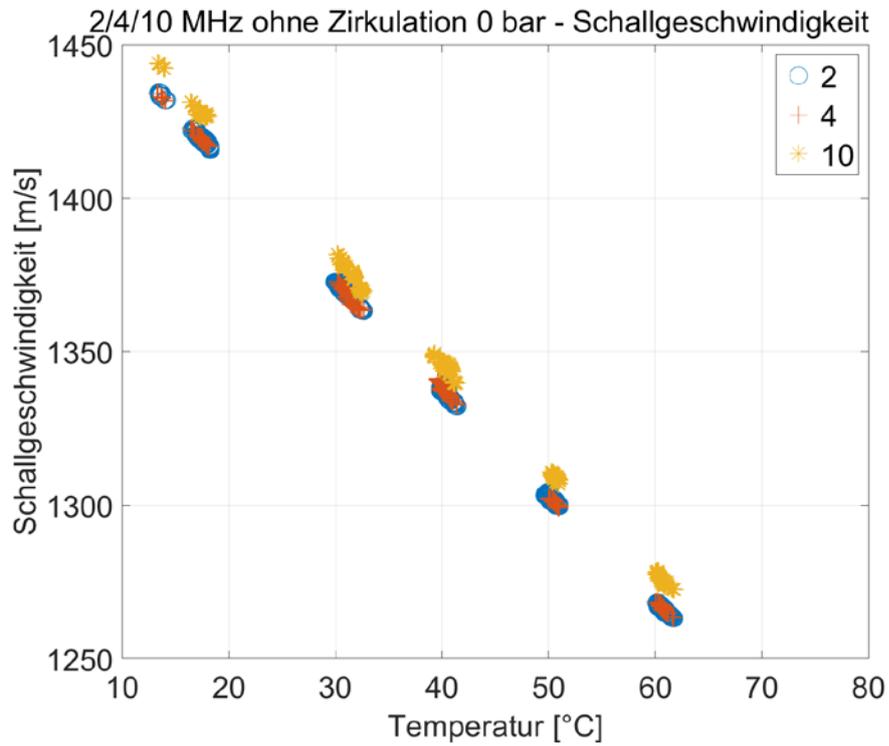
Schallgeschwindigkeit Gesamtdarstellung

Abbildung 77: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur der 2, 4 und 10 MHz USPK

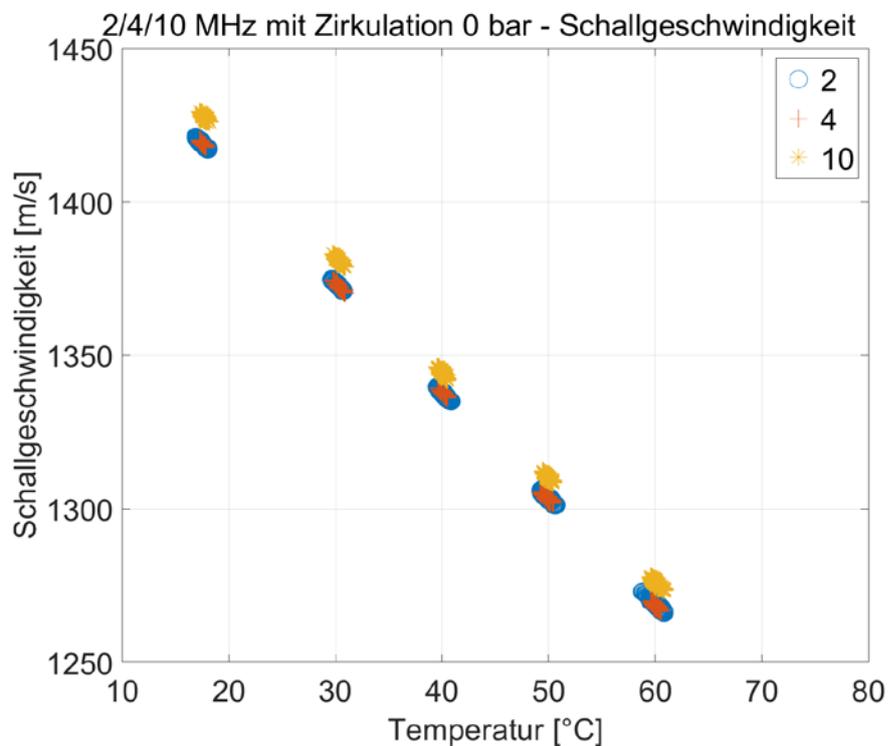


Abbildung 78: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur der 2, 4 und 10 MHz USPK

Schallgeschwindigkeit

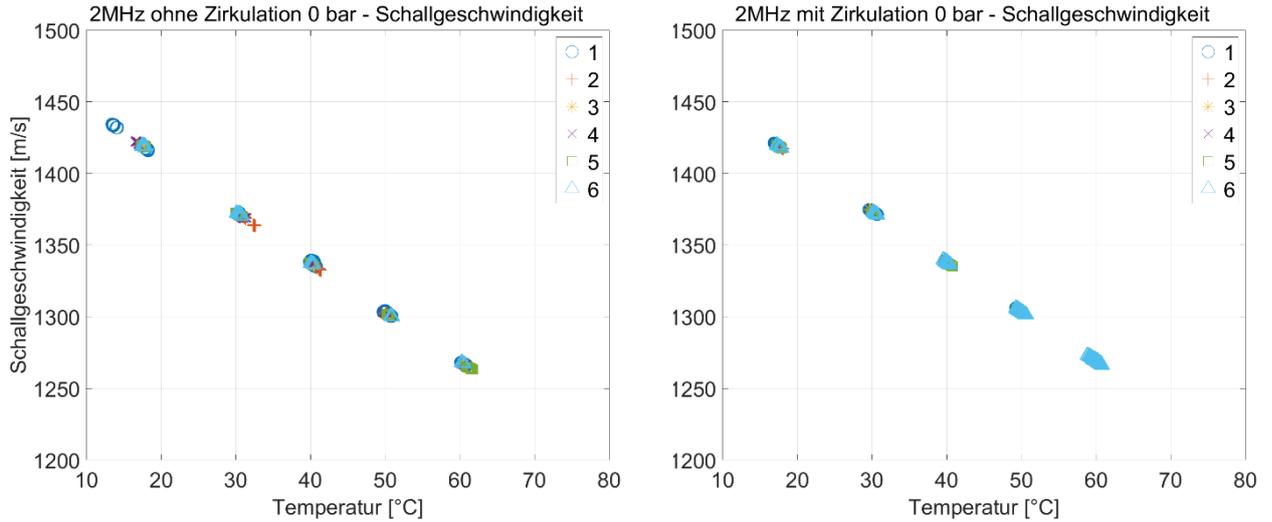


Abbildung 79: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK

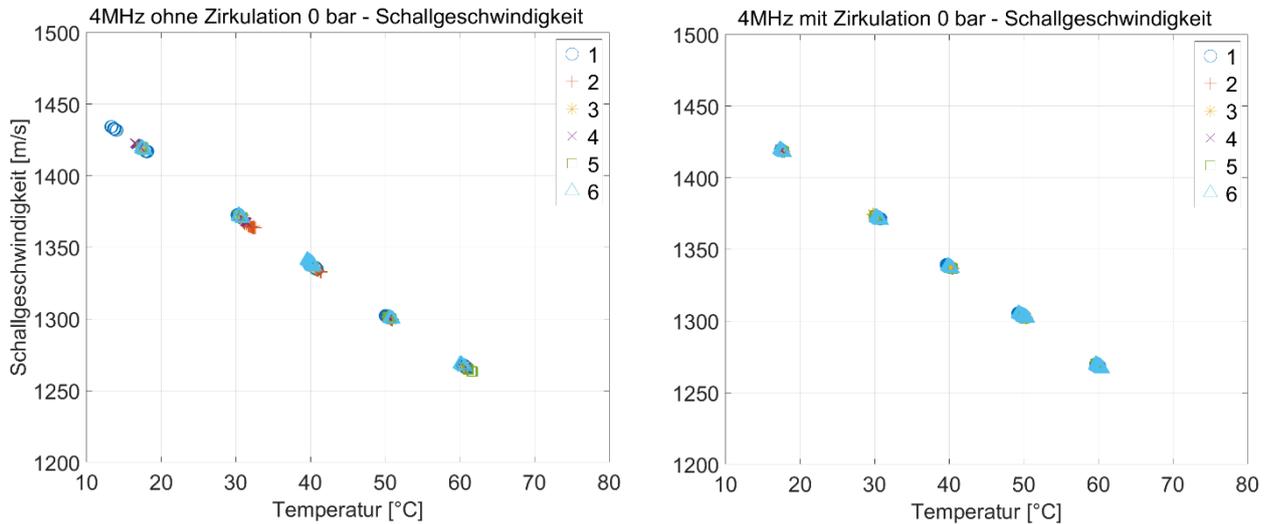


Abbildung 80: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK

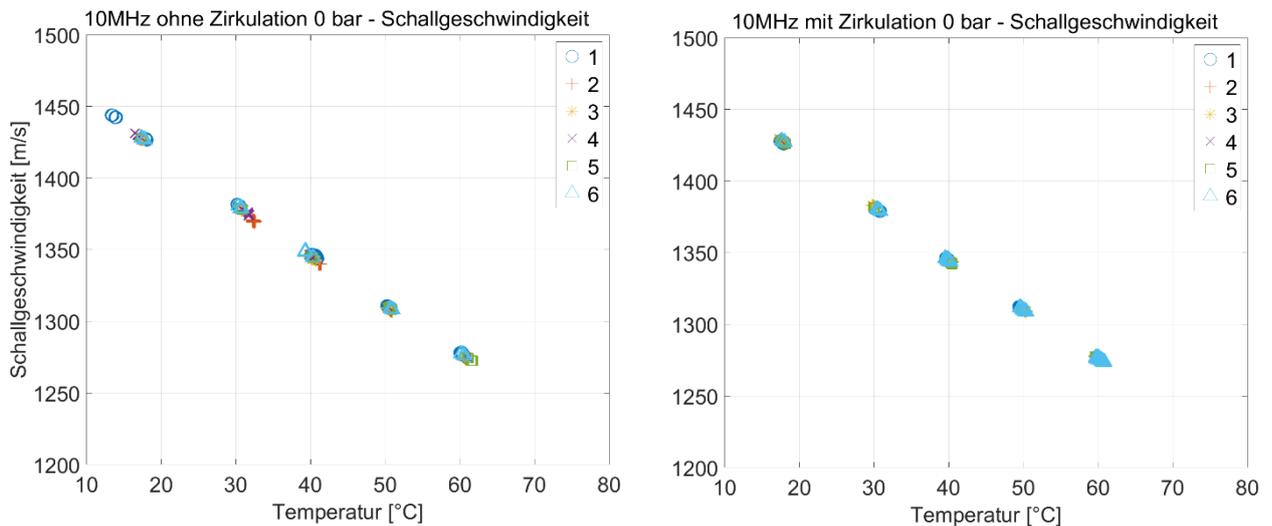


Abbildung 81: Feuchte: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Schallgeschwindigkeit mit Temperaturkompensation

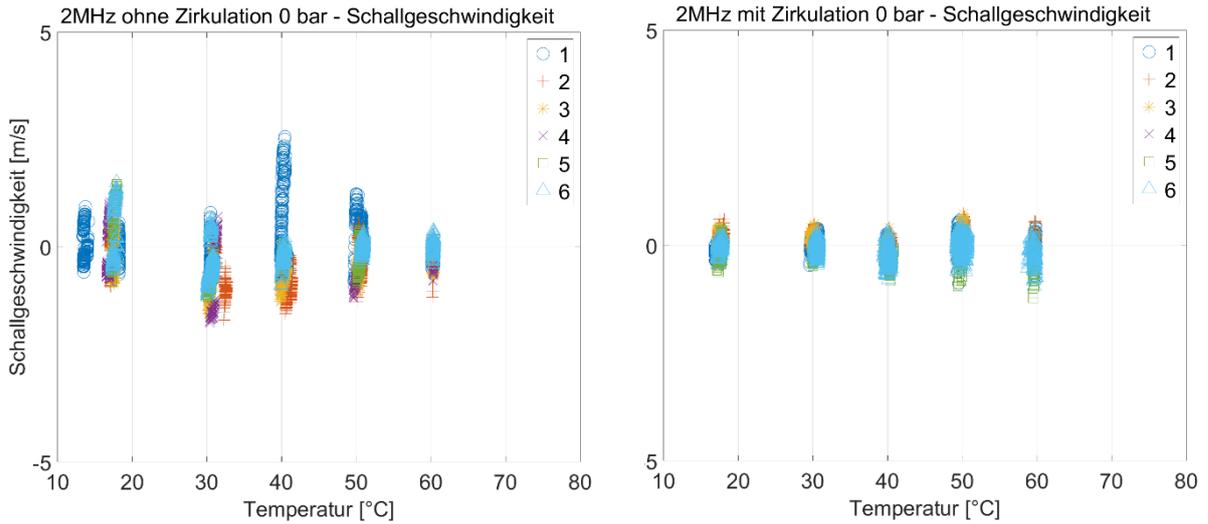


Abbildung 82: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK

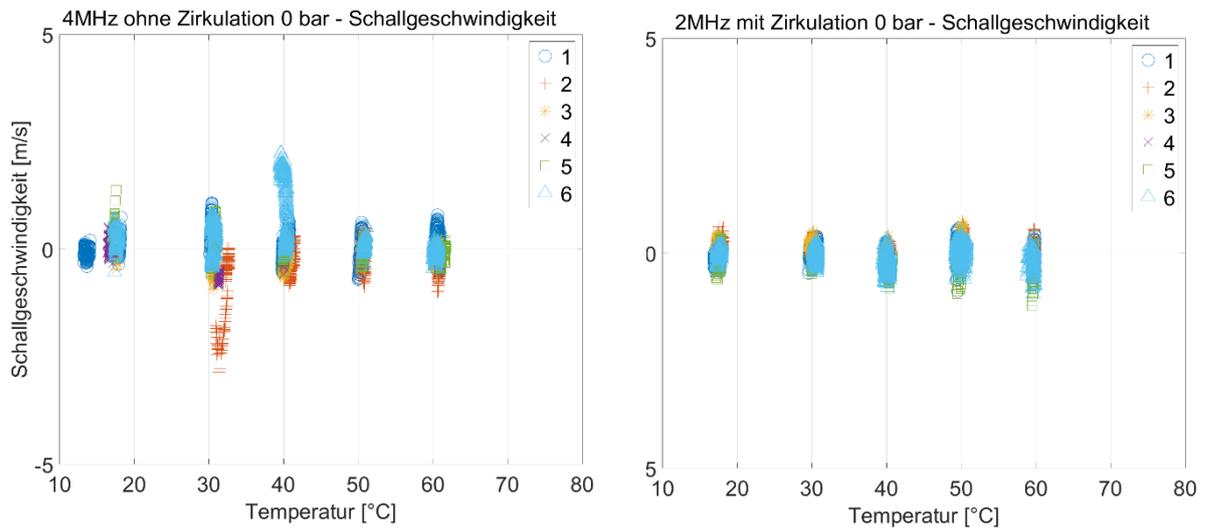


Abbildung 83: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK

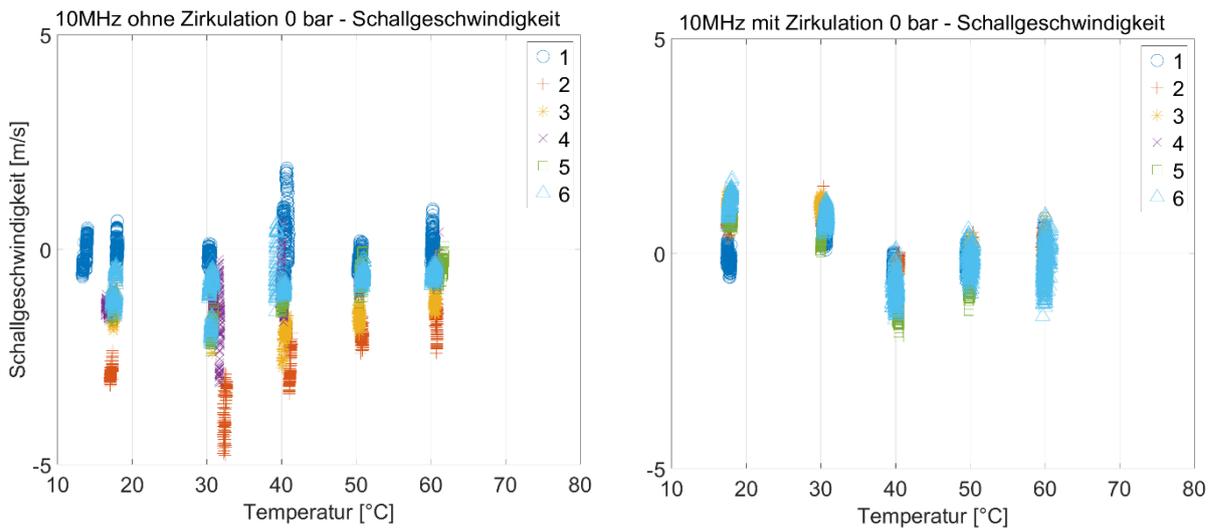


Abbildung 84: Feuchte TK: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Amplitude (max2)

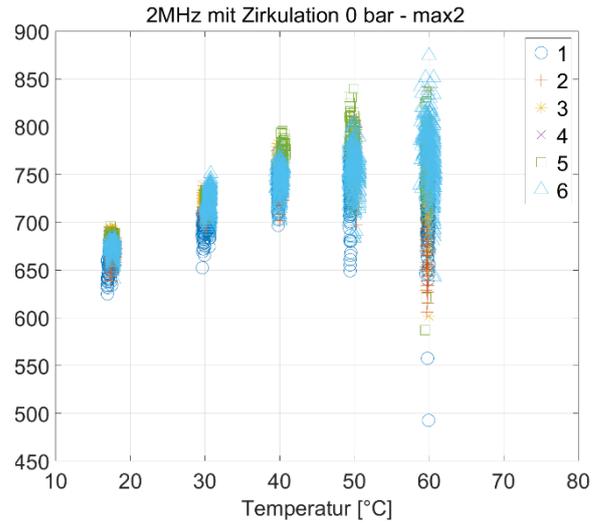
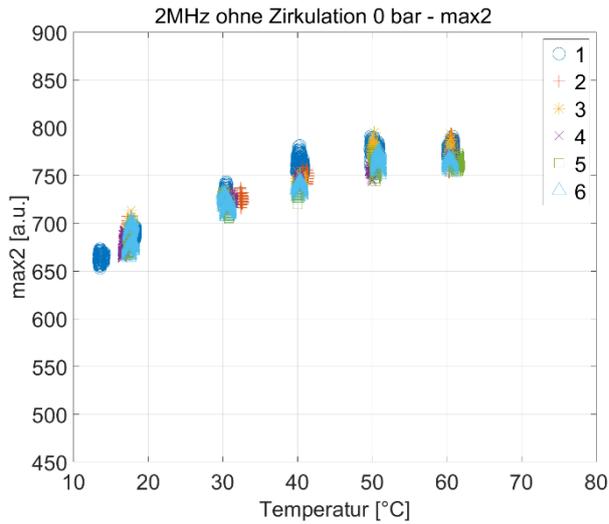


Abbildung 85: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK

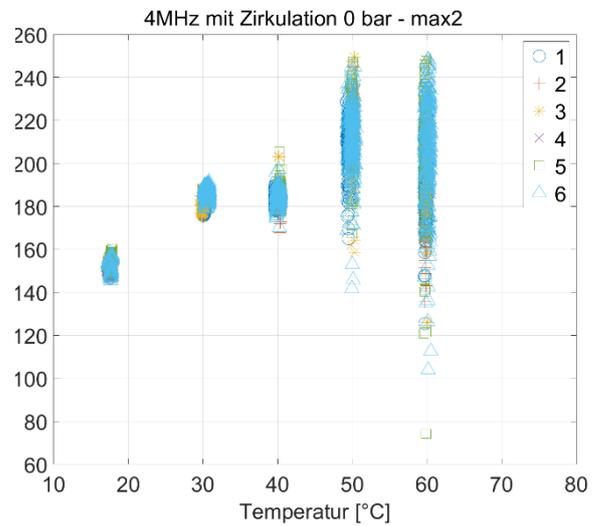
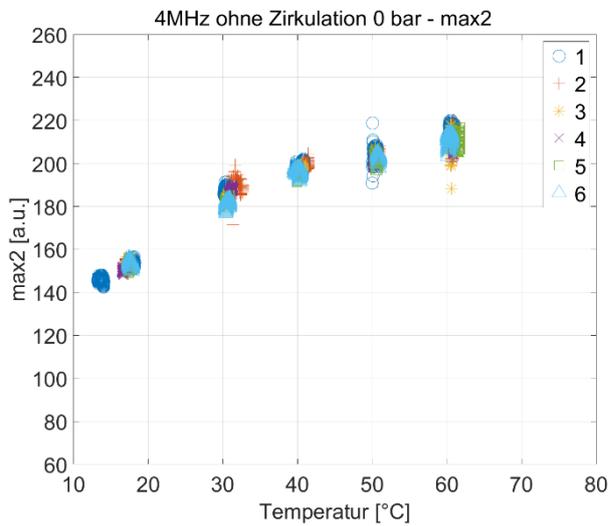


Abbildung 86: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK

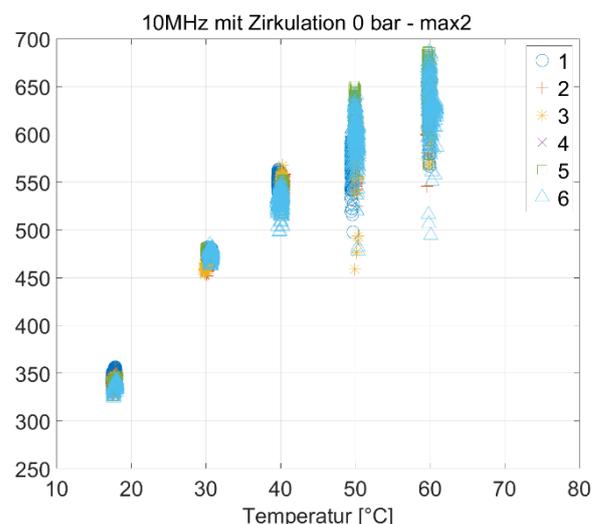
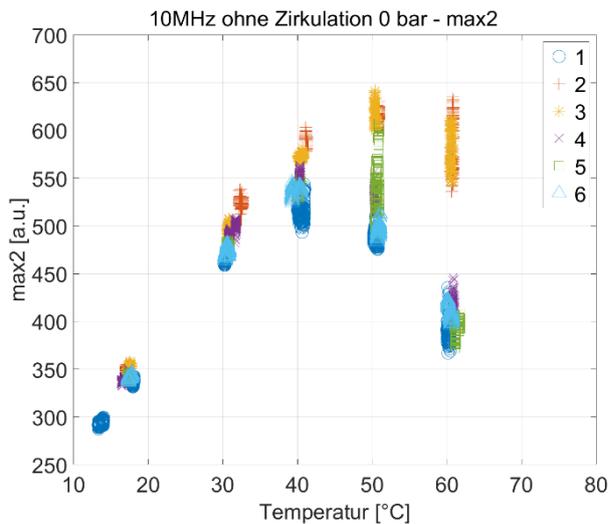


Abbildung 87: Feuchte: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Amplitude (max2) mit Temperaturkompensation

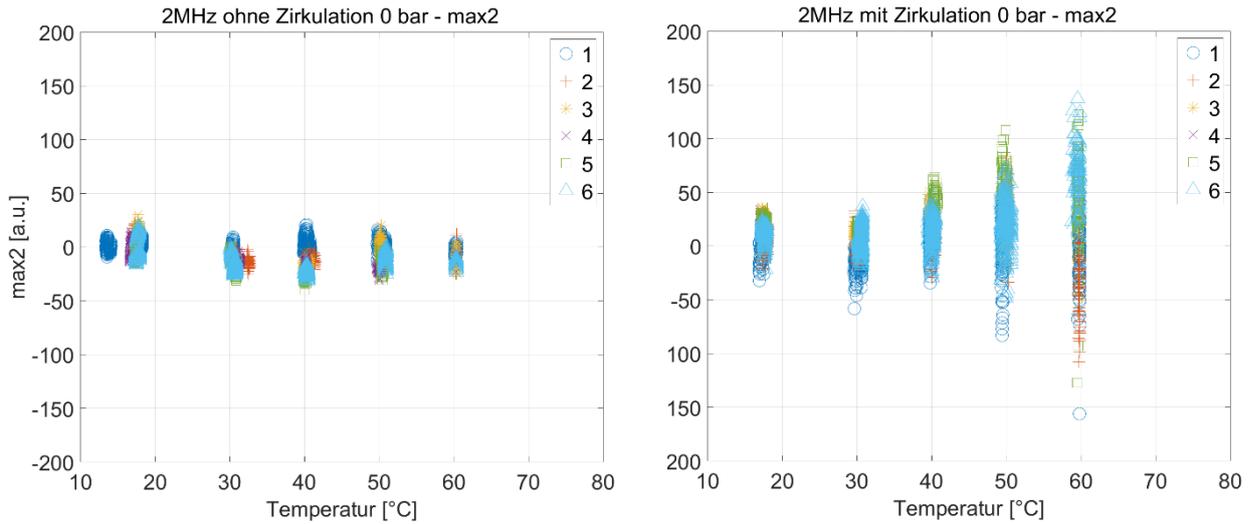


Abbildung 88: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK

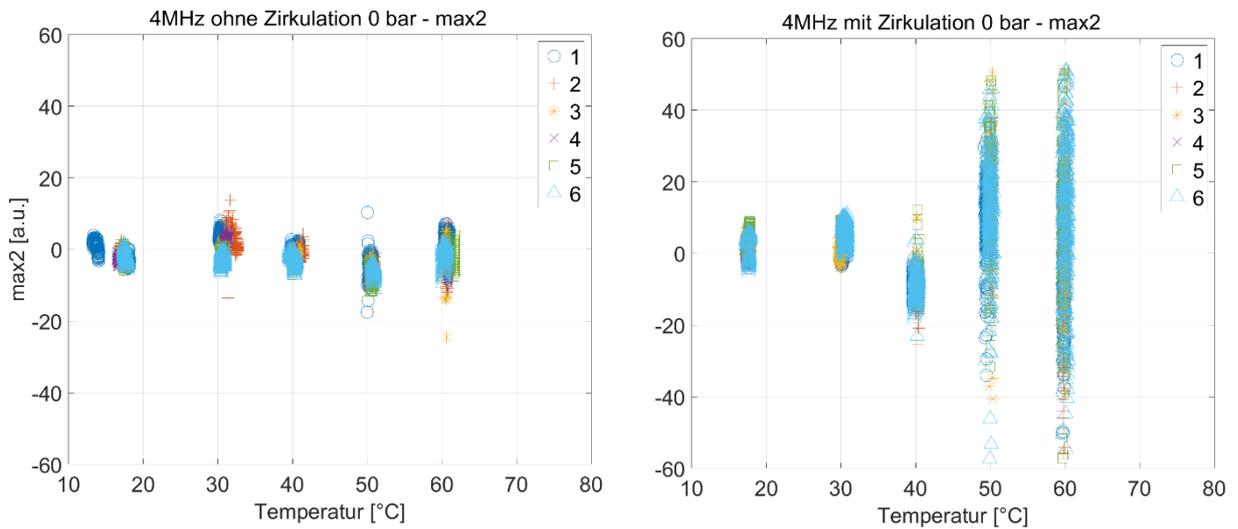


Abbildung 89: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK

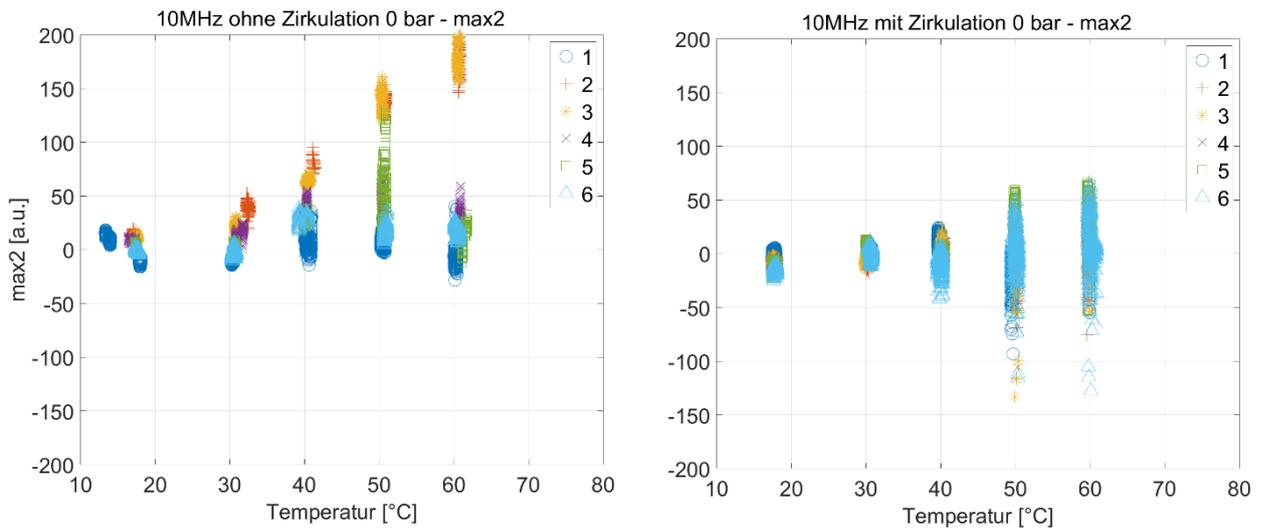


Abbildung 90: Feuchte TK: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Spitzenfrequenz (specfMax)

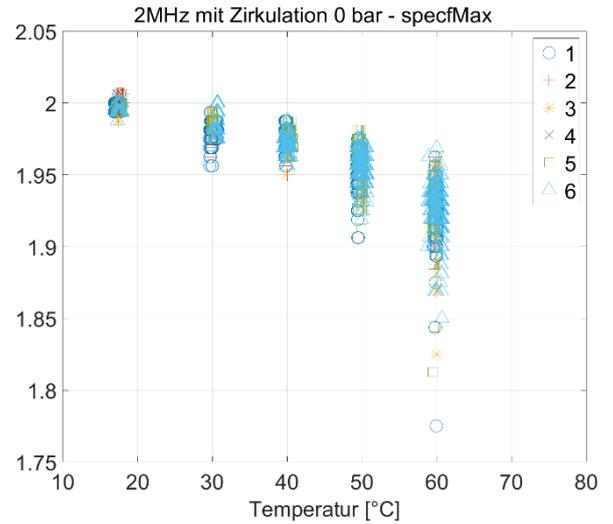
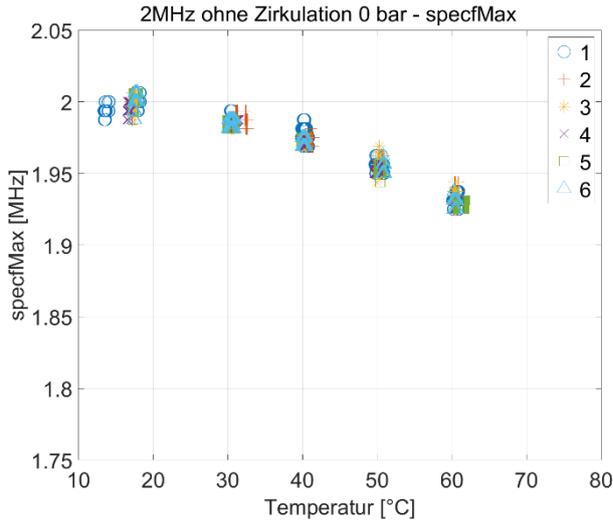


Abbildung 91: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 2 MHz USPK

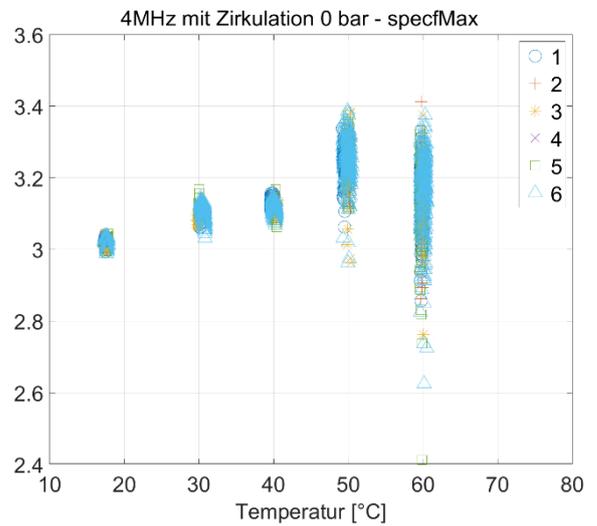
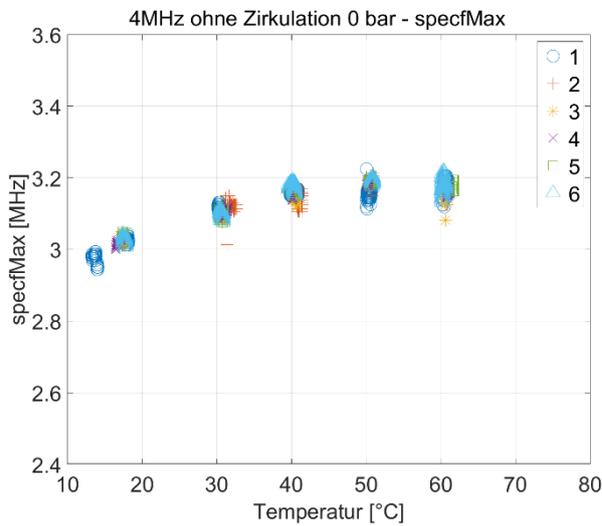


Abbildung 92: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 4 MHz USPK

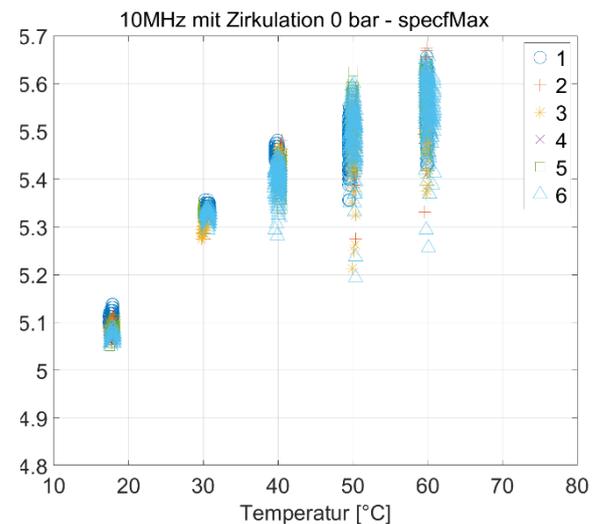
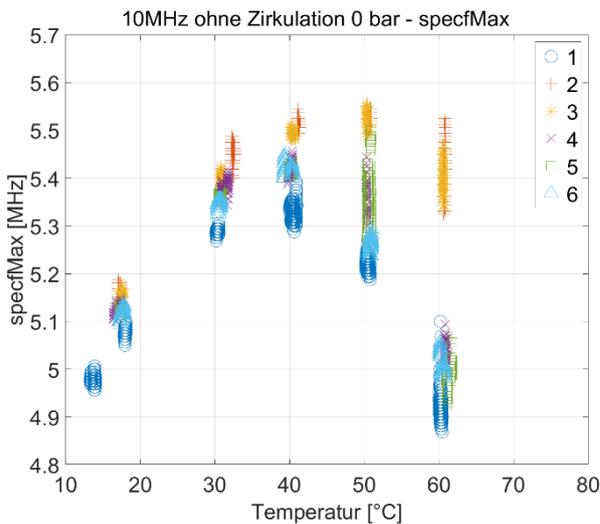


Abbildung 93: Feuchte: Spitzenfrequenz vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Spitzenfrequenz (specfMax) mit Temperaturkompensation

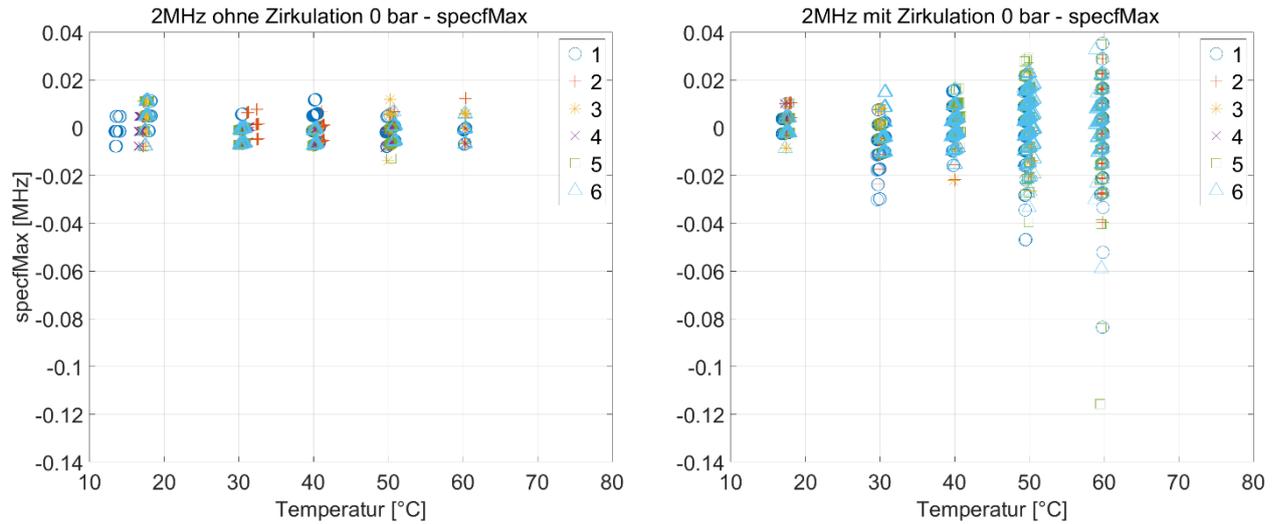


Abbildung 94: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK

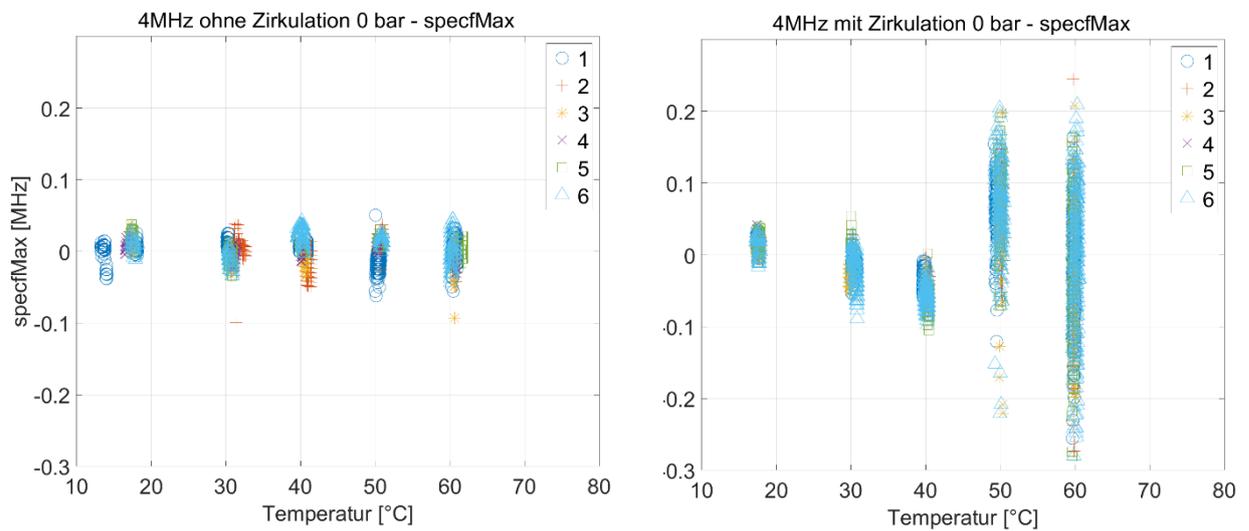


Abbildung 95: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK

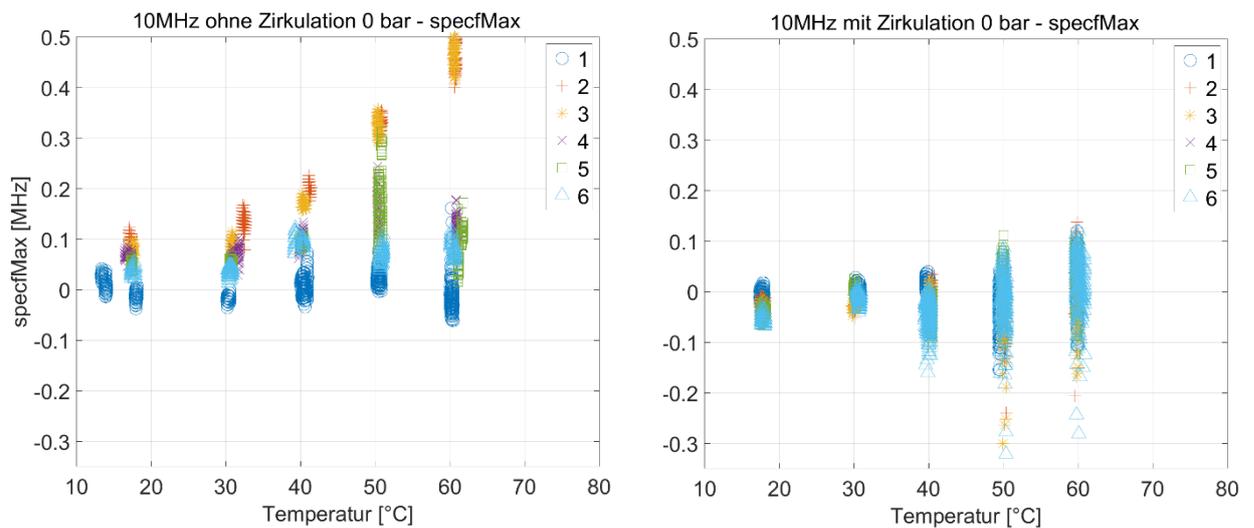


Abbildung 96: Feuchte TK: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Amplitude (specMax)

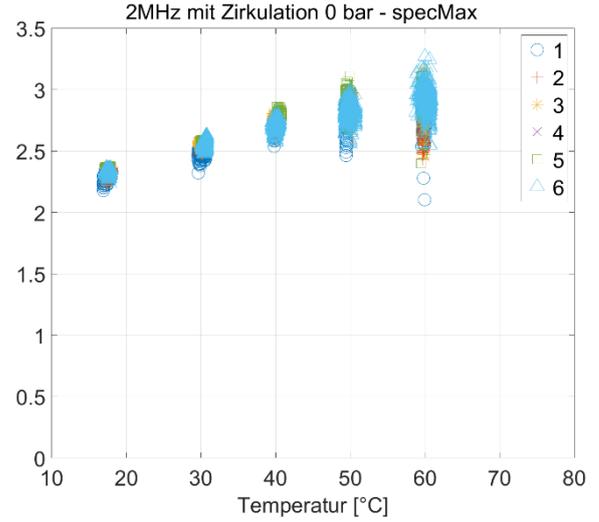
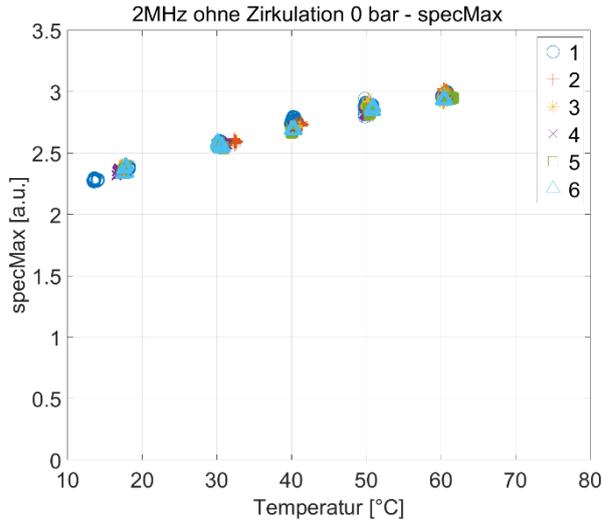


Abbildung 97: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK

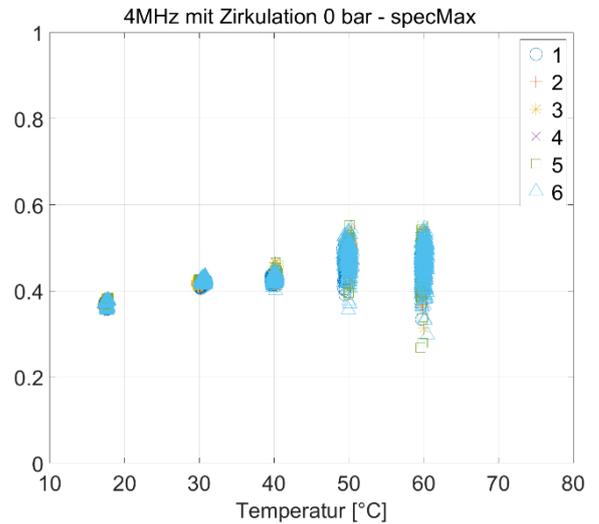
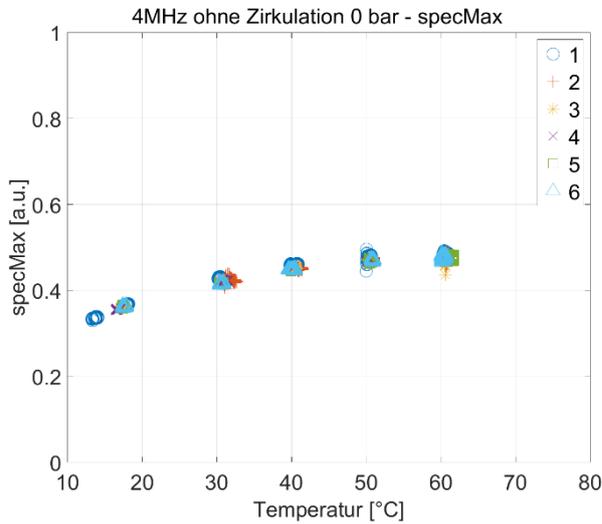


Abbildung 98: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK

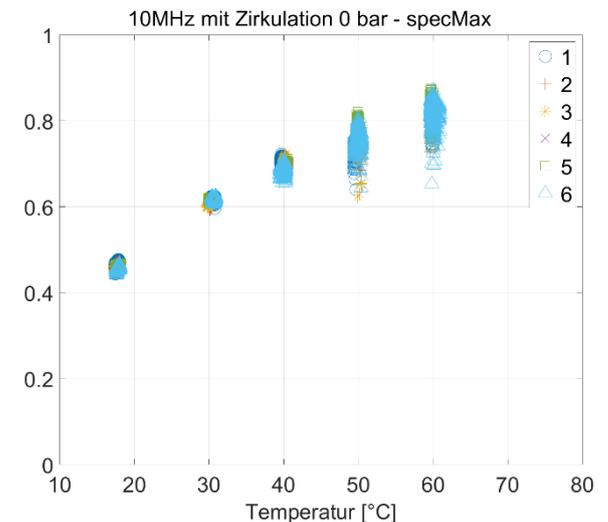
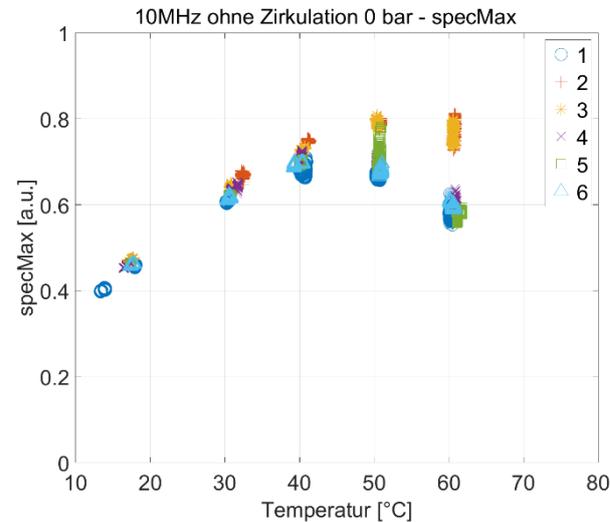


Abbildung 99: Feuchte: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Amplitude (specMax) mit Temperaturkompensation

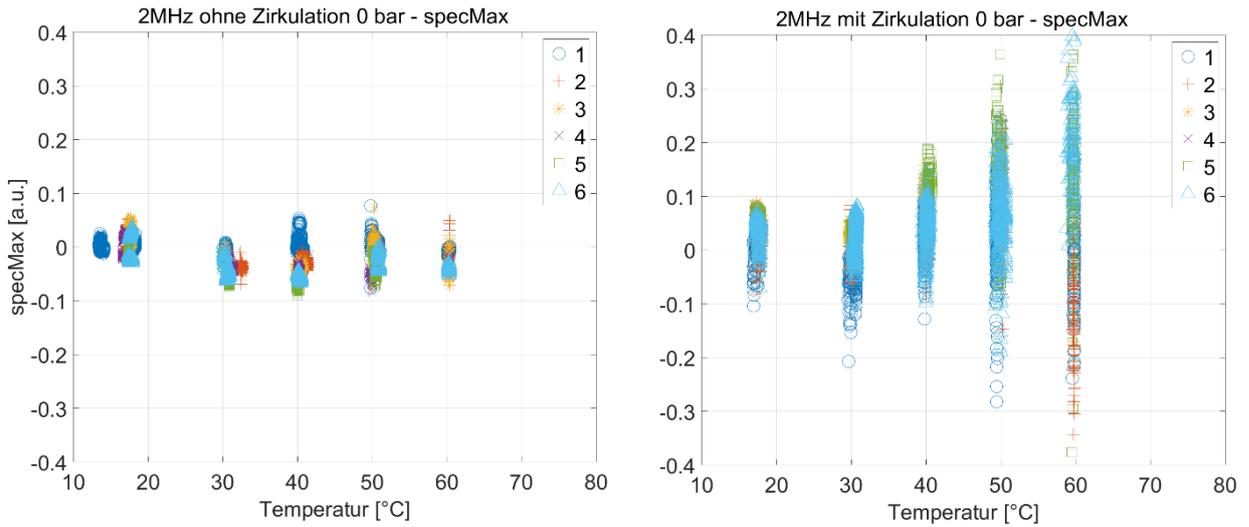


Abbildung 100: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK

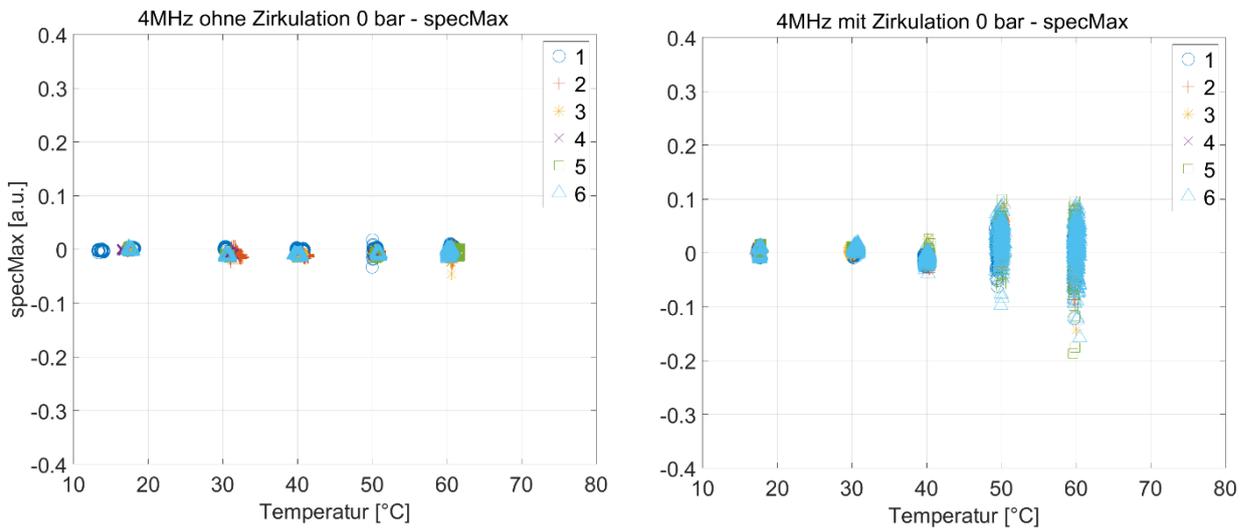


Abbildung 101: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK

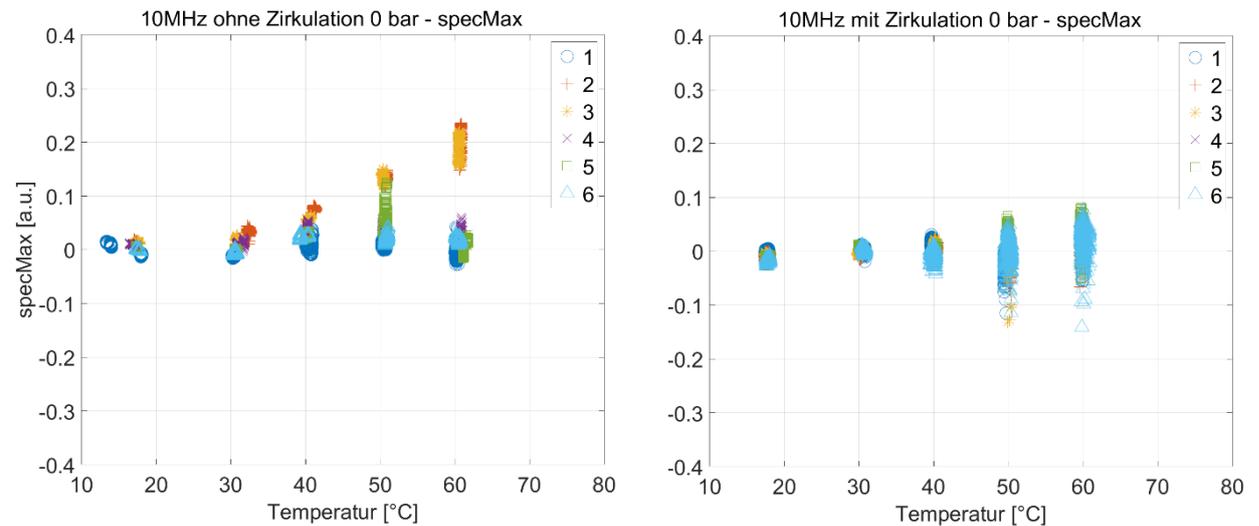


Abbildung 102: Feuchte TK: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Steigung (specdfO46)

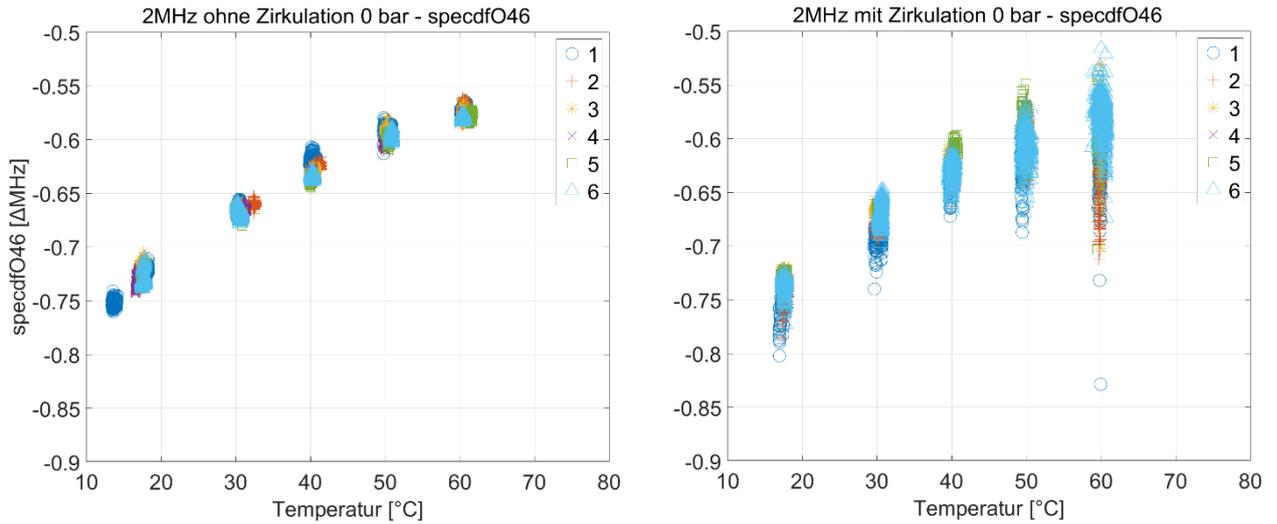


Abbildung 103: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK

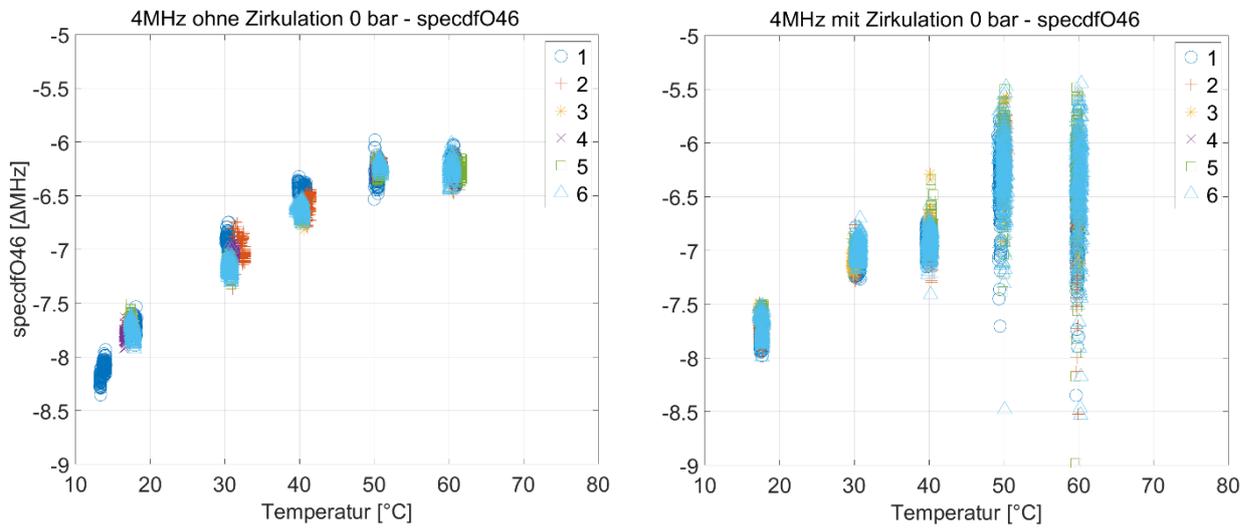


Abbildung 104: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USP

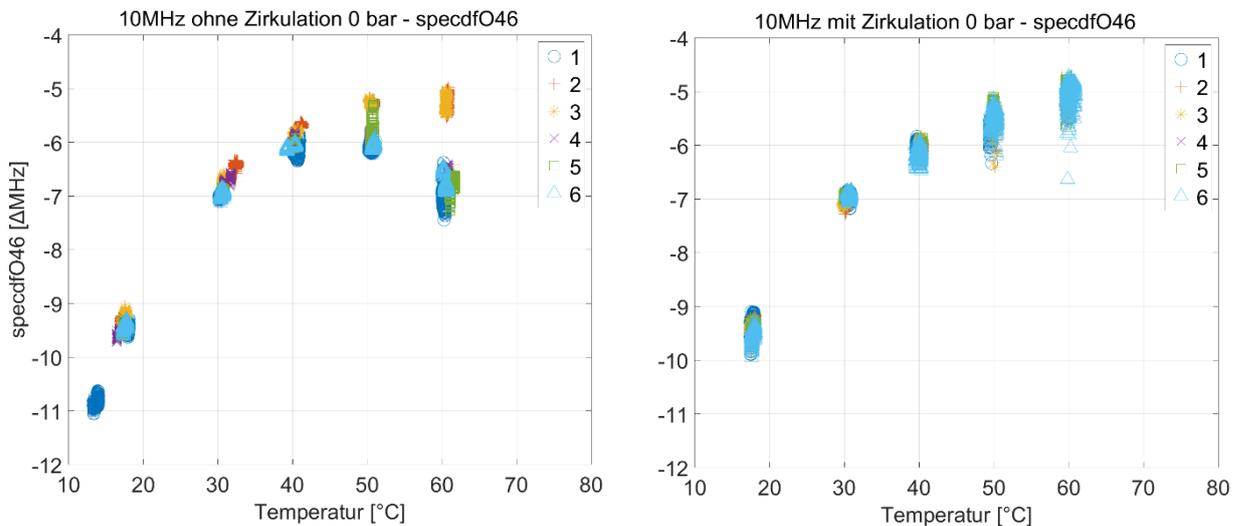


Abbildung 105: Feuchte: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Steigung (specdfO46) mit Temperaturkompensation

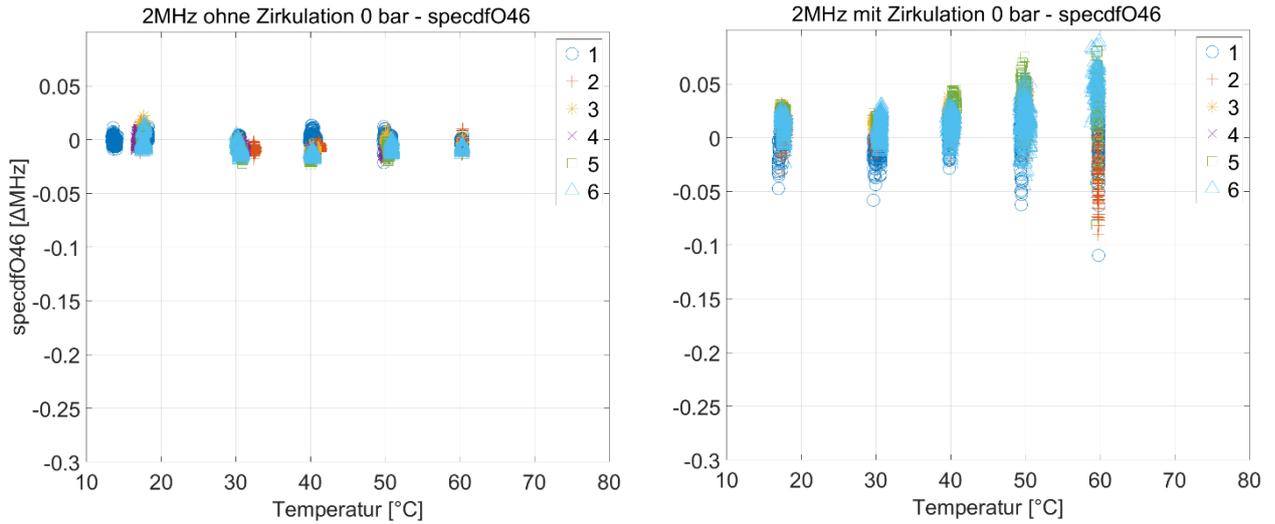


Abbildung 106: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK

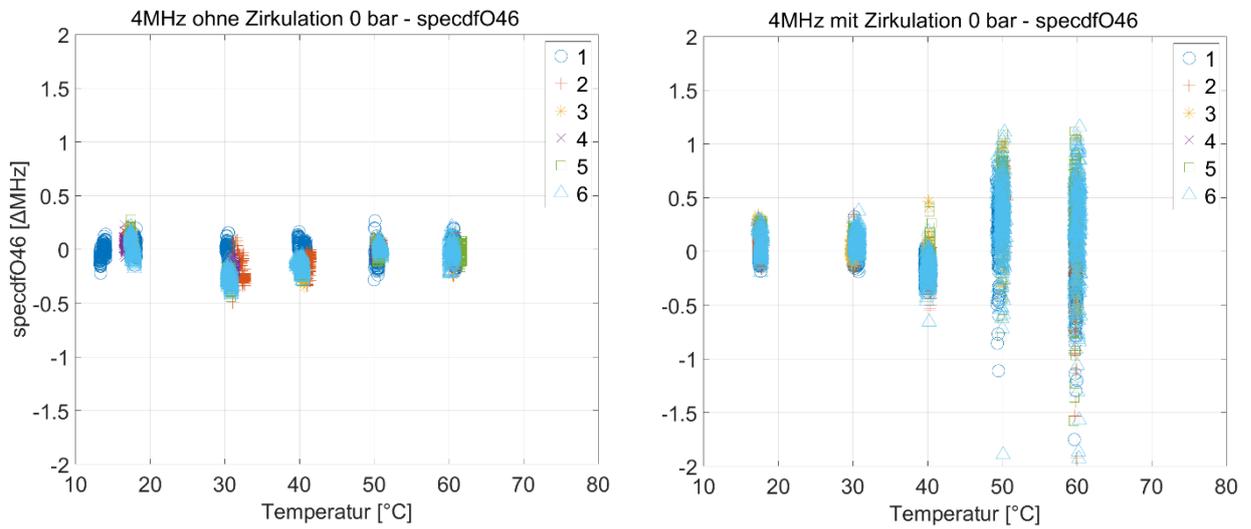


Abbildung 107: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USP

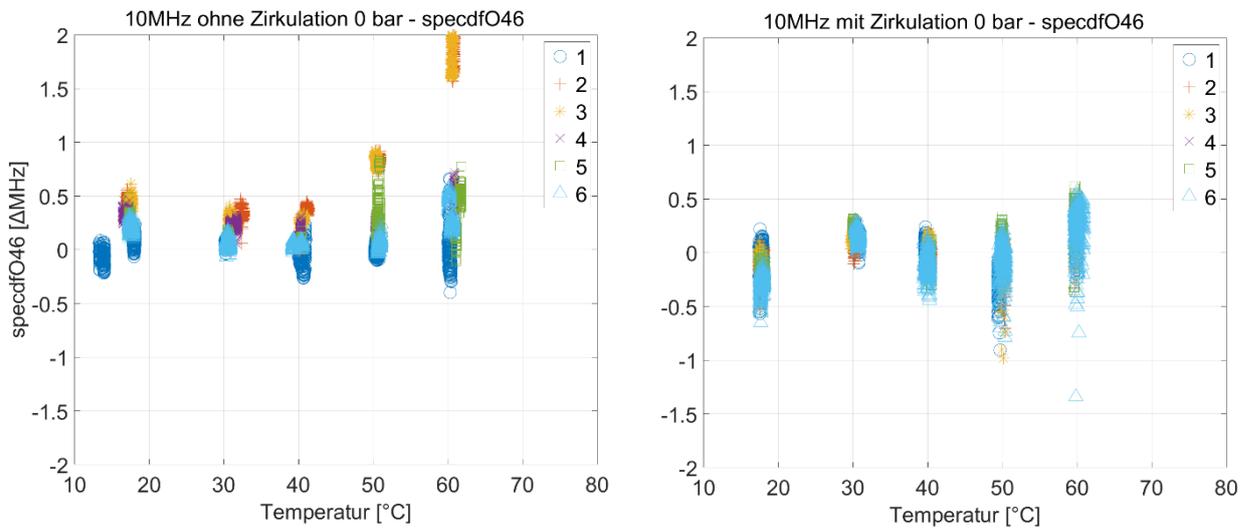


Abbildung 108: Feuchte TK: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Abkühlungsprozess

Neben der Betrachtung gezielt hergestellter Feuchtegrade im Isolieröl wurde je Feuchtegrad ein Abkühlprozess von Maximaltemperatur 60 °C bis Raumtemperatur kontinuierlich mittels Ultraschalles aufgezeichnet. Parallel erfolgte ein Monitoring der relativen Feuchte im Öl. Die einzelnen Feuchtegrade (*Abbildung 109*) sind farblich hinterlegt und in *Abbildung 110* durchgehend nummeriert (Legende). Die Messung erfolgte im Prüfgefäß 1 ohne Zirkulation des Isolieröls.

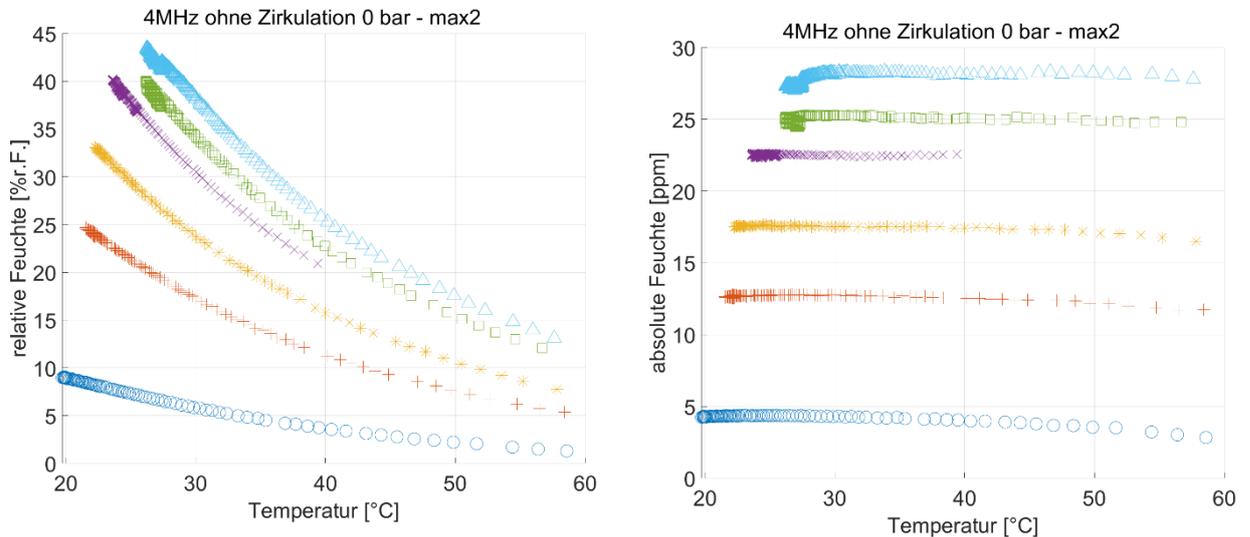


Abbildung 109: Feuchtemessung während Abkühlungsprozess, links: relative Feuchte in %, rechts: berechnete Feuchte in ppm

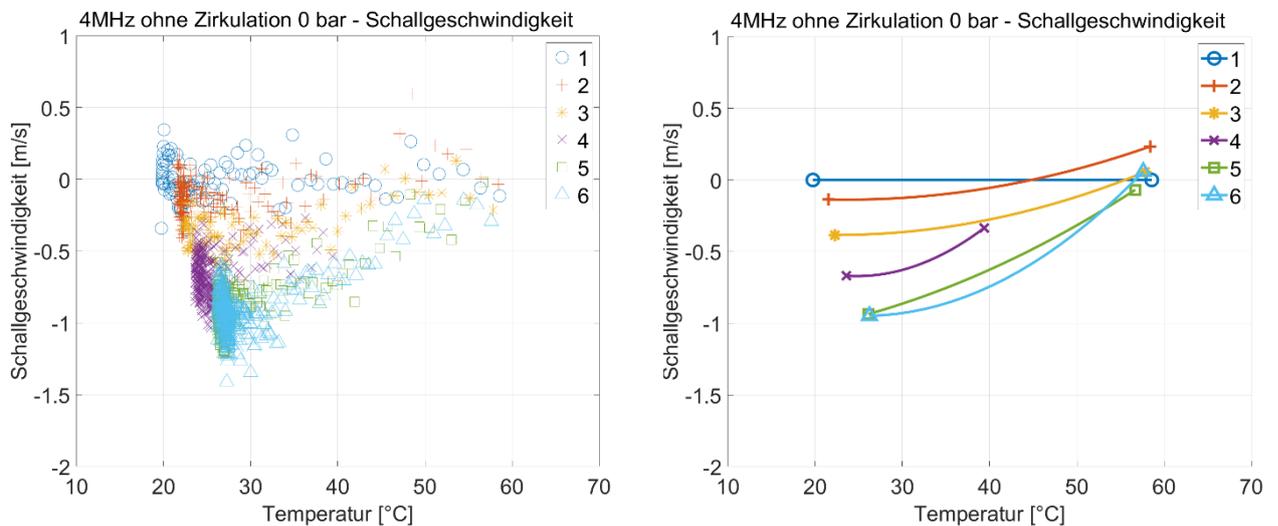


Abbildung 110: Schallgeschwindigkeiten entsprechend Feuchtegrade nach Temperaturkompensation (USPK 4MHz)

6.4 Ergebnisse zusätzlicher Abhängigkeiten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Ultraschallvermessung weiterer Alterungsprodukte dargestellt. Es werden nacheinander die Ergebnisse der Gas-, Säure- und Feststoffuntersuchung dargestellt.

Ergebnisse Gas im Isolieröl

Die Vorgehensweise bei der Darstellung von Ergebnissen der Gasuntersuchung ist in *Abbildung 111* dargestellt. Die Gasproben in den Abbildungen sind in der Legende beschrieben. Die Ergebnisse sind in zwei Vergleichsmerkmale unterteilt:

Beispiel Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur:

- Ultraschallprüfkopf 2 MHz
- Ohne Zirkulation (0 bar)

Alle nachfolgenden Ergebnisse entsprechen diesem Vergleichsschema.

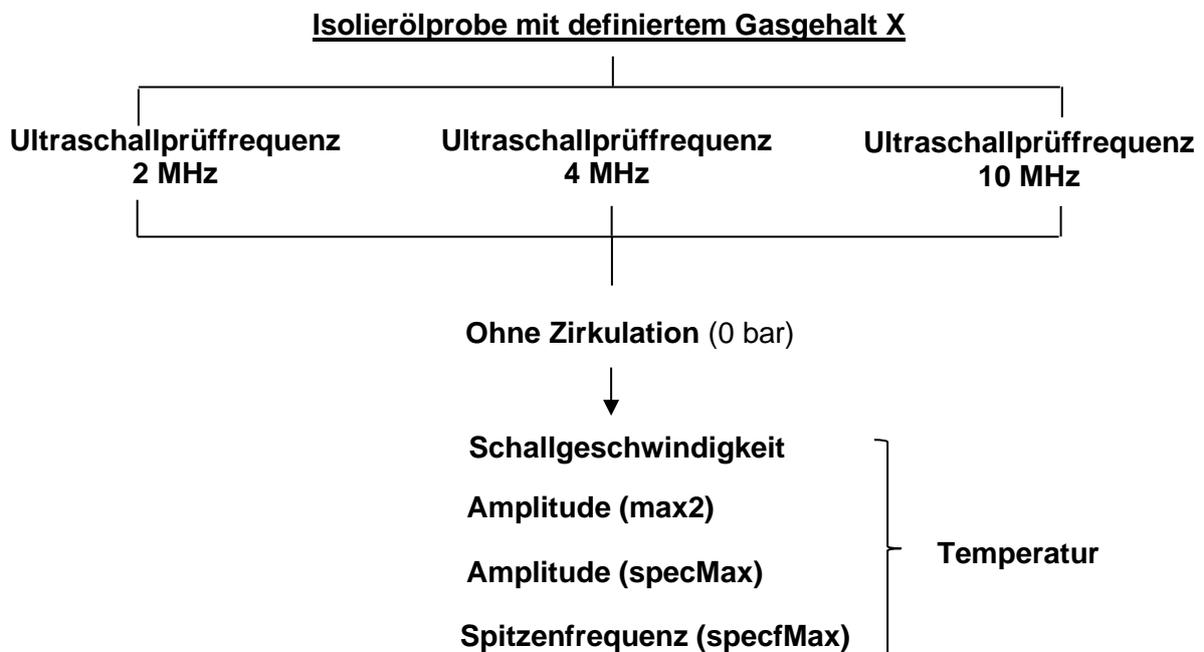


Abbildung 111: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Gasuntersuchung

Im nachfolgendem werden die Ergebnisse dargestellt. Eine Beurteilung erfolgt im Kapitel 6.5.

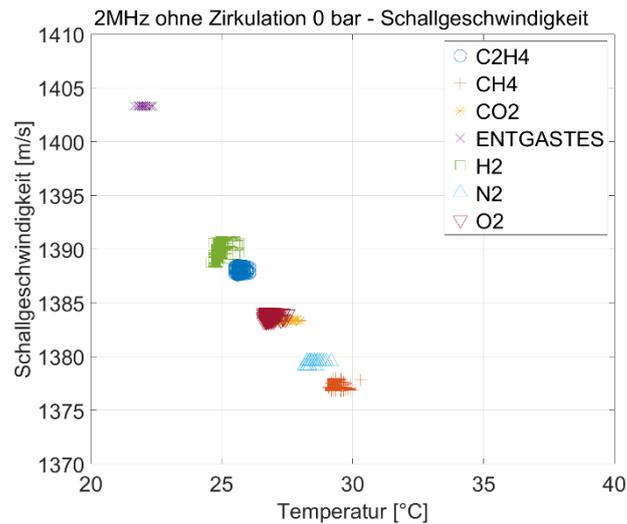
Schallgeschwindigkeit

Abbildung 112: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK

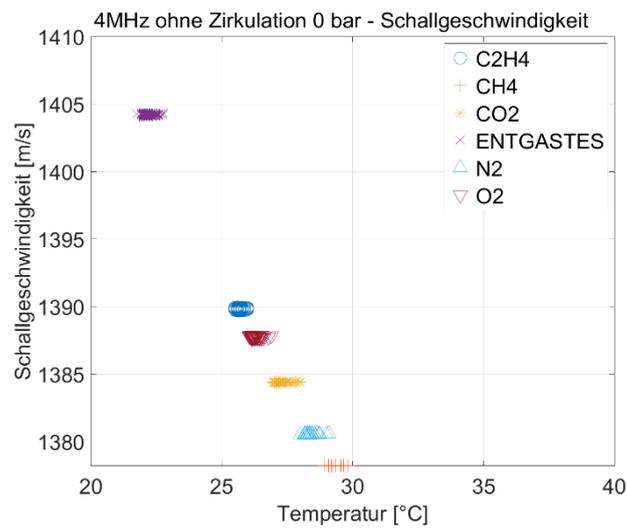


Abbildung 113: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK

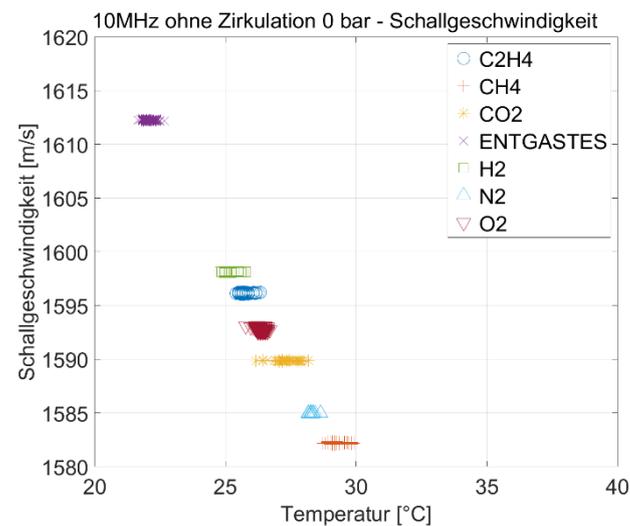


Abbildung 114: Gas: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK

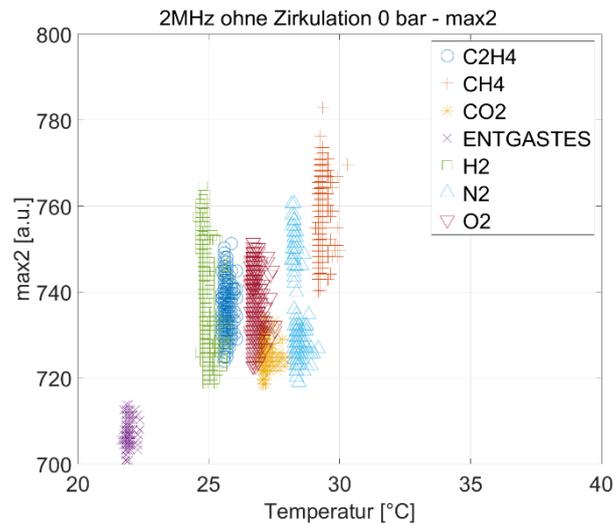
Amplitude (max2)

Abbildung 115: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK

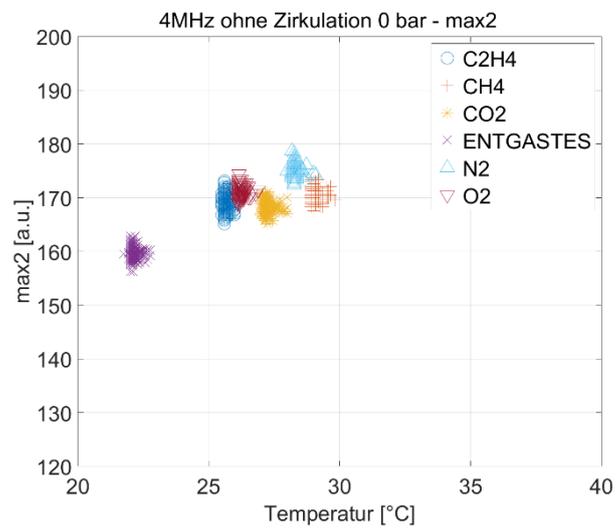


Abbildung 116: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK

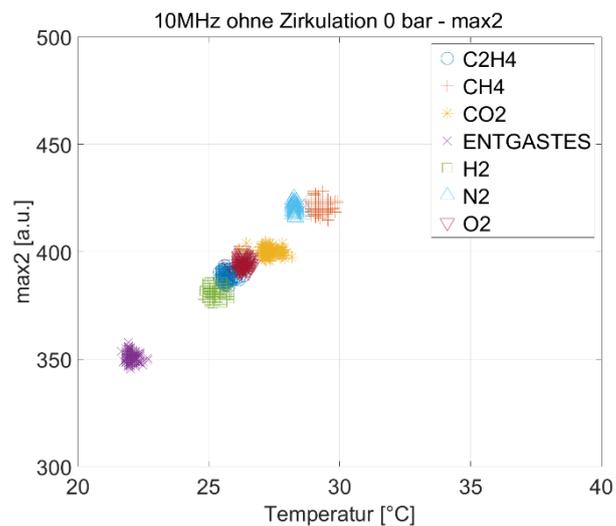


Abbildung 117: Gas: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK

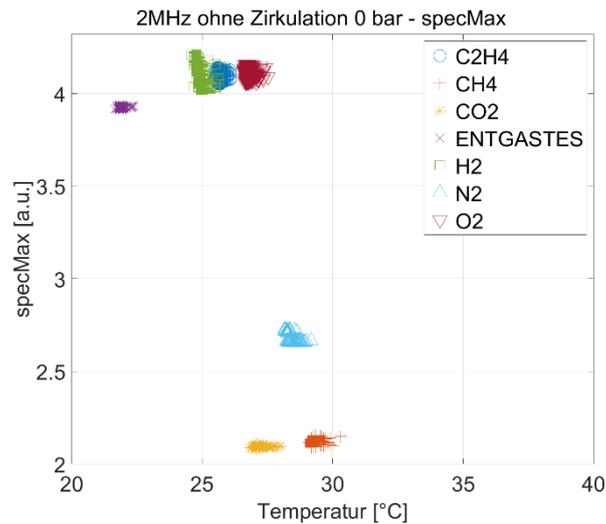
Amplitude (specMax)

Abbildung 118: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK

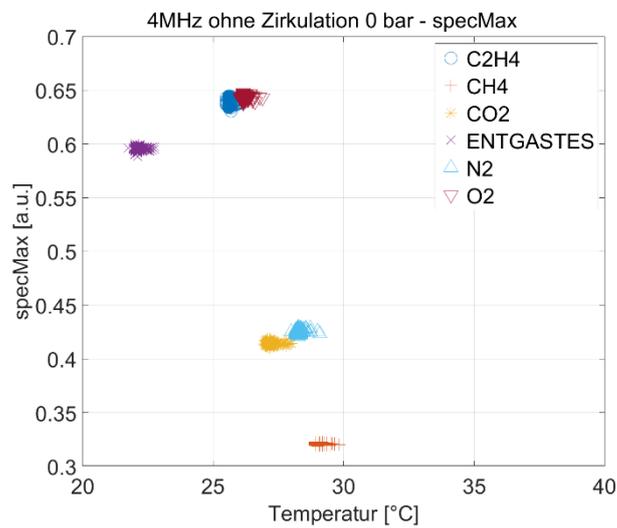


Abbildung 119: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK

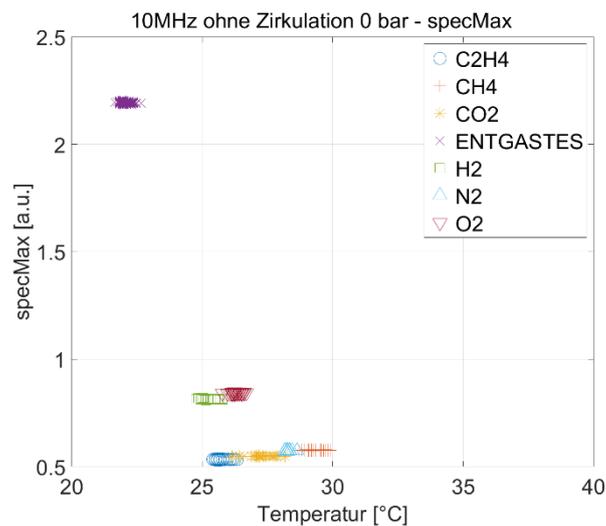


Abbildung 120: Gas: Amplitude specMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Spitzenfrequenz (specfMax)

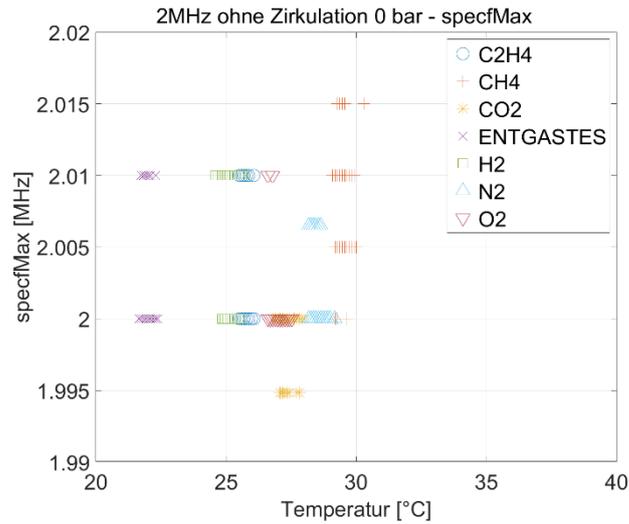


Abbildung 121: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 2 MHz USPK

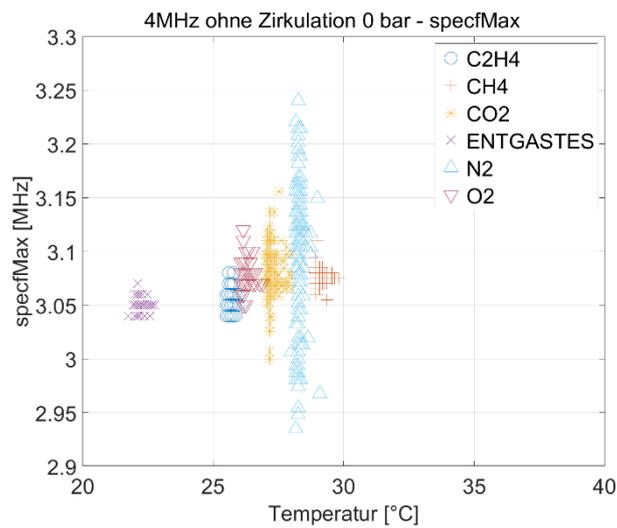


Abbildung 122: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 4 MHz USPK

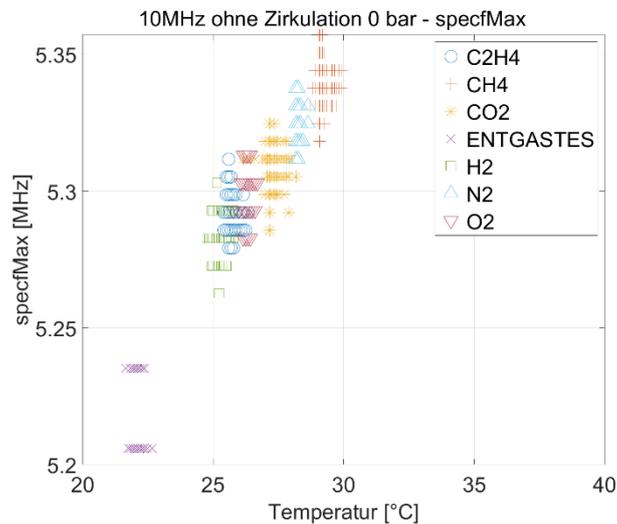


Abbildung 123: Gas: Spitzenfrequenz specfMax vs. Temperatur des 10 MHz USPK

Ergebnisse mit Säure im Isolieröl

Die Vorgehensweise bei der Darstellung von Ergebnissen der Säureuntersuchung ist in *Abbildung 124* dargestellt. Die Säureproben in den Abbildungen sind in der Legende beschrieben. Die Ergebnisse sind in vier Vergleichsmerkmale unterteilt:

Beispiel Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur:

- Ultraschallprüfkopf 2 MHz
- Ohne Zirkulation (0 bar)
- Ohne Temperaturkompensation **↔** Mit Temperaturkompensation

Alle nachfolgenden Ergebnisse entsprechen diesem Vergleichsschema.

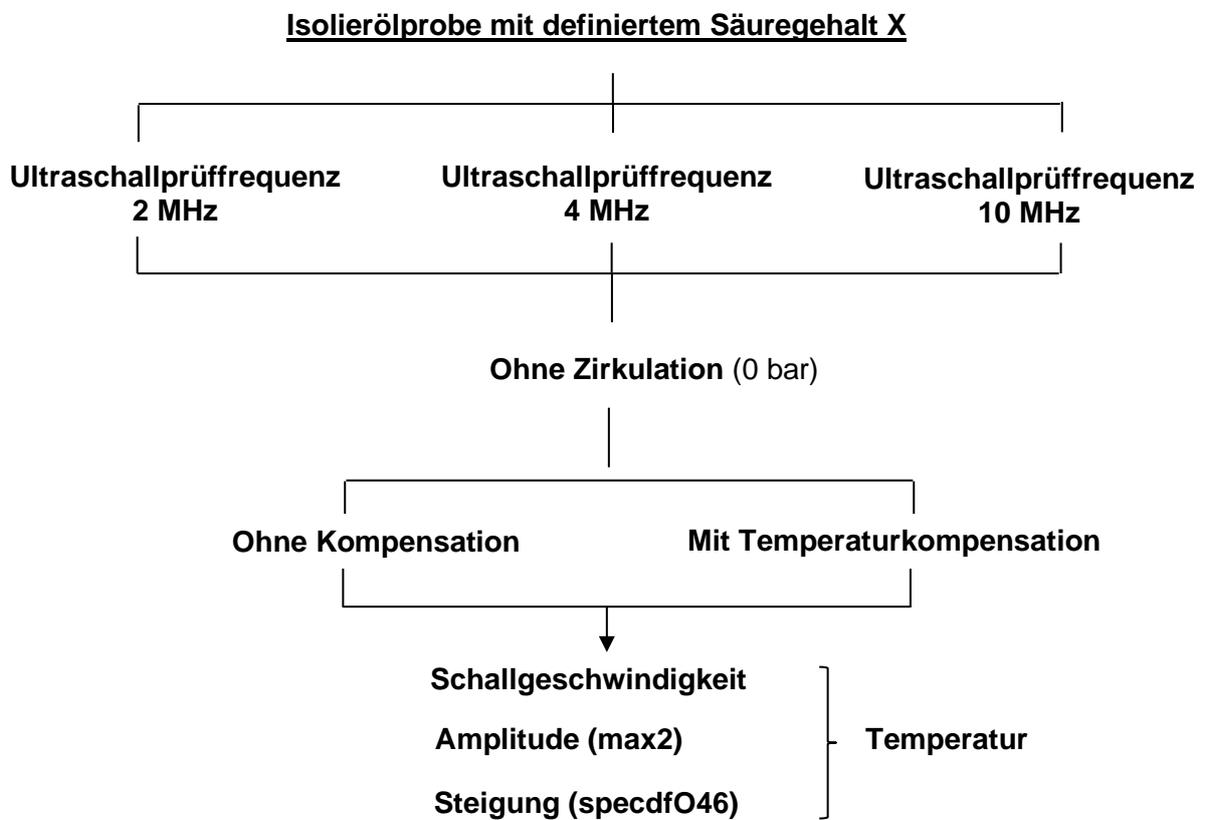


Abbildung 124: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Säureuntersuchung

Im nachfolgendem werden die Ergebnisse dargestellt. Eine Beurteilung erfolgt im Kapitel 6.5.

Schallgeschwindigkeit (rechte Darstellung mit Temperaturkompensation)

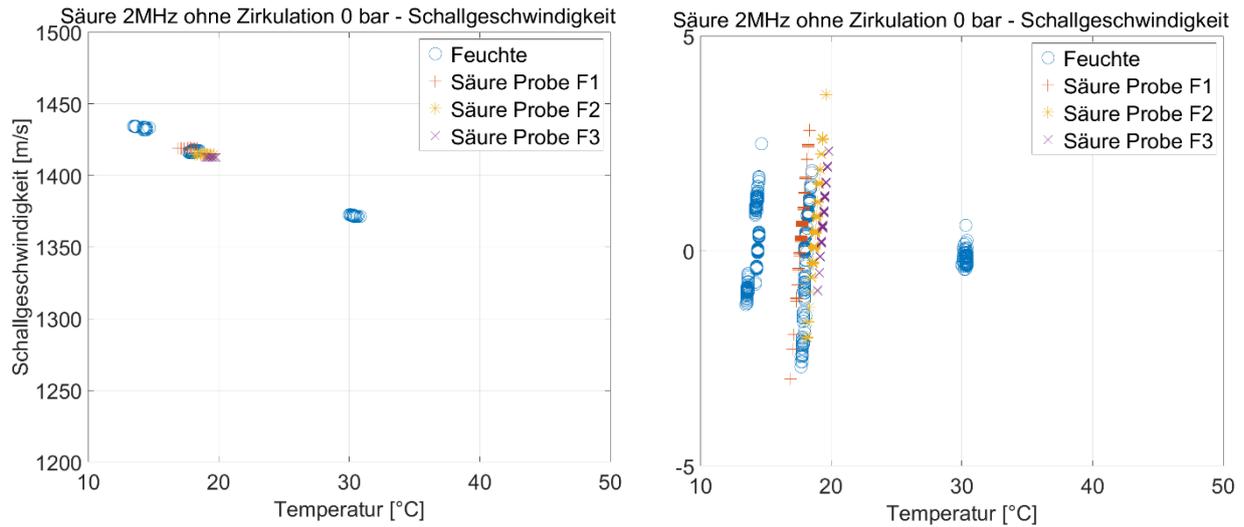


Abbildung 125: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)

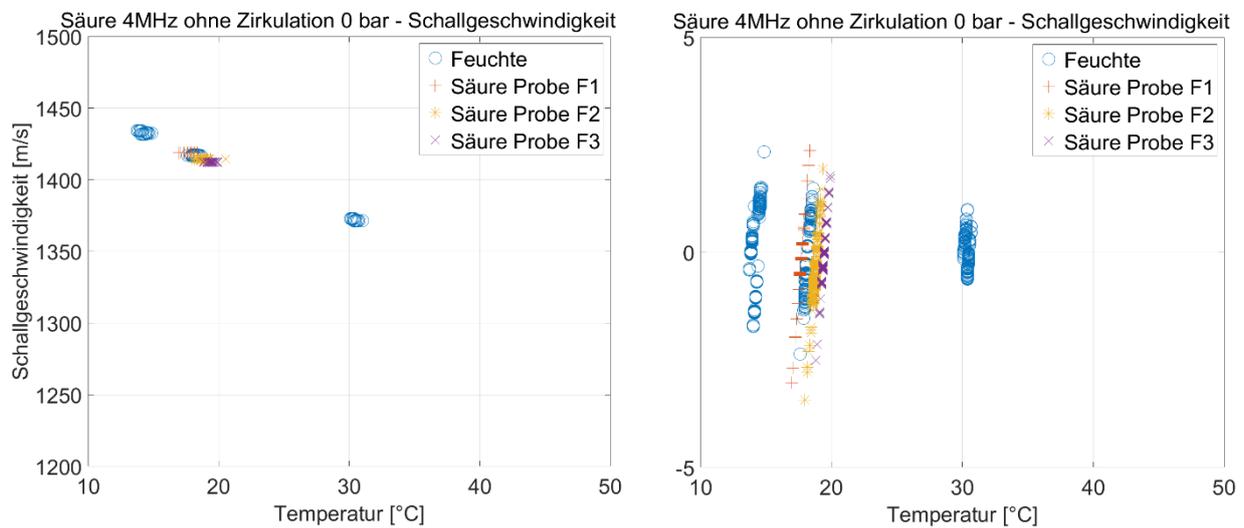


Abbildung 126: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)

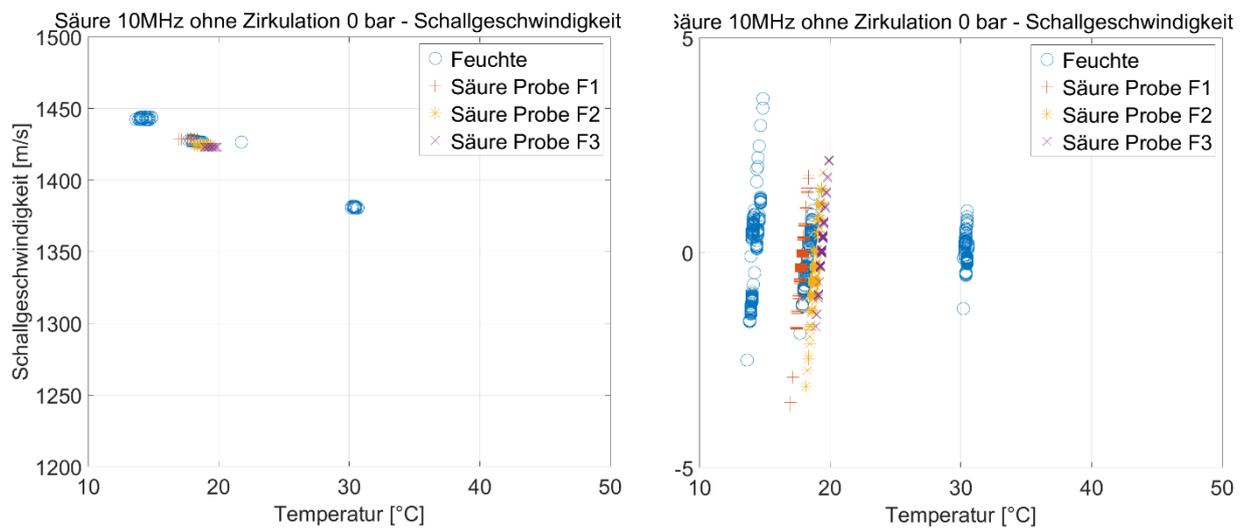


Abbildung 127: Säure: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)

Amplitude (max2 - rechte Darstellung mit Temperaturkompensation)

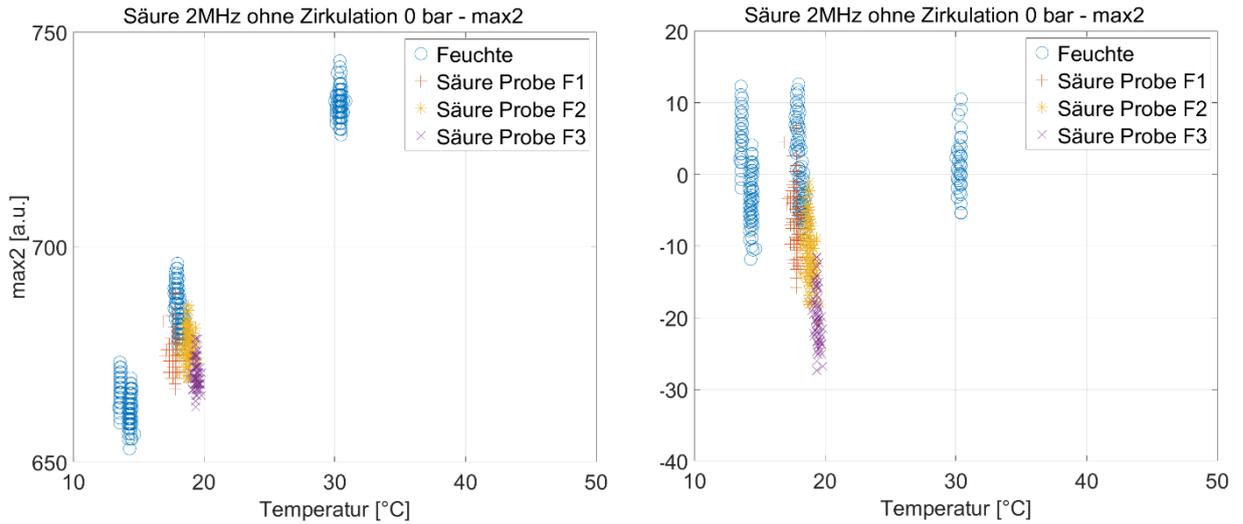


Abbildung 128: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)

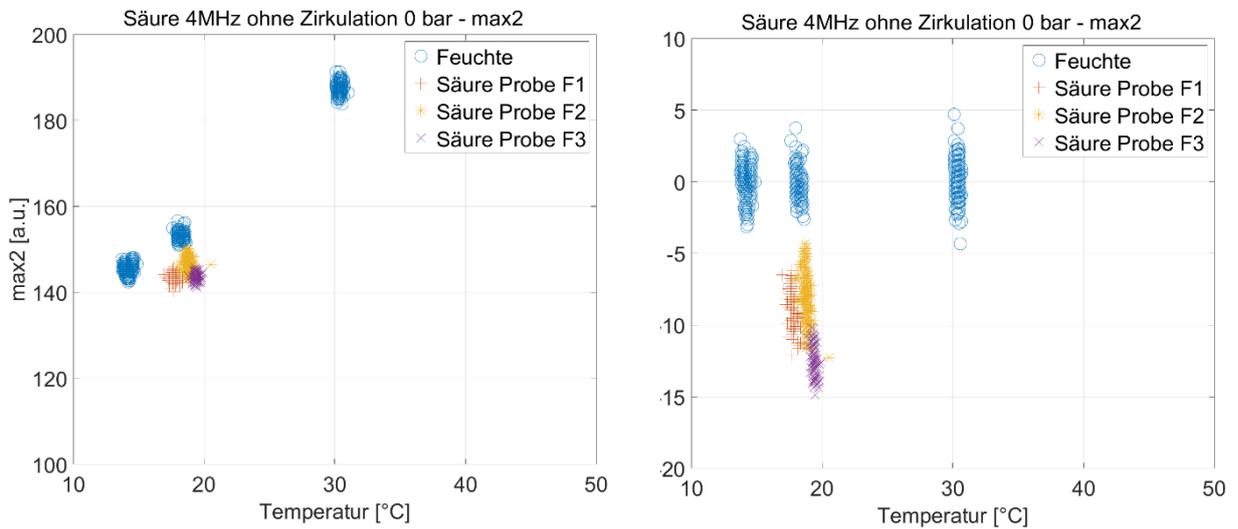


Abbildung 129: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)

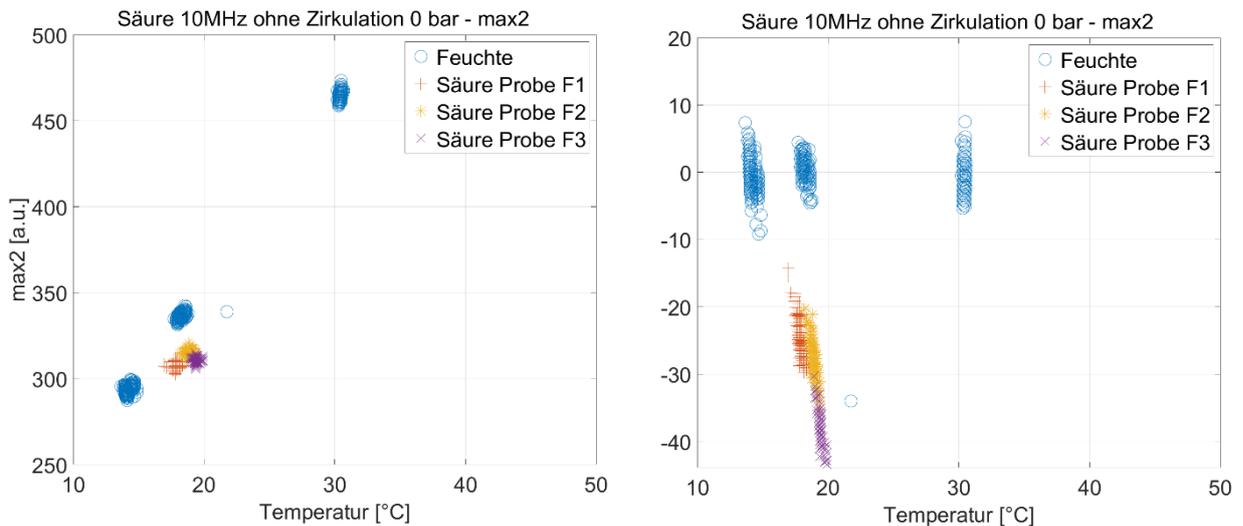


Abbildung 130: Säure: Amplitude max2 vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)

Steigung (specdfO46 - rechte Darstellung mit Temperaturkompensation)

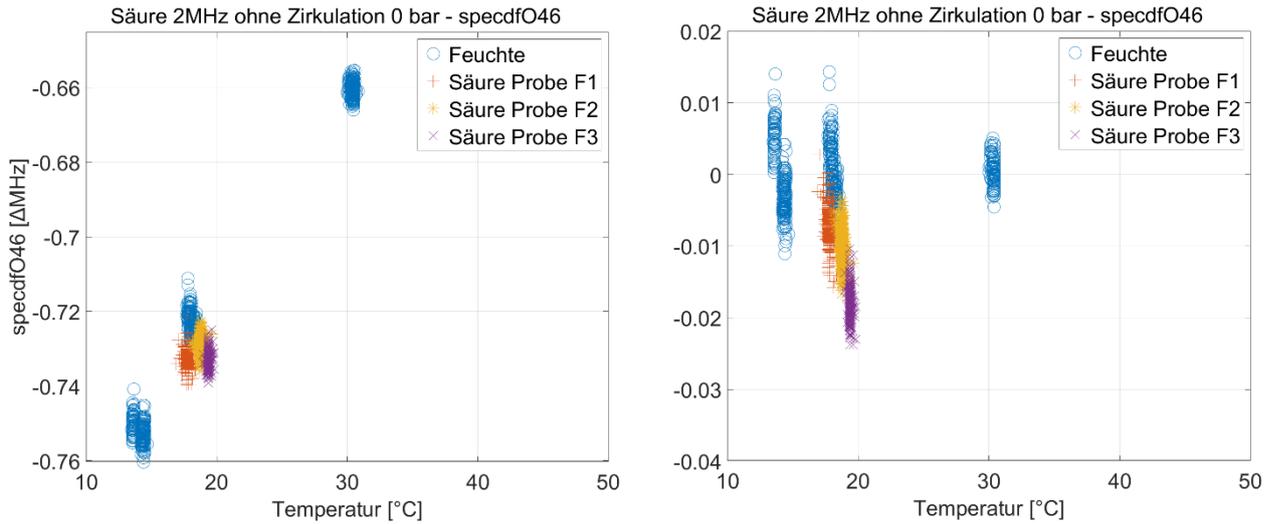


Abbildung 131: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 2 MHz USPK (rechts: TK)

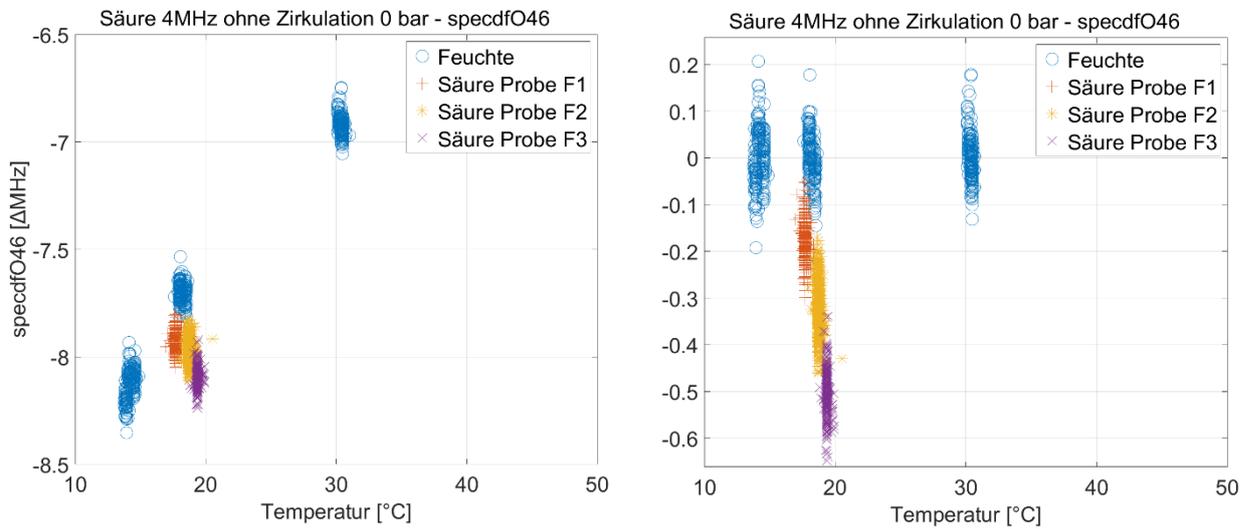


Abbildung 132: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 4 MHz USPK (rechts: TK)

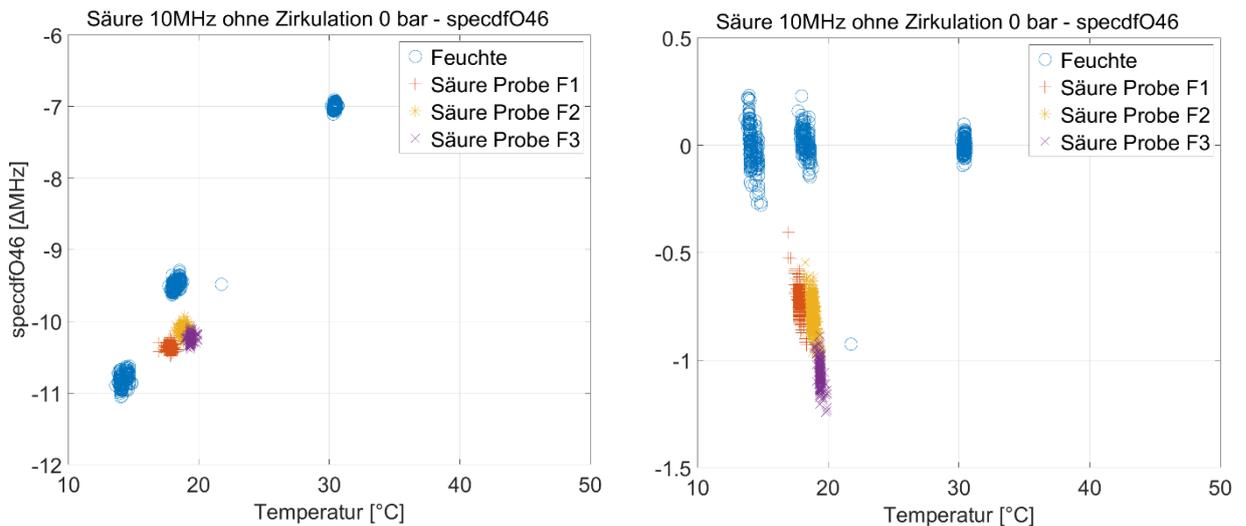


Abbildung 133: Säure: Steigung specdfO46 vs. Temperatur des 10 MHz USPK (rechts: TK)

Ergebnisse mit Feststoff im Isolieröl

Die Vorgehensweise bei der Darstellung von Ergebnissen der Feststoffuntersuchung ist in *Abbildung 134* darstellt. Die Feststoffproben in den Abbildungen sind in der Legende beschrieben. Die Ergebnisse sind in drei Vergleichsmerkmale unterteilt:

Beispiel Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur:

- Behälter 1 / 2 (*Abbildung 65*)
- Ultraschallprüfkopf 0,5 MHz
- Ohne Zirkulation (0 bar)

Alle nachfolgenden Ergebnisse entsprechen diesem Vergleichsschema.

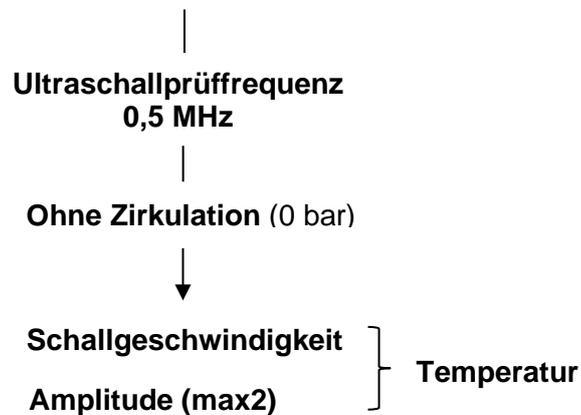
Feuchte Feststoffprobe X im Isolieröl

Abbildung 134: Vorgehensweise bei der Auswertung der Datensätze für die Feststoffuntersuchung

Im nachfolgendem werden die Ergebnisse dargestellt. Eine Beurteilung erfolgt im Kapitel 6.5.

Schallgeschwindigkeit und Amplitude max2

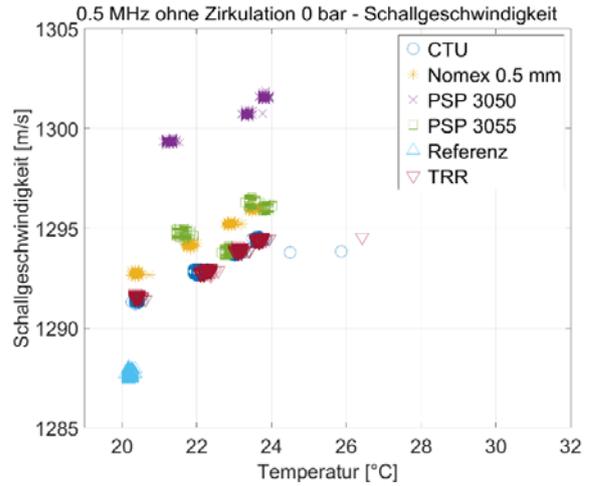
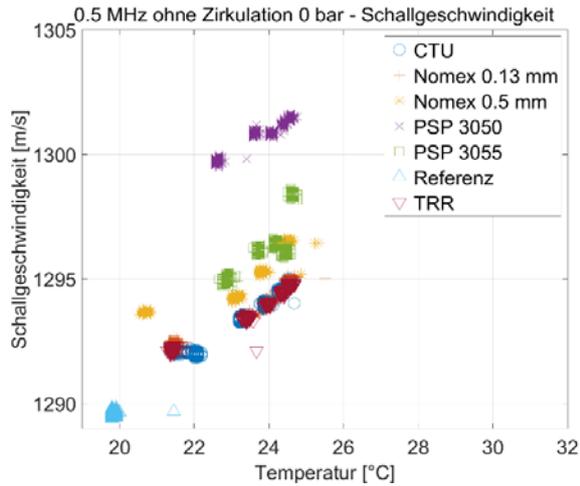


Abbildung 135: Feststoff: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (links: Behälter 1, rechts: Behälter 2)

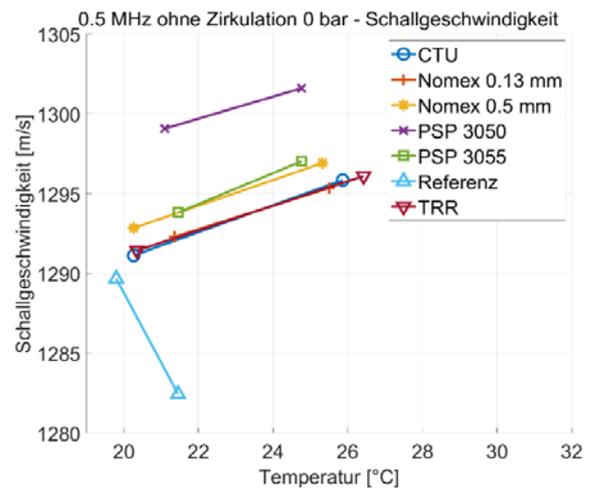
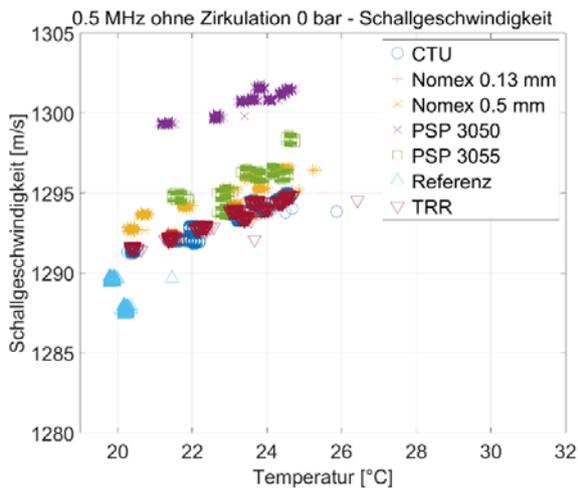


Abbildung 136: Feststoff: Schallgeschwindigkeit vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (Behälter 1 und 2 zusammen)

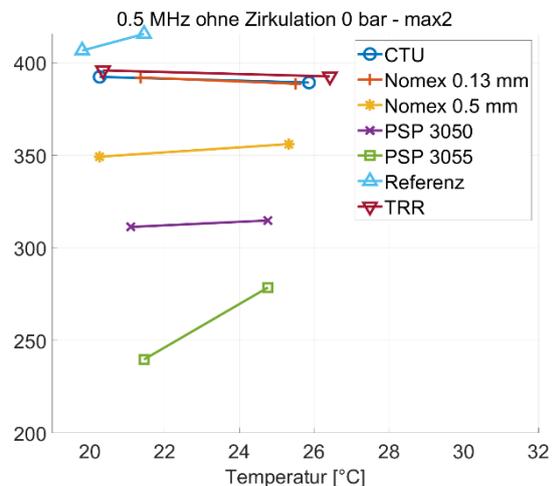
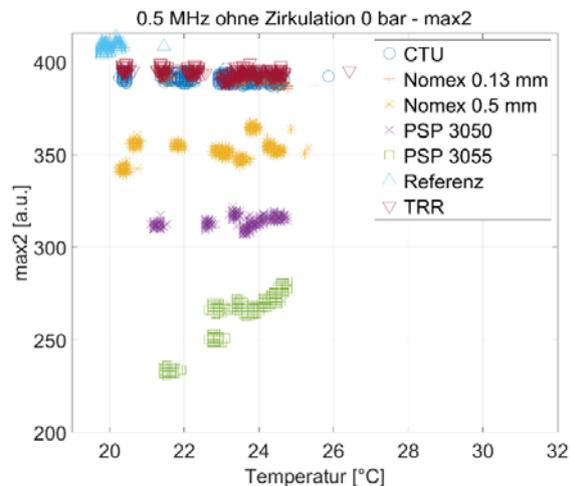


Abbildung 137: Feststoff: Amplitude max2 vs. Temperatur des 0,5 MHz USPK (Behälter 1 und 2 zusammen)

6.5 Beurteilung der Ergebnisse

Die Lebensdauer von Transformatoren wird durch die Alterung der flüssigen und festen Isoliermedien bestimmt. Alterungsprozesse wie Oxidation oder thermischer Abbau wirken sich auf die Isoliermedien unterschiedlich stark aus, führen jedoch letztendlich zu einer Verschlechterung der chemischen und dielektrischen Eigenschaften. Die Anwesenheit von Wasser in Isolierölen und der Papierisolation ist ein Problem gealterter Transformatoren, die die Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer negativ beeinflussen. Die Ultraschallvermessung von Isolierölproben bei unterschiedlichen Feuchtegraden und Temperaturstufen stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Die durchgeführten Untersuchungen und dargestellten Ergebnisse können einen Beitrag für das bessere Verständnis des Verhaltens der Ultraschallsignale in Isolierölen leisten.

Mess- und Prüfkonzept mit Materialqualifikation

In Anlehnung an einen realitätsnahen Betrieb eines Transformators mit und ohne Zirkulation des Isolieröls sowie der Möglichkeit die Betriebstemperaturen eines Transformators anzufahren, wurde für die Untersuchung ein kontinuierlicher Befeuchtungs- und Trocknungsprozess mit Temperaturregelung entwickelt. Zusätzlich wurde eine automatisierte Erfassung der Daten realisiert. Die erzielten Ergebnisse bei der Probenherstellung wurden erfolgreich mit unterschiedlichen Referenzmethoden vermessen.

Untersuchungen – Feuchtegehalt in Isolierölproben

Die Ergebnisse der Ultraschallvermessung bei Druckvariation (*Abbildung 76*) zeigen lediglich eine geringfügige Änderung der Schallgeschwindigkeit von 0,5 – 1 m/s. Die Untersuchungen mit unterschiedlichen Feuchtegraden wurden mit und ohne Zirkulation (*Abbildung 45*) durchgeführt. Des Weiteren erfolgte neben der Änderung des Feuchtegrades ebenfalls eine Variation der Temperatur (*Abbildung 39*). Bei der Betrachtung der Ergebnisse mit und ohne Zirkulation ergeben sich unterschiedliche Trends. Die Zirkulation erlaubt einerseits eine Homogenisierung der Isolierölprobe im Prüfgefäß und verursacht andererseits zusätzlich eine größere Streuung der Amplitude. Die Ergebnisse der Ultraschallvermessung mit unterschiedlichen Feuchtegraden und Temperaturstufen zeigen, dass für Prüffrequenzen ≥ 10 MHz Änderungen im Amplitudenverhalten zu verzeichnen sind (*Abbildung 87*). Durch die Übertragung eines Schallimpulses zwischen den Assoziaten können durch unterschiedliche Phänomene wie dem Einfluss des Schallfeldes, der Schwingungsform oder der Schallintensität die Ergebnisse der Ultraschallvermessung verschiedene Ausprägungen erreichen. Aus den Ergebnissen (10 MHz) ist ein Trend mit steigender Temperatur nur für bestimmte Feuchtegrade zu erkennen. Dieses Verhalten kann durch temperaturbedingte Änderung von Mengenverhältnissen verschiedener Assoziaten hervorgerufen worden sein. Eine weitere Möglichkeit stellen die Umgruppierungen von Molekülaggregaten dar, welche bis zu einer bestimmten Temperatur eine gleichmäßige Verteilung aufweisen sowie ab einer bestimmten Grenztemperatur und erhöhter aggregierter Feuchte einen veränderten Aufbau aufweisen können. Die Molekülstruktur kann einen erheblichen Anteil an solchen Ausprägungen haben, wie es bei der Schallgeschwindigkeit von Wasser im Vergleich zu den verschiedenen organischen Flüssigkeiten der Fall ist. Hier hat die Schallgeschwindigkeit als einziger Stoff einen positiven Temperaturkoeffizienten. Um eine genauere Aussage über dieses Verhalten treffen zu können, sind weitere Untersuchungen im erweiterten Frequenzbereich > 10 MHz notwendig. Es ist jedoch festzuhalten, dass sich Änderungen der Echosignale in einem bestimmten Frequenzbereich ergeben. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Messergebnisse für Messungen mit und ohne Zirkulation unterscheiden. Die Ultraschallvermessung des Abkühlungsprozesses (*Abbildung 109*) zeigt trotz eines erhöhten Streubereichs ein Trendverhalten, welches eine Abhängigkeit von den einzelnen Feuchtegraden erkennen lässt. In einem kleinen Temperaturbereich sind die Unterschiede mit Temperaturkompensation von der trockensten zu der feuchtesten Probe in dieser Messreihe erkennbar. Die Verifikation der

Daten mit weiteren Ultraschallprüffrequenzen im ausgedehnten Feuchte- und Temperaturbereich ist geplant.

Untersuchungen – Gas- und Säuregehalt sowie Feststoffproben im Isolieröl

In dieser Arbeit wurden in einem reduzierten Umfang zusätzlich weitere Alterungsparameter mittels Ultraschall untersucht. Die Herstellung der einzelnen Proben war sehr umfangreich und kompliziert, weshalb die Untersuchungen mit einer reduzierten Probenanzahl im Vergleich zu der Feuchteuntersuchung durchgeführt und untersucht werden konnten. Die Ergebnisse der Ultraschallvermessung mit Gasgehalten in einer Isolierölprobe zeigen bei einigen Gasen (*Abbildung 118 bis Abbildung 123*) ein differenziertes Verhalten im Vergleich zu einer entgasten Isolierölprobe. Die Ergebnisse der Säurebetrachtung im Isolieröl zeigen ebenfalls eine Tendenz der ausgewerteten Ultraschallparameter in Abhängigkeit des Säuregehalts (*Abbildung 128 bis Abbildung 133*). Die Ausprägung ist abhängig von der betrachteten Ultraschallprüffrequenz. Ebenso zeigen die Ergebnisse der Untersuchung mit feuchten Feststoffproben ein vom Feststofftyp abhängiges Verhalten. Dabei ist ein positiver Temperaturkoeffizient der Schallgeschwindigkeit zu erkennen. Um das Verhalten der einzelnen Alterungsparameter bei der Ultraschallvermessung verifizieren zu können, sollen zukünftig zusätzliche Untersuchungen mit größerer Probenzahl und Materialvariation durchgeführt werden.

7 AP 4: Verträglichkeit von Ultraschall im EM-Feld

Ziel ist die Recherche der Einsatzmöglichkeit des Ultraschallsensors am Transformator sowie die daraus resultierenden elektromagnetischen Beeinflussungen. Folgende Themen werden erläutert:

- Platzierung des Ultraschallprüfkopfes im Transformatorsystem
- Auswirkung elektromagnetischer Beeinflussung am Einsatzort

7.1 Platzierung des Ultraschallprüfkopfes im Transformatorsystem

Bei der Wahl des Standortes eines Ultraschallprüfkopfes am Transformator ist die gleiche Vorgehensweise wie bei der Platzierung von relativen Feuchtesensoren denkbar. Es gelten die gleichen Rahmenbedingungen, welche einen positiven oder negativen Einfluss auf das Ergebnis haben können. Aus den Cigre Untersuchungen der WG D1.52 sind einige Vorschläge für die Handhabung von Feuchtesensoren im Betrieb eines Transformators sowie dessen Platzierung vorgestellt. Die Auswirkung einer fehlerhaften Platzierung der Ultraschallprüfköpfe kann im ähnlichen Ausmaß zu fehlerhafter Erfassung von Informationen über das Isolieröl führen und die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen. Bei einer möglichen Erprobung des in dieser Arbeit vorgestellten Systems ist eine Platzierung im zirkulierenden Kreislauf außerhalb des Transformatorbessels im Bereich des Möglichen. Dabei ist, wie im [Cig18] für den Feuchtesensor festgehalten, folgendes von wesentlicher Bedeutung:

Die Vermeidung von stehendem Isolieröl und die fehlerbehaftete Erfassung von Temperaturschwankung, welche sich im sogenannten „Schatten“ des zirkulierenden Isolieröls ergeben können. Dadurch könnten Feuchtigkeitsschwankungen für den Ultraschallsensor unsichtbar werden. Deswegen ist ein direkter Ölfluss durch das Schallfeld zu bevorzugen. Im Nachfolgenden sind zwei Abbildungen dargestellt, welche diese Thematik aufgreifen und eine korrekte und fehlerhafte Platzierung anhand eines Feuchtesensors zeigen [Cig18], [Cig20].

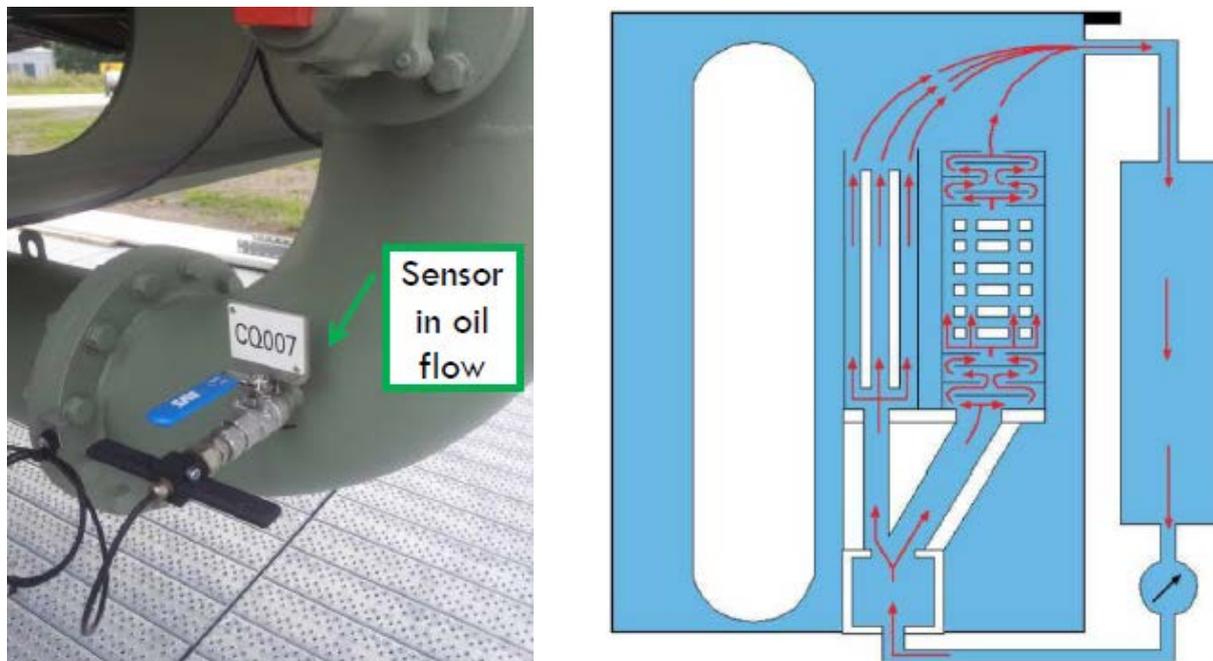


Abbildung 138: Korrekte Platzierung eines Feuchtesensors im Isolierölkreislauf eines Transformators [Cig18], [Cig20]

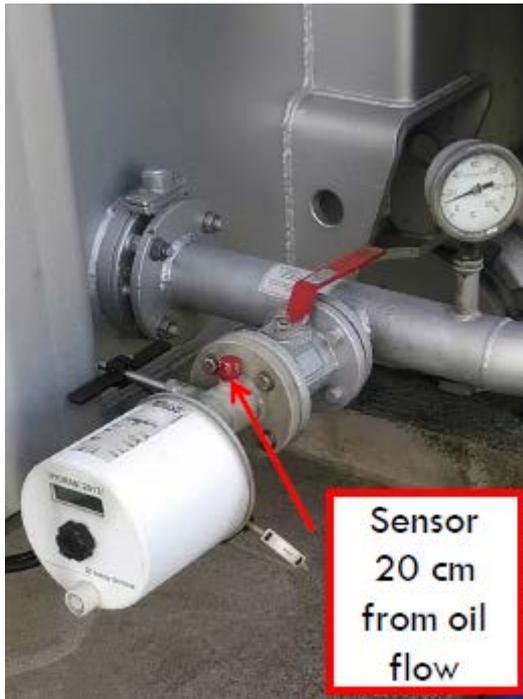


Abbildung 139: Fehlerhafte Platzierung im Isolierölkreislauf eines Transformators mit größeren Ansprechzeiten des Sensors [Cig20]

Für die Erfassung von Daten mittels eines Ultraschallprüfkopfes während eines Transformatorbetriebs wäre ein entsprechender Flansch für die Unterbringung und Montage des Sensors und des Reflektors notwendig. Ähnlich der Vorgehensweise wie bei der Konstruktion und Realisierung eines der Prüfgefäße müssten tiefere Überlegungen angestellt werden wie dieser Flansch hergestellt werden könnte, um die mess- und sicherheitstechnischen Anforderungen zu erfüllen.

7.2 Auswirkung elektromagnetischer Beeinflussung am Einsatzort

Es gilt die elektromagnetische Auswirkung auf den Ultraschallprüfkopf und die Ultraschallsensorik am Einsatzort zu beurteilen. Im vorherigen Kapitel wurde der mögliche Einsatzort des Ultraschallprüfkopfes vorgestellt. Daraus ergeben sich Überlegungen für eine elektromagnetische Beeinflussung. Im ersten Schritt ist eine Aussage über die wahrscheinlich sehr geringe Beeinflussung aufgrund der Platzierung außerhalb des Hauptkessels des Transformators möglich. Der Ultraschallprüfkopf würde in den zirkulierenden Kreislauf (i.A. an *Abbildung 138*) mit einem Flansch eingebaut, sodass die Beeinflussung gering ausfallen würde. Im zweiten Schritt sind aus der Literatur durchgeführte Untersuchungen bekannt, welche das Verhalten von Schallwellen in elektrischen und magnetischen Feldern aufzeigen sollen [Sch63]. Ergebnisse zeigen eine sehr geringe bis nicht nachweisbare Möglichkeit einer elektromagnetischen Beeinflussung. Der Verfasser weist auf eine mögliche Auswirkung hin (falls sie existiert), die bei elektrischen Feldern $\ll 25\text{m/s}$ und bei magnetischen Feldern $< 25\text{m/s}$ groß sein müsste [Sch63]. Untersuchungsgegenstand waren unterschiedliche Flüssigkeiten.

Als Folgerung lässt sich schließen, dass aufgrund der Distanz zum Kern bei der Platzierung des Ultraschallprüfkopfes und der aus der Literatur bekannten Ergebnisse, die Wahrscheinlichkeit einer Beeinflussung als sehr gering einzustufen ist.

8 AP 5: Tool zu Aufbereitung, Analyse und Auswertung der Daten

Ziel ist die Entwicklung eines Tools für die Aufbereitung, Analyse und Auswertung der gemessenen Daten. Auf die folgenden Punkte wird im Kapitel eingegangen:

- Konzept und Aufbau
- Realisierung

8.1 Konzept und Aufbau

Im Nachfolgenden ist ein kurzer schematischer Ablauf dargestellt. Im Wesentlichen werden vier Hauptbereiche unterschieden:

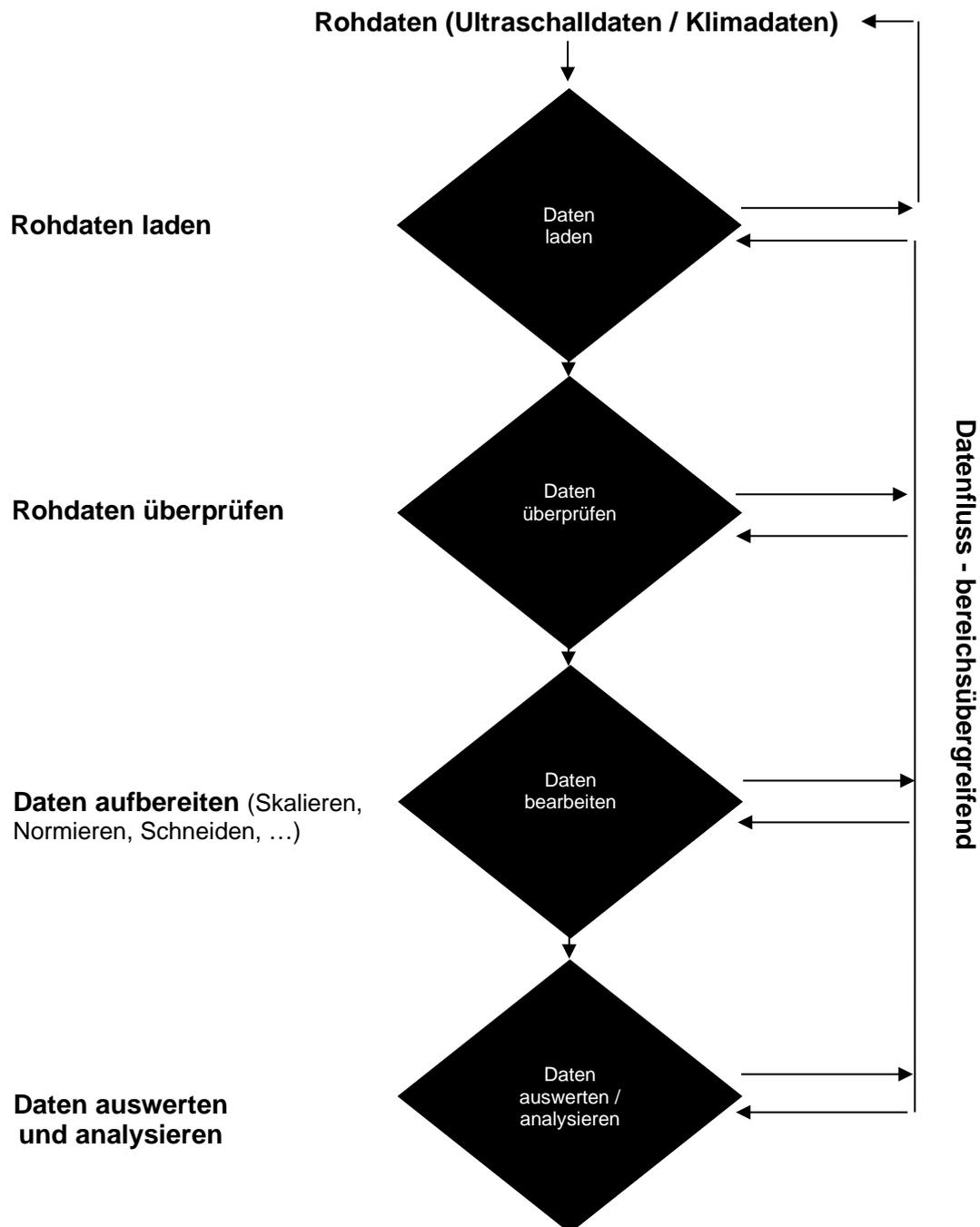


Abbildung 140: Schematischer Ablauf

Die Implementierung des vorgestellten Ablaufs wurde mittels einer GUI in Matlab realisiert. In *Abbildung 141* ist ein Ausschnitt der Benutzeroberfläche dargestellt mit einigen ausgewählten Modulbereichen.

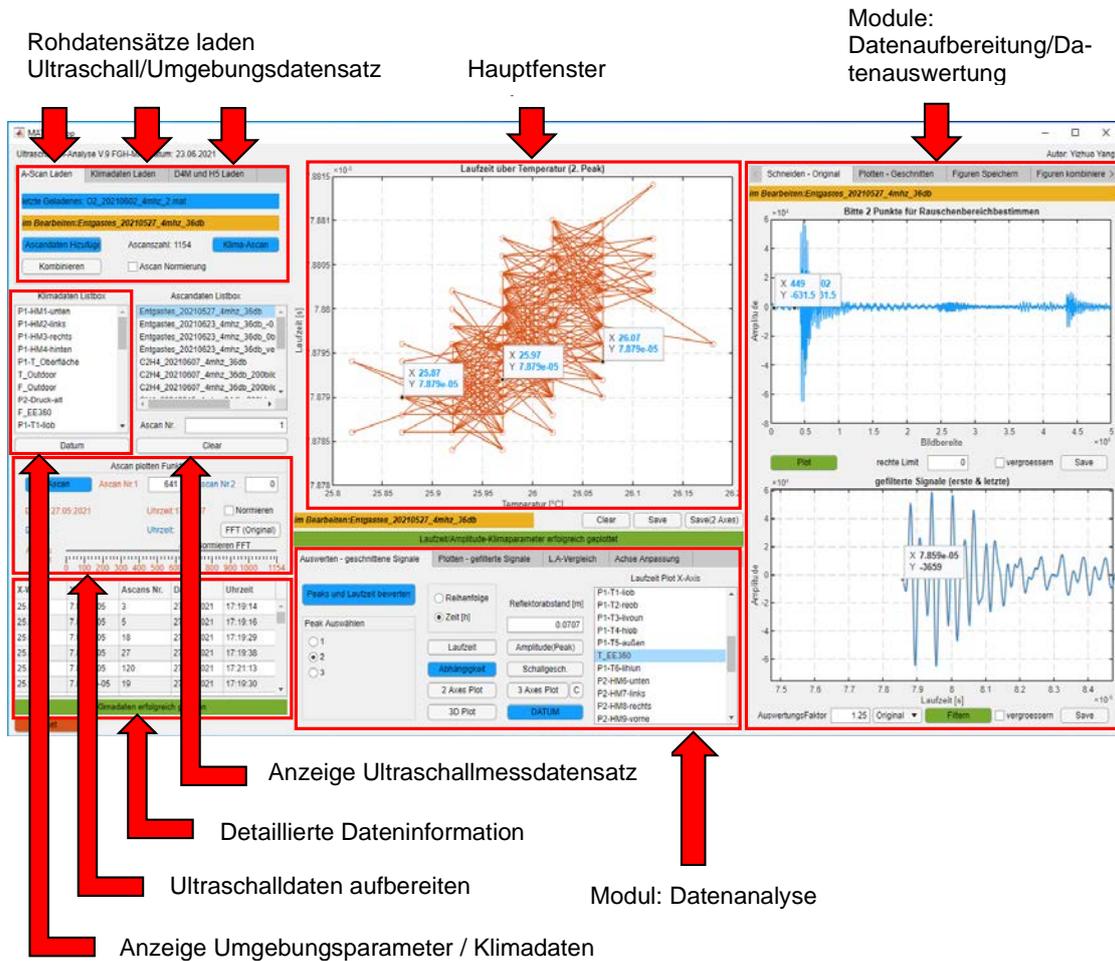


Abbildung 141: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools

Durch die Software werden die Rohdaten verarbeitet. Wichtige Ultraschallkenndaten wie z.B. Laufzeit und Amplitude werden analysiert und die Zusammenhänge zwischen den Parametern (Umgebungsparameter und Ultraschallsignal) untersucht.

8.2 Realisierung

In diesem Kapitel wird der Ablauf für die Bearbeitung eines Datensatzes anhand von *Abbildung 140* vorgestellt. Dabei sind beispielhaft Auszüge aus der Software aufgeführt, die sich in 4 Schritte unterteilt:

- Schritt 1 Rohdaten laden
- Schritt 2 Rohdaten überprüfen
- Schritt 3 Daten aufbereiten
- Schritt 4 Daten auswerten/analysieren

Schritt 1 – Rohdaten laden

Umgebungsparameter / Ultraschall

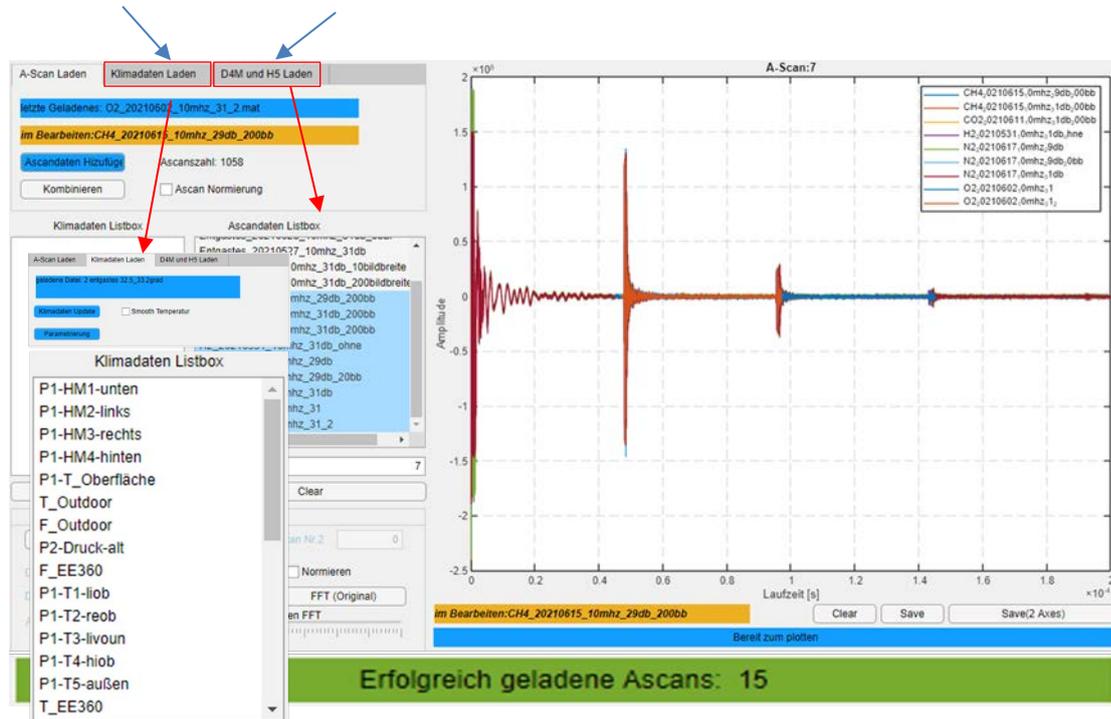


Abbildung 142: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten laden

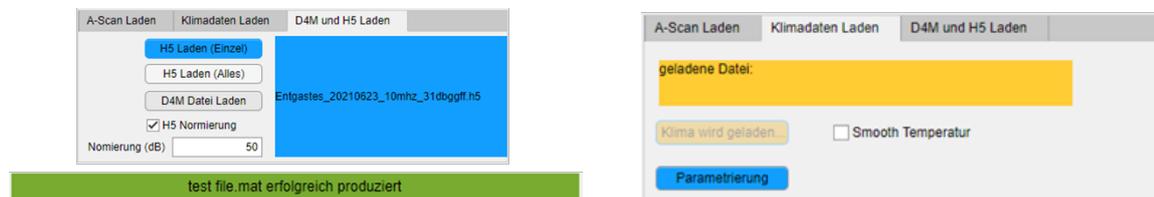


Abbildung 143: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten laden: Ultraschalldatensatz (links) und Umgebungsparameter (rechts)

Im ersten Schritt werden die Rohdaten in die GUI geladen. Wie im Kapitel 4 vorgestellt, werden die Umgebungsparameter mit einer in diesem Projekt entwickelten Software erfasst. Die gespeicherten Rohdaten können dann als Datei (.csv) in die GUI geladen werden. Die Rohdaten der Ultraschallprüfköpfe (Kapitel 4.4) werden ebenfalls als Rohdatensatz in die GUI geladen. Nach dem erfolgreichen Einlesen der Rohdaten wird automatisch eine Datei (.mat) erzeugt. Die Daten sind somit für die weitere Verarbeitung in dieser Datei sortiert und gespeichert.

Schritt 2 – Rohdaten überprüfen

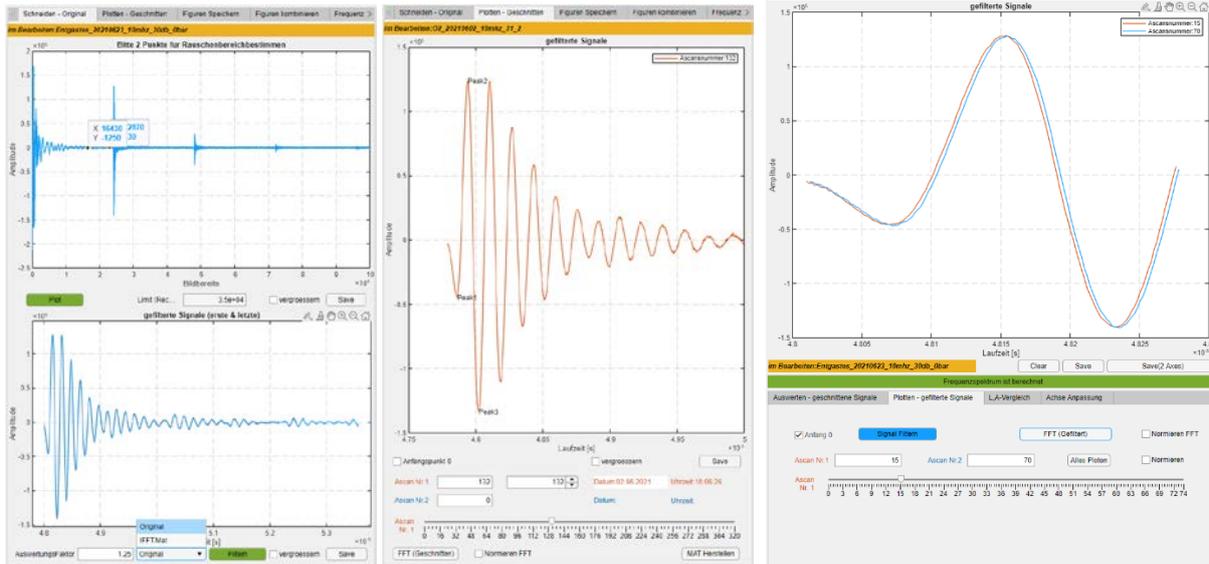


Abbildung 144: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten überprüfen

Im zweiten Schritt können die Rohdaten überprüft werden. Dabei stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, mit welchen die Kohärenz der Daten überprüft werden können. Fehlerhafter Import der Daten kann dadurch festgestellt werden.

Schritt 3 – Daten aufbereiten



Abbildung 145: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Rohdaten aufbereiten

Im dritten Schritt werden die Daten für die Auswertung aufbereitet. Dabei stehen verschiedene Module zur Verfügung. Es können z.B. bestimmte Peaks von Ultraschallsignalen gesucht und für die Auswertung der Laufzeit und der Amplitude herangezogen werden. Zeitsignale können für die Auswertung der Spektren gefiltert werden. Anschließend kann die die FFT-Datei für die gefilterten Signale erzeugt werden.

Alle erzeugten FFT-Dateien sind in den Listen angezeigt. Durch Auswählen gewünschter Dateien werden diese im Frequenzbereich betrachtet.

Schritt 4 – Daten analysieren/auswerten

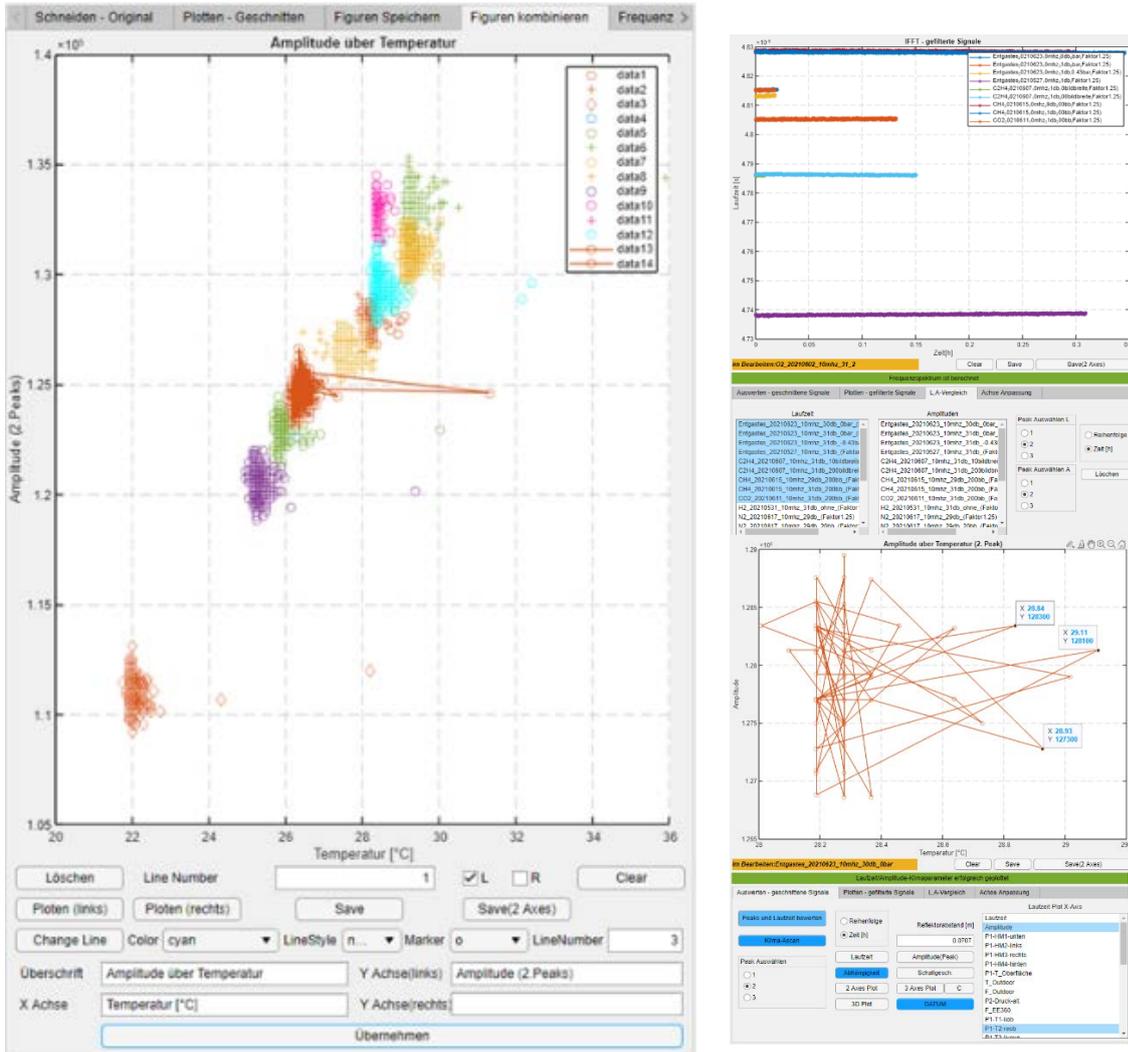


Abbildung 146: Benutzeroberfläche des entwickelten Tools – Daten analysieren/auswerten

Im vierten Schritt können die Daten ausgewertet und analysiert werden. In der *Abbildung 72* sind die unterschiedlichen Auswertungsmöglichkeiten bereits vorgestellt worden.

9 Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine einfache Betrachtung von gemessenen Ultraschallparametern nicht ausreichend ist. Einige Ultraschallgrößen wie die Schallgeschwindigkeit unterliegen einer überwiegenden Temperaturabhängigkeit. Ebenso stellt sich heraus, dass die Wahl der Prüfkopffrequenz eine Rolle bei der Auswertbarkeit und Messbarkeit von Feuchteänderungen innerhalb von Isolieröl spielt. Dennoch lässt sich bei geschickter Wahl der Prüfungsparameter und der Prüfungsbedingungen ein Potential der Ultraschalltechnologie zum Monitoring von Isolieröl zeigen. Weitere Untersuchungen sollten verifizieren, inwieweit sich das beobachtete Amplitudenverhalten für Prüffrequenzen ≥ 10 MHz für höhere Frequenzen fortsetzt. Des Weiteren müsste die Feuchte mit weiteren Alterungsprodukten wie Gas und Säure schrittweise kombiniert werden, um etwaige Trends im Verlauf der Messkurven gegeneinander zu vergleichen. Weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Isolieröltypen sollten eine Verallgemeinerung der Ergebnisse öltypübergreifend ermöglichen. Die Betrachtung weiterer Auswertungsansätze wird angestrebt. Dabei sind unter anderem intelligente, automatisierte Clustering-Algorithmen sowie Filter- und Fittingmethoden zur Eingangsdatenoptimierung denkbar.

Es wird empfohlen, die Potentiale dieses Verfahrens weiter zu verfolgen.

10 Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse

In den Fachgebieten:

- Hauptsächlichliche Nutzung in „Elektrotechnik und Hochspannungstechnik“

In den Wirtschaftszweigen:

- „Energieversorgung“

Die hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Anlagen und Netzen der elektrischen Energieübertragung stellt seit jeher einen der wichtigsten Faktoren im Bereich der Energietechnik dar. Die effiziente Gestaltung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen, für den optimalen Einsatz kostenintensiver elektrischer Betriebsmittel, erfordert effiziente Messgeräte und Auswerteverfahren für die Zustandsbestimmung. Die Entwicklung moderner Prüfverfahren für eine intelligente Zustandsbewertung von Transformatoren und Isolierölen ist daher von wesentlichem Interesse. Dabei ist die Erfassung alterungsrelevanter Parameter für die frühzeitige Planung und Durchführung vorbeugender Maßnahmen von besonderer Bedeutung.

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse sind vielfältig nutzbar. Aufgrund der hohen Anzahl an durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Feuchte- und Temperaturstufen in einem weiten Frequenzbereich ergeben sich diverse Informationen für Interessenten aus dem Branchenbereich der Isolierölanalyse und Ultraschalldiagnostik.

- Ein breites Spektrum an Auswertergebnissen von direkten Zusammenhängen zwischen akustischen Signalen und erstellten Alterungsproben
- Ergebnisse zur Feuchtebetrachtung mit relativer, absoluter und berechneter Feuchte (Verifikation der A und B Konstanten für die Umrechnung der absoluten Feuchte [Cig18])
- Ergebnisse zum Einfluss äußerer Druckbeanspruchung während der Ultraschallmessung
- Ergebnisse zur Säurebetrachtung und Ultraschallvermessung von Säuregehalt im Isolieröl
- Ergebnisse zur Gasgehaltbetrachtung und Ultraschallvermessung von Gasgehalt im Isolieröl
- Ergebnisse zur Feststoffbetrachtung und Ultraschallvermessung von feuchten Feststoffproben im Isolieröl

Der Nutzen bedeutet einerseits eine Weiterentwicklung neuer Ansätze mittels Ultraschall im Bereich der Isolierölanalyse. Andererseits bilden die durchgeführten Untersuchungen ein Nachschlagewerk für potentielle Interessenten aus dem Analysebereich. Es wurde gezeigt, dass Ultraschallvermessungen von verschiedenen Alterungsparametern in einem bestimmten Frequenzbereich ein auffälliges Verhalten zeigen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage weiterer Forschungstätigkeiten hinsichtlich der Messbarkeit des Isolierölzustands mittels Ultraschall.

Die hier ausgearbeiteten Ergebnisse leisten für die weiterführende Forschung einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung effizienter Analysediagnostik auf Basis von Ultraschallvermessungen.

11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der Zwischenergebnisse auf den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	24.04.2019 28.11.2019
2	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	17.10.2019
3	Publikation in der Fachzeitschrift EW-Magazin für Energiewirtschaft <i>MaKo 2020 ... und jetzt?</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	Januar 2020
4	Dissertationsvortrag am IAEW der RWTH (Mirnes Planic) <i>Bestimmung wichtiger Qualitätsparameter vom Isolieröl in Transformatoren mittels Ultraschallmessung</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	19.06.2020
5	Bachelorvortrag an der Hochschule Mannheim (Sven Menge) <i>Zustandsbewertung von Isolieröl mittels Ultraschall - Auswertung der Ultraschallmessung von Isolieröl mit definierten Feuchtwerten</i>	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	05.10.2020
6	Tagungsbeitrag (VDE-Fachtagung): <i>Erforschung wichtiger Einflussparameter auf die Alterung von Isolieröl in Transformatoren mittels Ultraschall</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	09.-11.11.2020
7	Vorstellung der Zwischenergebnisse auf den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	07.04.2021
8	Mastervortrag am IAEW der RWTH (Yizhuo Yang) <i>Herstellung von definierten Gasgehalten in Isolierölproben mit anschließender Untersuchung mittels Ultraschall</i>	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	15.08.2021
9	Information des FGH-Forschungsbeirates	Präsentation der ersten Ergebnisse	28.10.2021

Geplante Transfermaßnahmen:

Durch die weiterführenden Arbeiten und Prüfungen über die Projektlaufzeit hinaus, ergeben sich zusätzliche Transfermaßnahmen (s. Sitzung des PA im Frühjahr 2022).

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum	Realisierbarkeit
1	Publikation im Internet auf der FGH-Homepage	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	KW 10/2022	sehr gut
2	Vorstellung der Endergebnisse auf der Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	März/April 2022	sehr gut Termin in Absprache
3	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	28. April 2022	sehr gut
4	Abgabe der Schriftfassung und Promotionsvortrag (Mirnes Planic) am IAEW der RWTH Aachen	Information der fachlichen Öffentlichkeit	Mitte/Ende 2022	sehr gut
5	Tagungsbeitrag (VDE-Fachtagung): <i>Ultraschallbasierte Vermessung aufbereiteter Isolieröproben bei definierten Feuchte- und Temperaturstufen</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	08.11.-10.11.2022	sehr gut Kurzfassung eingereicht
6	Vorstellung des Projekts im Rahmen einer Vorlesung an der Hochschule Mannheim, Bereich/Lehrstuhl? (Aufgrund der COVID-19 Situation verschoben)	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	Ende 2022 / Anfang 2023	gut abhängig von COVID-19-Situation

12 Literaturverzeichnis

- [Alt05] Altmann; Bukvis: Beurteilung des Messmethoden für die Diagnostik der Anfeuchtung von Transformatoren, 2005
<http://www.ars-althmann.com/news.php?sb=type>
- [Alt07-1] Altmann: Wasser in gealterten Transformatoren, 2007
<http://www.ars-althmann.com/news.php?sb=date>
- [Ara07] Arakelin, V.G.; Fofana, I.: Water in oil-filled high-voltage equipment part 1: sattes, solubility and equilibrium in insulating materials, IEEE 2007
- [Ata20] Atanasova-Höhllein, I; Moisture measurement and assessment in transformer insulation – Evaluation of chemical methods and moisture capacitive sensors; Cigre Brochure 2018
- [Aut22] Drucktransmitter ifm electronic PU5415: Stand 14.02.2022
<https://www.automation24.de/drucktransmitter-ifm-electronic-pu5415;>
- [Bue05] Buerschaper, B.; Leibfried, T.: Physik des Feuchteausstauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzsichtverhaltens, Universität Karlsruhe 2005
- [Cig18] WG D1.52; Moisture measurement and assessment in transformer insulation – Evaluation of chemical methods and moisture capacitive sensors; Cigre Brochure 2018
- [Din13] DIN EN 60422 / VDE 0370-2: Isolieröle auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln – Leitlinie zur Überwachung und Wartung (IEC 60422:2013), 2013
- [Du99] Du, Y.; Zahn, M.; Lesieutre, B.C.; Mamishev, A.V.; Lindgren, S.R.: Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems, IEEE 1999
- [Ees18] EES Jürgen Scholz GmbH: EES Transformatorentechnik, Überwachung und Instandhaltung fester und flüssiger Isolierungen in Transformatoren, 2018
- [Epu22-1] Datenblatt EE381, Stand 14.02.2022
https://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee381/Datenblatt_EE381.pdf
- [Epu22-2] Datenblatt EE381 Stand 14.02.2022
https://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee360/BA_EE360_d.pdf
- [Ew17] ew: Magazin für die Energiewirtschaft; Lets write the future. Mit einem leistungsfähigeren, intelligenteren und grüneren Stromnetz, Ausgabe 6/2017
- [Fgh06] FGH e.V.: Asset-Management von Verteilungsnetzen – Komponentenverhalten und Analyse des Kostenrisikos. Technischer Bericht 299, Febr. 2006
- [Fgh13] FGH e.V.: AiF/IGF-Vorhaben 16391N: Entwicklung typspezifischer Prognosemodelle zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Betriebsmitteln im Rahmen des Asset Managements in elektrischen Verteilungsnetzen. Schlussbericht, Jan. 2013
- [Gas07] Gasser, HP.; Krause, Ch.; Prevost, T.: Water absorption of Cellulosic insulating materials used in power transformers, IEEE 2007
- [Gla09] Glasner, C.: Reinigung von Öl am Beispiel von Transformatorenöl – Praktische Ansätze und Modellierung. Universität Bochum, Dissertation, 2009
- [Hem04] Hemmer, M.: Rapsöl als Isolier- und Kühlmedium in Transformatoren. Universität Karlsruhe, Dissertation, 2004
- [Hof04] Hofmann, F.; Tenbohlen, S.: Wartungsarmut und reduzierte Alterung von Leistungstransformatoren durch Hermetikabschluß. Uni Stuttgart, 2004

- [Hon22] Hydranal Praktikum, Stand 14.02.2022
<https://lab.honeywell.com/content/dam/rc/en/resources/resource-library/hydranal-manuals/pmt-rc-661-hydranal-manual-de.pdf>
Hydranal Manual for Karl Fischer Titration, Stand 14.02.2022
<https://lab.honeywell.com/content/dam/rc/en/resources/resource-library/hydranal-manuals/pmt-rc-661-hydranal-manual.pdf>
- [Koc06-1] Koch, M.; Tenbohlen, S.: Ein neues Verfahren zur Online-Feuchtebestimmung in Leistungstransformatoren. ETG 2006
- [Koc06-2] Koch, M.; Tenbohlen, S.: Wasser in Leistungstransformatoren – Richtig messen und den Zustand beurteilen. Stuttgarter Hochspannungs- Symposium, Leinfelden, 2006
- [Koc09] Koch, M.; Krüger, M.; Tenbohlen, S.: Methoden zur Feuchtebestimmung von Transformatoren im Vergleich. Internationaler ETG-Kongress, 2009
- [Kos09] Köstinger P. Regeneration von gealtertem Isolieröl mit Fullererde. Bulletin.ch: Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, 2009
- [Kue10] Kuen, C.: Alterung von Zellulosematerialien des Öl-Papier-Isoliersystems von Leistungstransformatoren, Dissertation TU Graz 2010
- [Lel12-1] Lelekakis, N.; Martin, D.; Wijaya, J.: Ageing rate of paper insulation used in power transformers part 2: oil/paper systems with low oxygen concentration, IEEE 2012
- [Lel12-2] Lelekakis, N.; Martin, D.; Wijaya, J.: Ageing rate of paper insulation used in power transformers part 2: oil/paper systems with medium and high oxygen concentration, IEEE 2012
- [Lew02] Lewand, L.: Understanding water in transformer systems. NETA World, Spring, 2002
- [Pet22] Peters, J.; SENSORTECHNIK – Die coulometrische Karl-Fischer-Titration – Einfache und empfindliche Methode zur Wasserbestimmung. GIT Labor-Fachzeitschrift 10/2007
- [Rpo07] RP Online: AKW-Störfälle: Zusammenhang denkbar, Auszug Juni 2017:
<http://www.rp-online.de/panorama/ausland/akw-stoerfaelle-zusammenhang-denkbare-aid-1.2031552>
- [Sal22] Salzwiki: Deliqueszenzfeuchte, Stand 14.02.2022
<https://www.salzwiki.de/index.php/Deliqueszenzfeuchte>
- [Ste07] Stern: Transformator war vorgeschädigt, Auszug Juni 2017:
<http://www.stern.de/panorama/akw-kruemmel-transformator-war-vorgeschaedigt-3266678.html>
- [Rös11] Rösner, M.; Tenbohlen, S.: Online- Feuchteüberwachung der festen Isolierstoffe in Leistungstransformatoren, ETG 2004
- [Sar17] Sarfi, V.; Mohajeryami, S.; Majzoobi, A.: Estimation of water content in opower transformer using moisture dynamic measurement of its oil, IET Journals 2017
- [Sch04] Schäfer, M.; Feser, K.; Cardillo, E.: Thermisches Verhalten von Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren, Stuttgart 2004
- [Spa07] Sparling, B.; Aubin, J.: Assesing water content in insulating paper of power transformers, Electric Energy T&D Magazine 2007
- [Ten11] Tenbohlen, S.; Jovalekic, M.; Bates, L.; Szewcyk, R.: Water saturation limits and moisture equilibrium curves of alternative insulation systems, Cigre SC A2&D1 Joint Colloquium 2011
- [Vai17] Vaisala: Anwendungshinweise/Feuchte im Öl – Onlineüberwachung des Ölfeuchtegehalts in Leistungstransformatoren, 2017