

Hochschule Osnabrück

University of Applied Sciences

Fakultät

Ingenieurwissenschaften und Informatik

BACHELORARBEIT

Thema

„Untersuchung des Grenzschichtverhaltens von
elektrisch hoch belastetem ölimprägnierten
Kunstharzpressholz unter Berücksichtigung einer
Anisotropie“

vorgelegt durch

Markus Bittner

Matrikelnummer 395274

Danksagung

Die Bachelorarbeit wurde im Zeitraum zwischen März und September 2011 in der Hochschule Osnabrück im Laborbereich „Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik“ erstellt.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mir während meines Studiums und während der Bachelorarbeit zur Seite standen.

Besonders bedanke ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Michael Havekost und meinem Fachprofessor Dr.-Ing. Eckart Buckow, die mir bei der Erstellung der Arbeit wertvolle Hinweise, Rat und Ideen sowie Verbesserungsvorschläge für die Schriftfassung gegeben und damit zum Gelingen der Bachelorarbeit beigetragen haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Kröger und dem Laborassistenten Herrn Ismail Kizilbulak bedanken, die mich während der Vorbereitungs- und Prüfungsphase mit herausragenden Fachkenntnissen, Ratschlägen und mit hoher Einsatzbereitschaft unterstützt haben.

Des Weiteren danke ich einem meiner besten Freunde Jakob Böhm und dessen Eltern, die sich bereit erklärt haben, meine Bachelorarbeit gegenzulesen und mir hilfreiche Tipps gaben.

Mein allergrößter Dank gilt meinen Eltern Georg und Beate Bittner und meinen Geschwistern, die mich während meiner gesamten Studienlaufzeit in allen Situationen unterstützt und mir ein erfolgreiches Studium ermöglicht haben. Dafür möchte ich mich von ganzem Herzen bei ihnen bedanken.

Osnabrück, August 2011

Kurzfassung

Ölimprägniertes Kunstharzpressholz wird in Leistungstransformatoren der elektrischen Energieversorgung als mechanisch und thermisch hoch belastbarer Isolierstoff eingesetzt. In der vorliegenden Bachelorarbeit wird insbesondere der Einfluss der Anisotropie der Dielektrizitätszahl auf das Teilentladungs-, Gleitentladungs- und Durchschlagsverhalten untersucht.

Die Auswirkungen der Anisotropie der Dielektrizitätszahl werden experimentell und simulationstechnisch in Zusammenhang mit anderen Versuchs- bzw. Materialparametern bestimmt. Hierzu gehören die Anordnung der Elektroden, die Abrundung der Kanten der Versuchsproben, die Materialdichte, die Weite des Ölspaltes zwischen den Elektroden und dem Prüfling sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper.

Schlüsselwörter:

Anisotrope Dielektrizitätszahl, Grenzschichtverhalten, Teilentladungsverhalten, Überschlag- und Durchschlagsfestigkeit, Elektrodenanordnung, Kanteneffekt, Oberflächenbehandlung und -beschaffenheit

Abstract

Oil impregnated laminated compressed wood is used in power transformers for the electrical energy maintenance and serves as a mechanically and thermally highly stressable insulating material. This bachelor thesis deals particularly with the investigation of the influence of the anisotropy of the dielectric constant on the partial discharge, the surface discharge and the breakdown behavior.

The effects of the anisotropy of the dielectric constant can be determined experimentally and by using simulations in conjunction with other experimental and material parameters. These include the arrangement of the electrodes, the rounding of the edges of the test specimen, the density of the material, the width of the oil gap between the electrodes and the specimen as well as the surface properties of the specimen.

Keywords:

Anisotropic dielectric constant, boundary layer behavior, partial discharge behavior, flashover- and breakdown strength, electrode arrangement, edge effect, surface treatment and texture

I Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG

I	INHALTSVERZEICHNIS	I
II	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
III	TABELLENVERZEICHNIS	X
IV	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIII
1	EINLEITUNG	1
1.1	EINFÜHRUNG IN DIE THEMATIK	1
1.2	VERANLASSUNG UND PROBLEMSTELLUNG	2
1.3	ZIELE DER ARBEIT	2
1.4	AUFBAU DER ARBEIT	3
2	STAND DER TECHNIK	4
2.1	KUNSTHARZPRESSHOLZ	4
2.1.1	<i>Schichtaufbau von KP-Holz</i>	6
2.1.2	<i>Rohdichte von KP-Holz</i>	7
2.1.3	<i>Normbezeichnung von KP-Holz</i>	8
2.2	GRENZSCHICHTVERHALTEN VON FESTSTOFFEN / FLÜSSIGKEITEN.....	9
2.2.1	<i>Elektrische Beanspruchung an der Grenzschicht</i>	9
2.2.2	<i>Quer geschichtetes Dielektrikum</i>	9
2.2.3	<i>Längs geschichtetes Dielektrikum</i>	11
2.2.4	<i>Schräg geschichtetes Dielektrikum</i>	12
2.3	ANISOTROPE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHL VON ÖLIMPRÄGNIERTEM KP-HOLZ.....	13
2.4	TEILENTLADUNGEN.....	16
2.4.1	<i>Ursachen für Teilentladungen</i>	16
2.4.2	<i>Koronaentladungen</i>	16
2.4.3	<i>Innere Teilentladungen</i>	17
2.4.4	<i>Oberflächenentladungen</i>	19
2.4.5	<i>Teilentladungsquellen</i>	19
2.5	WINKELSTELLUNG	20
2.6	KANTENEFFEKT.....	21
2.7	ÖLSPALTABHÄNGIGKEIT.....	23
2.8	ROHDICHTEN	24
2.9	OBERFLÄCHENBEHANDLUNG.....	25
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	28
3.1	AUSWAHL DER PROBEKÖRPER FÜR TE UND DURCHSCHLAG.....	28
3.1.1	<i>Versuchsanordnung</i>	30
3.1.2	<i>Winkelstellung - Kanteneffekt</i>	31
3.1.3	<i>Ölspaltabhängigkeit</i>	32
3.1.4	<i>Rohdichte</i>	33
3.1.5	<i>Oberflächenbehandlung und Beschaffenheit</i>	34

3.2	GESAMTÜBERSICHT DER MESSREIHEN UND VERGLEICHE	37
3.3	AUSWAHL DER PROBEKÖRPER FÜR DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNG	37
3.4	VERSUCHSAUFBAU FÜR TE- UND DURCHSCHLAGSVERSUCHE	39
3.4.1	<i>Hochspannungserzeuger</i>	41
3.4.2	<i>Prüfbehälter und Elektrodenanordnung</i>	42
3.5	VERSUCHSAUFBAU FÜR DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNGEN	45
3.6	VERSUCHSAUFBAU ZUR MESSUNG DER „DICHTER TROCKEN“	49
3.7	TEILENTLADUNGS- UND DURCHSCHLAGSMESSEINRICHTUNG	50
3.7.1	<i>Teilentladungsmesseinrichtung</i>	50
3.7.2	<i>Durchschlagsmesseinrichtung</i>	50
3.7.3	<i>Ereignisse und Start-/ Messwerte</i>	51
3.7.4	<i>Probenvorbehandlung</i>	53
3.7.5	<i>Probenaufbereitung</i>	54
3.7.6	<i>Ölaufbereitung / Ölqualität Überwachung</i>	56
3.8	VERSUCHSERGEBNISSE	57
3.8.1	<i>Teilentladungsinterpretation</i>	58
3.8.2	<i>Beurteilungsbogen für Über- und Durchschläge</i>	61
3.8.3	<i>Messergebnisse bei der Dichteuntersuchung</i>	62
3.8.4	<i>Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung</i>	63
3.8.5	<i>TE-, Überschlagn- und Durchschlagsuntersuchungen</i>	66
4	SIMULATION	67
4.1	MODELLBILDUNG UND SIMULATION	67
4.2	VEREINFACHUNG FÜR 2D-FELDBERECHNUNGEN	67
4.3	BERÜCKSICHTIGUNG VON SCHARFEN KANTEN IN DER SIMULATION	68
4.4	GEOMETRIE-/ MODELLAUFBAU	69
4.5	SIMULATIONSERGEBNISSE	71
4.5.1	<i>Ermittlung der auftretenden elektrischen Feldstärken im Öl und im KP-Holz</i> ..	71
4.5.2	<i>Ergebnisse der Simulation - Versuchsanordnung</i>	73
4.5.3	<i>Ergebnisse der Simulation - Winkelstellung / Kanteneffekt</i>	74
4.5.4	<i>Ergebnisse der Simulation - Ölspaltabhängigkeit</i>	75
4.5.5	<i>Ergebnisse der Simulation – Rohdichte</i>	75
4.5.6	<i>Ergebnisse der Simulation – Oberflächenbehandlung und -beschaffenheit</i> ...	76
4.6	ZUSAMMENFASSUNG	76
5	INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE	77
5.1	EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKEN.....	78
5.1.1	<i>Versuchsanordnung</i>	79
5.1.2	<i>Winkelstellung / Kanteneffekt</i>	80
5.1.3	<i>Ölspaltabhängigkeit</i>	82
5.1.4	<i>Rohdichte</i>	83
5.1.5	<i>Oberflächenbehandlung- und Beschaffenheit</i>	84

5.2	ÜBERSCHLAG- UND DURCHSCHLAGSFELDTÄRKEN.....	86
5.3	EREIGNISVERTEILUNG	88
5.4	DURCHSCHLAGSVERTEILUNG RAND / MITTE	89
5.5	DURCHSCHLAGSVERTEILUNG VON DEN FASERRICHTUNGEN	91
5.6	WEIBULL- PARAMETER	92
6	ZUSAMMENFASSUNG	94
7	WEITERARBEIT UND AUSBLICK.....	95
8	LITERATURVERZEICHNIS	97
9	ANHANG	98
9.1	INHALT DER DVD	98
9.2	RÖCHLING DATENBLATT KUNSTHARZPRESSHOLZ - LIGNOSTONE®	99
9.3	GESAMTÜBERSICHT DER MESSREIHEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MATERIALVORBEHANDLUNG	100
9.4	MESSERGEBNISSE DER DICHTEN	101
9.5	MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG.....	103
9.6	MESSERGEBNISSE DER TE- UND DURCHSCHLAGSUNTERSUCHUNG	106
9.6.1	<i>Messreihe A</i>	106
9.6.2	<i>Messreihe B</i>	107
9.6.3	<i>Messreihe B.1</i>	108
9.6.4	<i>Messreihe C</i>	109
9.6.5	<i>Messreihe C.1</i>	110
9.6.6	<i>Messreihe D</i>	111
9.6.7	<i>Messreihe E</i>	112
9.6.8	<i>Messreihe F</i>	113
9.6.9	<i>Messreihe G</i>	114
9.6.10	<i>Messreihe H</i>	115
9.6.11	<i>Messreihe I</i>	116
9.6.12	<i>Messreihe J</i>	117
9.6.13	<i>Messreihe K</i>	118
9.6.14	<i>Messreihe K.1</i>	119
9.6.15	<i>Messreihe RS A</i>	120
9.6.16	<i>Messreihe RS B</i>	121
9.6.17	<i>Messreihe RS C</i>	122
9.6.18	<i>Messreihe RS D</i>	123
9.6.19	<i>Messreihe RS E</i>	124
9.7	FORMEL - DIELEKTRIZITÄTZAHL VON PARALLELEN ZUR FASERN ZUM E-FELD	125
9.8	MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRIZITÄTZAHLN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER „DICHTEN TROCKEN“	127
9.9	DIAGRAMME - WEIBULLVERTEILUNG	128
9.10	TYPENSCHILDER	147

II Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1 LÄNGSGESCHICHTETE KP-HOLZSTÄBE VOR (LINKS IM BILD) UND NACH (RECHTS IM BILD) DER IMPRÄGNIERUNG MIT TRANSFORMATOREN-ÖL	4
ABBILDUNG 2-2 VIERKANT-MUTTER AUS HOCHVERDICHTETEM KREUZGESCHICHTETEN KP-HOLZ ...	5
ABBILDUNG 2-3 DREI UNTERSCHIEDLICHE SCHICHTAUFBAUTEN VON KP-HOLZ	6
ABBILDUNG 2-4 LÄNGSGESCHICHTETES KP-HOLZ MIT UNTERSCHIEDLICHEN ROHDICHTEN P	7
ABBILDUNG 2-5 QUER GESCHICHTETES DIELEKTRIKUM ZUM ELEKTRISCHEN FELD.....	9
ABBILDUNG 2-6 FELDVERDRÄNGUNGEN IN DER HOCHSPANNUNGSTECHNIK [9].....	10
ABBILDUNG 2-7 LÄNGS GESCHICHTETES DIELEKTRIKUM ZUM ELEKTRISCHEN FELD.....	11
ABBILDUNG 2-8 SCHRÄG GESCHICHTETES DIELEKTRIKUM ZUM E-FELD	12
ABBILDUNG 2-9 VERSUCHSPROBEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN SCHNITT ZUR FASERRICHTUNG	13
ABBILDUNG 2-10 FASERRICHTUNGSABHÄNGIGE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHL AN ZWEI KP-HOLZFURNIEREN	13
ABBILDUNG 2-11 OBERFLÄCHENPLOT VOM BETRAG DER ELEKTRISCHEN FELDSTÄRKE AN EINEM ZEHN-SCHICHTIGEN LÄNGSGESCHICHTETEN KP-HOLZMODELL UNTER BERÜCKSICHTIGUNG EINER ANISOTROPIE (FARBSKALE: BLAU - NIEDRIGE FELDSTÄRKEN; ROT - HOHE FELDSTÄRKEN)	14
ABBILDUNG 2-12 LINIENPLOT VON E IM ÖL AN DER ABGESÄGTE SEITE VON LÄNGSGESCHICHTETEM KP-HOLZ MIT ABGERUNDETEN KANTEN ($R = 2 \text{ mm}$) UND DEN WINKELN 0° UND 45° ZU DEN ELEKTRODEN	15
ABBILDUNG 2-13 FELDBEANSPRUCHUNG PARALLEL UND SENKRECHT ZUR SCHICHTUNG.....	15
ABBILDUNG 2-14 KORONAENTLADUNGEN IN EINER GASISOLIERTEN SPITZE-PLATTE-ANORDNUNG BEI GERINGFÜGIGER ÜBERSCHREITUNG DER TEILENTLADUNGSEINSETZSPANNUNG (OBEN: SPITZE AN HOCHSPANNUNG, PLATTE AN ERDE. UNTEN: SPITZE AN ERDE, PLATTE AN HOCHSPANNUNG) [9].....	17
ABBILDUNG 2-15 VEREINFACHTES ERSATZSCHALTBILD DES PRÜFLINGS ZUR BESCHREIBUNG INNERER TEILENTLADUNGEN VON HOHLRÄUMEN [4]	18
ABBILDUNG 2-16 ÄUßERE SPANNUNG $U(t)$ UND HOHLRAUMSPANNUNG $U_h(t)$ OHNE TE SOWIE HOHLRAUMSPANNUNG $U_h(t)$ BEIM ZÜNDEN UND VERLÖSCHEN DER TE	18
ABBILDUNG 2-17 TE-QUELLEN IN FLÜSSIGEN (LINKS) UND FESTEN (RECHTS) STOFFEN [9]	19
ABBILDUNG 2-18 OBERFLÄCHENPLOT DES BETRAGS DER ELEKTRISCHEN FELDSTÄRKE VON ABGERUNDETEN ($R = 2 \text{ mm}$) UND SCHARFKANTIGEN KP-HOLZSTÄBEN.....	21
ABBILDUNG 2-19 LINIENPLOT VON E AN DER GRENZFLÄCHE VON SCHARFKANTIGEM ÖL/KP-HOLZ	22
ABBILDUNG 2-20 LINIENPLOT VON E AN DER GRENZFLÄCHE VON ABGERUNDETEM ÖL/KP-HOLZ ..	22
ABBILDUNG 2-21 ELEKTRISCHE FESTIGKEIT VON ÖLSPALTEN BEI 1-MINÜTIGEN 50 Hz PRÜFWECHSELSPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SPALTWEITE d [9]	23
ABBILDUNG 2-22 RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHL VON IMPRÄGNIERTEM PAPIER BZW. PRESSSPAN MIT VERSCHIEDENEN IMPRÄGNIERMITTEL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER PAPIERDICHTHE g/cm^3 [9].....	24

ABBILDUNG 2-23 ELEKTRODEN- UND PRÜFLINGSAUFBAU A.) QUERSCHNITT B.) DRAUFSICHT [12]	25
ABBILDUNG 2-24 ERGEBNISSE DER DURCHSCHLAGSUNTERSUCHUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN OBERFLÄCHENPROFILIEN	25
ABBILDUNG 2-25 LOKALE FELDBÄRKEÜBERHÖHUNGEN AN MIKROSKOPISCHEN FASERHÄRCHEN VON ÖLIMPRÄGNIERTEM KP-HOLZ	26
ABBILDUNG 2-26 FELDBILD DES BETRAGES DER ELEKTRISCHEN FELDBÄRKE E AN DER GRENZSCHICHT VON SENKRECHTEN UND PARALLEL LAUFENDEN FASERN MIT A) EIN- UND B) DREILAGIGER BEWICKLUNG DER KP-HOLZSTÄBE MIT ÖLPAPIER (ROT - HOHE FELDBÄRKEN, BLAU - NIEDRIGE FELDBÄRKEN)	27
ABBILDUNG 3-1 KP-HOLZSTÄBE DER GRÖÖE 18 x 18 x 400 MM, ABGERUNDETE KANTE (R = 2MM) (OBEN - KP 20214, UNTEN – KP 20212).....	28
ABBILDUNG 3-2 QUERSCHNITT DES STABES MIT 2 MM RADIUS.....	28
ABBILDUNG 3-3 QUERSCHNITT DES STABES OHNE RADIUS	28
ABBILDUNG 3-4 VERGLEICH DER ANZAHL DER FURNIERE MIR PARALLEL UND SENKRECHT LAUFENDEN FASERN ZUM SCHNITT VON DEN PROBEN DER MESSREIHE A, B UND C (LINKS) UND DEN RESTLICHEN PROBEN (RECHTS) MIT DER DERSELBEN QUALITÄTSSTUFE „LI /2 E3“	30
ABBILDUNG 3-5 VERGLEICH DER ROHDICHTEN VON LI /2 E3 UND MI /2 E3.....	33
ABBILDUNG 3-6 OBERFLÄCHENBESCHICHTUNG VON STÄBEN MIT PHENOLHARZ	34
ABBILDUNG 3-7 OBERFLÄCHENBESCHICHTUNG VON STÄBEN MIT ÖLPAPIER (ANSICHT SENKRECHT ZUR SCHICHTUNG)	34
ABBILDUNG 3-8 NAHAUFNAHMEN AN DER GRENZFLÄCHE VON STÄBEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN OBERFLÄCHENPROFILIEN MIT DEM STEREOMIKROSKOP	35
ABBILDUNG 3-9 VIER VARIANTEN AN KP-HOLZPLATTEN NACH DIN 7707 FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER DICHT- UND FASERRICHTUNGSABHÄNGIGEN RELATIVEN DIELEKTRIZITÄTSZAHL	37
ABBILDUNG 3-10 TELLERELEKTRODE MIT RAKOLL® FÜR DIE DIELEKTRISCHE MESSUNG	38
ABBILDUNG 3-11 ÜBERSICHT DER HOCHSPANNUNGSPRÜFANLAGE MIT BETRIEBSMITTELBEZEICHNUNG	39
ABBILDUNG 3-12 AUFBAU DER PRÜFANLAGE, A) SCHALTPLAN, B) SCHEMATISCHER AUFBAU TR = TRANSFORMATOR, L = FILTERSPULE, C _{KOPPEL} = KOPPELKONDENSATOR, C _{FILTER} = FILTERKONDENSATOR, AKV = ANKOPPLUNGSVIERPOL, P = PRÜFBEHÄLTER, C _{PRÜFLING} = PRÜFLINGSKAPAZITÄT, TE = TEILENTLADUNGS-MESSGERÄT ÜBER LWL ANGESCHLOSSEN ..	40
ABBILDUNG 3-13 300 kV PRÜFTRANSFORMATOR DER FIRMA SIEMENS.....	41
ABBILDUNG 3-14 ELEKTRODENANORDNUNG IM PRÜFBEHÄLTER (LINKS: KP-HOLZSTÄBE MIT 1 MM ÖLSPALT, RECHTS: KP-HOLZSTÄBE MIT 1 MM ÖLSPALT UND 45° WINKELSTELLUNG)	42
ABBILDUNG 3-15 TECHNISCHE ZEICHNUNG DES LINKEN PRÜFAUFBAUS (AL = ALUMINIUM, POM = POLYOXYMETHYL, PP = POLYPROPYLEN) [3]	43
ABBILDUNG 3-16 ELEKTRODEN- UND PRÜFLINGSANORDNUNG FÜR TE- UND DURCHSCHLAGSVERSUCHE.....	43
ABBILDUNG 3-17 TRANSPORTBEHÄLTER MIT VERSUCHSPROBEN IN MINERALÖL	44
ABBILDUNG 3-18 HSP-TELLERELEKTRODE UND ERDPOTENZIALELEKTRODE NACH (LINKS) UND VOR	

(RECHTS) DER PRÜFUNG	44
ABBILDUNG 3-19 ÜBERSICHT DER MESSEINRICHTUNG FÜR DIE DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNG..	45
ABBILDUNG 3-20 SCHALTPLAN DES MESSSYSTEMS VON OMICRON FÜR ϵ_r -UND TAN δ - MESSUNG	
[13].....	46
ABBILDUNG 3-21 SCHUTZRINGANORDNUNG FÜR EINE HOMOGENE ELEKTRISCHE FELDVERTEILUNG	
INNERHALB DES PRÜFVOLUMENS	47
ABBILDUNG 3-22 SCHUTZRINGELEKTRODE, GESCHÜTZTE ELEKTRODE DURCHMESSER	
VON 100 MM.....	47
ABBILDUNG 3-23 ϵ_r - UND TAN δ - MESSUNG VON KP-HOLZPLATTEN MIT ANPRESSKRAFT AN DER	
RINGFÖRMIGEN ELEKTRODE	48
ABBILDUNG 3-24 ϵ_r - UND TAN δ - MESSUNG VON KP-HOLZPLATTEN MIT ANLIEGENDER KP-	
HOLZPLATTE.....	48
ABBILDUNG 3-25 ZWISCHENLAGERUNG DER ÖLIMPRÄGNIERTEN KP-HOLZPLATTEN IN EINEM	
EXSIKKATOR.....	48
ABBILDUNG 3-26 MESSWAAGE DER FIRMA DENVER INSTRUMENT FÜR DIE GEWICHTSMESSUNG ...	49
ABBILDUNG 3-27 KP-HOLZSTAB MIT A) GEPRESSTE SEITE „PRÜFFLÄCHE BEI 90°“ UND B)	
ABGESÄGTE SEITE „PRÜFFLÄCHE BEI 0°“	51
ABBILDUNG 3-28 ABSOLUTE FEUCHTE IN PPM BEI SÄTTIGUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER	
ÖLTEMPERATUR FÜR EIN MINERALÖL MIT GERINGEM AROMATENGEGHALT (CA. 10 % UNTERE	
KURVE) UND FÜR AROMATE (100% OBERE KURVE) [9]	54
ABBILDUNG 3-29 WÄRMEOFEN.....	55
ABBILDUNG 3-30 IMPRÄGNIERUNGSANLAGE (LINKS PROBENBEHÄLTER, RECHTS ÖLBEHÄLTER)	55
ABBILDUNG 3-31 ÖLTESTER VON DER FIRMA BAUR OIL TESTER DTA.....	56
ABBILDUNG 3-32 TE-EINSATZ WEGEN NADELIMPULSE > 2 PC	59
ABBILDUNG 3-33 TE-EINSATZ WEGEN DAUER-TE > 2PC	59
ABBILDUNG 3-34 TE-EINSATZ WEGEN EINEM NADELIMPULS > 6 PC	59
ABBILDUNG 3-35 CHARAKTERISTISCHE TEILENTLADUNGSBILDER BEI BEOBACHTUNG MIT DEM	
OSZILLOSKOP SOWIE DIE PHASENLAGE UND DIE AMPLITUDENHÖHE DER STROMIMPULSE [9] 60	
ABBILDUNG 3-36 DIE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHL FÜR FELDBEANSPRUCHUNGEN AN	
PARALLELEN UND SENKRECHTEN FASERN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TROCKENEN DICHTEN..	65
ABBILDUNG 4-1 VEREINFACHUNG DER FELDBERECHNUNG VON 3D- AUF 2D-MODELLEN	67
ABBILDUNG 4-2 2D SIMULATIONSMODELLE MIT ÖLSPALT D UND DREI UNTERSCHIEDLICHEN	
WINKELSTELLUNGEN 0°, 45° UND 90° FÜR DIE FELDBERECHNUNG	69
ABBILDUNG 5-1 DEFINITION DURCHSCHLAG: RAND / MITTE, PARALLELE UND PARALLELE /	
SENKRECHTE FASERN ZUM E-FELD.....	77
ABBILDUNG 5-2 EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKEN IM KP-HOLZ: $E_{MITTEL} \pm \sigma$	78
ABBILDUNG 5-3 EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKEN IM ÖL: $E_{MITTEL} \pm \sigma$	78
ABBILDUNG 5-4 ÜBERSCHLAG- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKEN IM KP-HOLZ: $E_{ÜDPMITTEL} \pm \sigma$	86
ABBILDUNG 5-5 ÜBERSCHLAG- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKEN IM ÖL: $E_{ÜDPMITTEL} \pm \sigma$	86
ABBILDUNG 5-6 EREIGNISVERTEILUNG.....	88

ABBILDUNG 5-7 DURCHSCHLAGSVERTEILUNG RAND / MITTE.....	89
ABBILDUNG 5-8 DURCHSCHLAGSVERTEILUNG VON PARALLELEN UND SENKRECHTEN FASERN ZUM E-FELD	91
ABBILDUNG 5-9 WEIBULL - PARAMETER DER EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE VON KP-HOLZ.....	92
ABBILDUNG 5-10 WEIBULL - PARAMETER DER ÜBERSCHLAG- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE VON KP-HOLZ	92
ABBILDUNG 9-1 RÖCHLING DATENBLATT KUNSTHARZPRESSHOLZ - LIGNOSTONE®	99
ABBILDUNG 9-2 MESSERGEBNISSE DER DICHTEN VON KP-HOLZSTÄBEN.....	102
ABBILDUNG 9-3 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE A	106
ABBILDUNG 9-4 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE B	107
ABBILDUNG 9-5 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE B.1	108
ABBILDUNG 9-6 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE C	109
ABBILDUNG 9-7 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE C.1	110
ABBILDUNG 9-8 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE D	111
ABBILDUNG 9-9 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE E	112
ABBILDUNG 9-10 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE F	113
ABBILDUNG 9-11 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE G.....	114
ABBILDUNG 9-12 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE H.....	115
ABBILDUNG 9-13 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 14 AUS MESSREIHE I (DIE PROBEN 1-4 WURDEN MIT EINEM HÖHEREN STARTWERT VON 123,1 kV GESTARTET)	116
ABBILDUNG 9-14 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE J (PROBEN 1-3 WURDEN MIT EINEM HÖHEREN STARTWERT VON 123,1 kV GEPRÜFT)	117
ABBILDUNG 9-15 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE K	118
ABBILDUNG 9-16 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE K.1	119
ABBILDUNG 9-17 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 30 AUS MESSREIHE RS A	120
ABBILDUNG 9-18 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 30 AUS MESSREIHE RS B	121
ABBILDUNG 9-19 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 30 AUS MESSREIHE RS C	122
ABBILDUNG 9-20 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE RS D (KEINE AUSSAGE ÜBER PROBE 3 – WEGEN DOPPELTER SPANNUNGSSTUFE WURDE ABGEBROCHEN)	123
ABBILDUNG 9-21 EREIGNISEINSATZSPANNUNG DER PROBEN 1 BIS 15 AUS MESSREIHE RS E	124
ABBILDUNG 9-22 KREUZGESCHICHTETES MATERIAL (LINKS) MIT EINER ANDEREN ORDNUNG VON SENKRECHTEN UND PARALLELEN FASERN ZUM E-FELD (RECHTS) BEI DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG.....	125
ABBILDUNG 9-23 IDEALES ERSATZSCHALTBILD MIT DER GESAMTKAPAZITÄT C_K AUS KREUZGESCHICHTETEM KP-HOLZ UND C_S FÜR SENKRECHTE FASERN UND C_P FÜR PARALLELE FASERN ZUM E-FELDVEKTOR	125
ABBILDUNG 9-24 DIE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GETROCKNETEN DICHTEN VON KREUZGESCHICHTETEM KP-HOLZ (ROTER KURVENVERLAUF) UND KP-HOLZ MIT EINER FELDBEANSPRUCHUNG SENKRECHT ZUR FASER (BLAUER KURVENVERLAUF).....	127

ABBILDUNG 9-25 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE A	128
ABBILDUNG 9-26 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE A	128
ABBILDUNG 9-27 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE B	129
ABBILDUNG 9-28 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE B	129
ABBILDUNG 9-29 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE B.1	130
ABBILDUNG 9-30 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE B.1	130
ABBILDUNG 9-31 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE C	131
ABBILDUNG 9-32 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE C	131
ABBILDUNG 9-33 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE C.1	132
ABBILDUNG 9-34 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE C.1	132
ABBILDUNG 9-35 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE D	133
ABBILDUNG 9-36 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE D	133
ABBILDUNG 9-37 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE E	134
ABBILDUNG 9-38 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE E	134
ABBILDUNG 9-39 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE E	135
ABBILDUNG 9-40 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE F	135
ABBILDUNG 9-41 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE G	136
ABBILDUNG 9-42 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE G	136
ABBILDUNG 9-43 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE H	137
ABBILDUNG 9-44 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE H	137
ABBILDUNG 9-45 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE I	138
ABBILDUNG 9-46 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE I	138
ABBILDUNG 9-47 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE J	139
ABBILDUNG 9-48 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE J	139
ABBILDUNG 9-49 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE K	140
ABBILDUNG 9-50 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDESTÄRKE	
MESSREIHE K	140
ABBILDUNG 9-51 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDESTÄRKE MESSREIHE K.1	141

ABBILDUNG 9-52 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE K.1	141
ABBILDUNG 9-53 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE MESSREIHE RS A.....	142
ABBILDUNG 9-54 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE RS A	142
ABBILDUNG 9-55 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE MESSREIHE RS B.....	143
ABBILDUNG 9-56 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE RS B	143
ABBILDUNG 9-57 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE MESSREIHE RS C	144
ABBILDUNG 9-58 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE RS C	144
ABBILDUNG 9-59 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE MESSREIHE RS D	145
ABBILDUNG 9-60 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE RS D	145
ABBILDUNG 9-61 WEIBULLVERTEILUNG – EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE MESSREIHE E	146
ABBILDUNG 9-62 WEIBULLVERTEILUNG – ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE MESSREIHE RS E	146
ABBILDUNG 9-63 TYPENSCHILD VOM SIEMENS 300 kV PRÜFTRANSFORMATOR	147
ABBILDUNG 9-64 TYPENSCHILD VOM KOPPELKONDENSATOR DER FIRMA HIPOTRONICS	147
ABBILDUNG 9-65 TYPENSCHILD VOM FILTERKONDENSATOR DER FIRMA HIGH VOLT	148
ABBILDUNG 9-66 TYPENSCHILD VOM TRANSFORMATOREN-ÖL SHELL DIALA ÖL GETROCKNET.....	148
ABBILDUNG 9-67 TYPENSCHILD VOM NETZ-TRENNTRANSFORMATOR FÜR DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNG.....	148
ABBILDUNG 9-68 TYPENSCHILD VOM HOCHSPANNUNGSTRANSFORMATOR DER FIRMA TAUSCHER HIGH VOLTAGE TRANSFORMATOR FÜR DIE DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNG	149
ABBILDUNG 9-69 TYPENSCHILD VOM REFERENZKONDENSATOR DER FIRMA VETTINER FÜR DIE DIELEKTRISCHE UNTERSUCHUNG.....	149

III Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1 BEZIEHUNGSSCHLÜSSEL NACH NEUER NORM IEC 61061-1 [7]	8
TABELLE 2-2 BEZIEHUNGSSCHLÜSSEL NACH ALTER NORM DIN 7707 [1]	8
TABELLE 2-3 EINSATZFELDSTÄRKEN KURZ VOR DEM DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM KP-HOLZ OHNE BERÜCKSICHTIGUNG EINER ANISOTROPIE [11].....	20
TABELLE 3-1 MESSREIHEN-ÜBERSICHT FÜR DIE VERSUCHSANORDNUNG (KURZE HELLGRÜNE E- FELDVEKTOREN KENNZEICHNEN 0 MM ÖLSPALT, LANGE 1 MM ÖLSPALT)	30
TABELLE 3-2 MESSREIHEN-ÜBERSICHT FÜR DIE WINKELSTELLUNG - KANTENEFFEKT, *KEINE GENAUE ANGABE ZUM ZUSTAND DER OBERFLÄCHE MÖGLICH, (HELLGRÜNE E-FELDVEKTOREN KENNZEICHNEN 1 MM ÖLSPALT, DUNKELGRÜNE 2 MM ÖLSPALT)	31
TABELLE 3-3 MESSREIHEN-ÜBERSICHT FÜR DIE ÖLSPALTABHÄNGIGKEIT (HELLGRÜNE E-FELDVEKTOREN KENNZEICHNEN 1 MM ÖLSPALT, DUNKELGRÜNE 2 MM ÖLSPALT)	32
TABELLE 3-4 MESSREIHEN-ÜBERSICHT FÜR DIE ROHDICHTE (HELLGRÜNE E-FELDVEKTOREN KENNZEICHNEN 1 MM ÖLSPALT, DUNKELGRÜNE 2 MM ÖLSPALT)	33
TABELLE 3-5 MESSREIHEN-ÜBERSICHT FÜR OBERFLÄCHENBEHANDLUNG UND BESCHICHTUNG (HELLGRÜNE E-FELDVEKTOREN KENNZEICHNEN 1 MM ÖLSPALT)	36
TABELLE 3-6 BEURTEILUNGSBOGEN FÜR ÜBER- UND DURCHSCHLAG	61
TABELLE 3-7 MESSERGEBNISSE DER DICHTEN KP-HOLZSTÄBE IM TROCKENEN ZUSTAND.....	62
TABELLE 3-8 MESSERGEBNISSE DER DICHTEN VON KP-HOLZPLATTEN IM TROCKENEN ZUSTAND.....	62
TABELLE 3-9 GEMESSENE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHLEN VON KP-HOLZPLATTEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GETROCKNETEN DICHTEN.....	63
TABELLE 3-10 GEMESSENE UND BERECHNETE RELATIVE DIELEKTRIZITÄTSZAHLEN VON KP- HOLZPLATTEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GETROCKNETEN DICHTEN VON PARALLELEN FASERN ZUM E-FELD.....	64
TABELLE 3-11 ERGEBNIS DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG VON ÖLIMPRÄGNIERTEM PHENOLHARZ.....	66
TABELLE 4-1 MAX. E AN SCHARFEN ECKEN UND KANTEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN DISKRETISIERUNGSSTUFEN	68
TABELLE 4-2 DIE RELATIVEN DIELEKTRIZITÄTSZAHLEN VON ALLEN MATERIALIEN IN DER SIMULATION.....	70
TABELLE 4-3 MESSERGEBNISSE DER TE-, ÜBERSCHLAG- UND DURCHSCHLAGSUNTERSUCHUNG..	70
TABELLE 4-4 DER VERLAUF DES BETRAGES DER ELEKTRISCHEN FELDSTÄRKE E AN DER GRENZSCHICHT ÖL/KP-HOLZ IM ÖL UND IM MATERIAL (ROTE PUNKTE ZEIGEN DEN GEWÄHLTEN FELDSTÄRKEWERT, AUS DEN GRÜNEN PUNKTEN WIRD DER MITTELWERT GEBILDET).....	72
TABELLE 4-5 MAX. E FÜR DEN EREIGNISEINSATZ, ÜBER- UND DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM	

MATERIAL - VERSUCHSANORDNUNG	73
TABELLE 4-6 MAX. E FÜR DEN EREIGNISEINSATZ, ÜBER- UND DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM MATERIAL – WINKELSTELLUNG / KANTENEFFEKT (* DIE HOHEN FELDSTÄRKEBETRÄGE ENTSTEHEN GENAU IN DER NÄHE DER ECKE DURCH DIE FELDBERECHNUNG).....	74
TABELLE 4-7 MAX. E FÜR DEN EREIGNISEINSATZ, ÜBER- UND DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM MATERIAL – ÖLSPALTABHÄNGIGKEIT.....	75
TABELLE 4-8 MAX. E FÜR DEN EREIGNISEINSATZ, ÜBER- UND DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM MATERIAL – ROHDICHTE	75
TABELLE 4-9 MAX. E FÜR DEN EREIGNISEINSATZ, ÜBER- UND DURCHSCHLAG IM ÖL UND IM MATERIAL – OBERFLÄCHENBEHANDLUNG UND -BESCHAFFENHEIT	76
TABELLE 5-1 EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE E_{MITTEL} – VERSUCHSANORDNUNG; SCHARFE (S) UND ABGERUNDETE (A) KANTEN (ELEKTRODENANORDNUNG: ROT - ANLIEGEND; BLAU - 1 MM ÖLSPALT).....	79
TABELLE 5-2 EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE E_{MITTEL} – WINKELSTELLUNG / KANTENEFFEKT; SCHARFE (S) UND ABGERUNDETE (A) KANTEN; (1 MM ÖLSPALT, WINKELSTELLUNG: ROT – 0°; BLAU – 45°)	80
TABELLE 5-3 EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE E_{MITTEL} – ÖLSPALTABHÄNGIGKEIT; SCHARFE (S) UND ABGERUNDETE (A) KANTEN (ÖLABSTAND: ROT – 1 MM, BLAU – 2 MM)	82
TABELLE 5-4 EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE E_{MITTEL} – ROHDICHTE, 1 MM ÖLABSTAND, ABGERUNDETES MATERIAL (GRÜN „MESSREIHE K“ - OBERFLÄCHENPROFIL UNBEKANNT).....	83
TABELLE 5-5 EREIGNISEINSATZFELDSTÄRKE E_{MITTEL} – OBERFLÄCHENBEHANDLUNG UND – BESCHAFFENHEIT, 1 MM ÖLABSTAND; SCHARFE (S) UND ABGERUNDETE (A) KANTEN; (R = PHENOLHARZ, P = ÖLPAPIER, K = SCHLEIFPAPIER DER KÖRNUNG)	84
TABELLE 9-1 INHALT DER DVD.....	98
TABELLE 9-2 GESAMTÜBERSICHT DER MESSREIHEN	100
TABELLE 9-3 VERGLEICH DER MESSREIHEN MIT DEREN GEGEBENHEITEN.....	100
TABELLE 9-4 MESSERGEBNISSE DER DICHTEN VON KP-HOLZPLATTEN	101
TABELLE 9-5 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE A.2.P ...	103
TABELLE 9-6 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE A.2.P.S	103
TABELLE 9-7 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE A.2.S ...	103
TABELLE 9-8 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE A.1.S ...	104
TABELLE 9-9 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE A.1.K ...	104
TABELLE 9-10 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE B.1.S.	104
TABELLE 9-11 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE B.1.K.	105
TABELLE 9-12 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE C.1.S.	105
TABELLE 9-13 MESSERGEBNISSE DER DIELEKTRISCHEN UNTERSUCHUNG AN MESSREIHE C.1.K.	105
TABELLE 9-14 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE A.....	106
TABELLE 9-15 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE B.....	107

TABELLE 9-16 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE B.1	108
TABELLE 9-17 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE C	109
TABELLE 9-18 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE C.1	110
TABELLE 9-19 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE D	111
TABELLE 9-20 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE E	112
TABELLE 9-21 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE F	113
TABELLE 9-22 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE G	114
TABELLE 9-23 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE H	115
TABELLE 9-24 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE I	116
TABELLE 9-25 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE J	117
TABELLE 9-26 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE K	118
TABELLE 9-27 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE K.1	119
TABELLE 9-28 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE RS A	120
TABELLE 9-29 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE RS B	121
TABELLE 9-30 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE RS C	122
TABELLE 9-31 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE RS D	123
TABELLE 9-32 EREIGNISEINSATZ-, ÜBER- UND DURCHSCHLAGSFELDSTÄRKE IM ÖL UND IM KP-HOLZ MESSREIHE RS E	124

IV Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AKV	Ankopplungsvierpol
Al	Aluminium
C	Kapazität
DP	Durchschlag an Probe
DV	Durchschlag an der Versuchsanordnung
E	Betrag des elektrischen Feldes
E-Feld	Elektrisches Feld
EMP	Elektromagnetischer Impuls
HSP	Hochspannung
KP-Holz	Kunstharzpressholz
LWL	Lichtwellenleitung
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
$\tan \delta$	Verlustfaktor
TE	Teilentladungen
TZ	Technische Zeichnung
U	Spannung
ÜG	Überschlag an der glatten bzw. gepressten Seite
ÜR	Überschlag an der rauhen bzw. abgesägten Seite
δ	Ausfallwahrscheinlichkeit
ϵ_K	Relative Dielektrizitätszahl von kreuzgeschichtetes Material
ϵ_P	Relative Dielektrizitätszahl von parallelen Fasern zum E-Feld
ϵ_r	Relative Dielektrizitätszahl
ϵ_S	Relative Dielektrizitätszahl von senkrechten Fasern zum E-Feld
ρ	Rohdichte
$\rho_{(\text{Trocken})}$	Dichte im trockenen Zustand

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

In der elektrischen Energieversorgung kommen ölgefüllte Leistungstransformatoren zum Einsatz, die eine verlustarme und wirtschaftliche Energieübertragung über weite Strecken erlauben. Für die Isolierung der hochspannungsführenden Teile kommen feste und flüssige Isolierstoffe in Frage. Als feste Isolierstoffe werden Materialien, wie z.B. Kunstharzpressholz (KP-Holz), Papier, Pressspan oder Faserstoffe aus Aramid (Nomex[®]) verwendet. Flüssige Isolierstoffe dienen als Erstes der Imprägnierung der festen Stoffe. Die Imprägnierung der festen auf Zellulose basierenden Isolierstoffe gewährleistet hohe elektrische Festigkeit. Ein weiterer Grund für den Einsatz von flüssigen Isoliermaterialien liegt in dem Abtransport der Verlustleistung in Form von der Wärme. Lang anhaltende Betriebstemperaturen über 90°C führen zu einer schnellen Alterung von zellulosehaltigen Isolierstoffen und damit zu einer Verringerung der elektrischen Festigkeit.

Die Anforderungen an die Isolierstoffe sind hoch. Über mehrere Jahre sind die Isolierstoffe den elektrischen, thermischen und mechanischen Kräften ausgesetzt. Nur Materialien mit geringem Teilentladungspegel und hohen elektrischen Durchschlagsspannungen sind für die Herstellung und Fertigung eines ölgefüllten Leistungstransformators geeignet. Für die Planung und Konstruktion der Isolieranordnungen in einem Leistungstransformator sind neben dem Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten ebenso die dielektrischen Eigenschaften des eingesetzten Isoliermaterials von Bedeutung.

Das Hauptaugenmerk richtet sich in dieser Arbeit auf das Isoliermaterial KP-Holz. Aufgrund seiner mechanischen und elektrischen Festigkeit wird es in ölgefüllten Leistungstransformatoren als Stufenhölzer, Pressbalken und Druckringe eingesetzt.

Dielektrische Untersuchungen im Labor „Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik“ zeigen eine faserrichtungsabhängige relative Dielektrizitätszahl. Der Einfluss der bisher nicht beachteten Anisotropie der Dielektrizitätszahl von ölprägnierten KP-Holz auf die elektrische Festigkeit soll untersucht werden. Dazu finden unter anderem weitere Teilentladungs- und Durchschlagsversuche statt, bei denen die Elektroden nicht am KP-Holz anliegen.

1.2 Veranlassung und Problemstellung

Im Bereich der Hochspannungsausleitung bei ölgefüllten Leistungstransformatoren kam es in der Vergangenheit mehrfach zu Zerstörungen des aus KP-Holz bestehenden Druckringes. Das hohe elektrische Potenzial sorgt an dieser Stelle für eine hohe elektrische Feldbeanspruchung an den Isoliermedien. Zusätzlich liegt die Hochspannungsleitung nicht an dem KP-Holzdruckring, sondern ist mit einem Ölspalt von diesem getrennt. Die unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen von festen und flüssigen Isolierstoffen führen zu dem Effekt der Feldverdrängung. Zum einen wird die Grenzfläche, an den angrenzenden Medien, mit einer hohen elektrischen Feldstärke belastet. Zum anderen führt die Feldverdrängungen zu unterschiedlichen elektrischen Feldbeanspruchungen in den Materialien. In den Isolierstoffuntersuchungen unter Berücksichtigung der industriellen Normgebung wird stets mit anliegenden Elektroden geprüft. Hier wird ausschließlich das Material mit idealen Bedingungen nach TE- und Durchschlag untersucht. Die Feldverdrängung kommt hierbei nicht vor. Um das Verhalten an der Grenzschicht von ölprägniertem KP-Holz mit umgebenen Transformatoren-Öl besser zu bestimmen, werden TE-, Überschlag- und Durchschlagsversuche mit Ölspalt unternommen.

1.3 Ziele der Arbeit

Die Arbeit soll Erkenntnisse liefern, welche der Erhöhung der Spannungsfestigkeit von KP-Holzdruckringen im Bereich der Hochspannungsausleitung dienen sollen. Dazu wird das KP-Holz auf verschiedene Faktoren, welche das TE-, Über und Durchschlagsverhalten mit nicht-anliegenden Elektroden beeinflussen, untersucht. Es sollen noch ungeklärte Fragen bezüglich der Grenzschicht von Transformatoren-Öl/KP-Holz unter Berücksichtigung einer Anisotropie geklärt werden. Des Weiteren stellt sich die Frage ob der Durchschlag an der Grenzschicht von Transformatoren-Öl/KP-Holz oder aufgrund natürlicher Fehlstellen im Material gezündet wird.

Die folgenden TE-, Überschlag- und Durchschlagsuntersuchungen sollen Aufschluss geben zu:

- Versuchsanordnung
- Winkelstellung / Kanteneffekt
- Ölspaltabhängigkeit
- Rohdichte
- Oberflächenbehandlung und -beschaffenheit

1.4 Aufbau der Arbeit

Theoretische Grundlagen zum Thema werden im Kapitel 2 erläutert. Hier wird das verwendete Isoliermaterial, die allgemeinen Grundlagen zu Teilentladungen und die zu untersuchenden Einflüsse beschrieben.

Die Versuchsdurchführung wird im Kapitel 3 erklärt. Die verwendeten KP-Holzarten für die TE- und Durchschlagsuntersuchung sowie für die dielektrische Untersuchung sind hier dargestellt. Ebenso sind hier die benötigten Versuchsaufbauten mit all ihren Komponenten beschrieben. Um die ausgewerteten Messergebnisse nachvollziehen zu können, sind Kriterien für TE, Über- und Durchschlag festgelegt worden. Im Anschluss sind die Ergebnisse für jede Messreihe dokumentiert.

Die Simulation der Versuchsreihen findet im Kapitel 4 statt. Hier wird für jede Variation die elektrische Feldstärke im Öl und im Material bei dem Ereigniseinsatz, sowie für die Über- und Durchschläge berechnet. Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse findet im nachfolgenden Kapitel statt.

Im Kapitel 5 werden die Messergebnisse mit standardüblichen statistischen Mitteln ausgewertet. Dabei werden zusätzlich die Ergebnisse der Simulation berücksichtigt. Des Weiteren wird hier über die Ereignisverteilungen, die Durchschlagsorte und die berechneten Weibull-Parameter für jede Messreihe diskutiert.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Einflüsse werden im Kapitel 6 zu einem Fazit zusammengefasst.

Am Ende der Arbeit im Kapitel 7 werden Ansätze zur Weiterarbeit mit KP-Holz und der Anisotropie geliefert.

2 Stand der Technik

2.1 Kunstharzpressholz

Das Kunstharzpressholz besteht aus einzelnen laminierten Holzurnieren, die unter hohem Druck und Wärme mit einem nichtwässrigen Kleber (z.B. Phenolharz) verbunden werden. Mit der Verarbeitung von Kunstharzen wird die Empfindlichkeit gegenüber Wasser vermindert. Als Holzarten kommen in den Transformatorenbau vorzugsweise Rotbuche oder Birke zum Einsatz, diese sollten nach Möglichkeit aus ast- und rissfreien Schäl- und Messerurnieren bestehen. [1, 2]

In Verbindung mit einem flüssigen Isolierstoff findet KP-Holz als Mischdielektrikum hauptsächlich Anwendung in ölgefüllten Leistungstransformatoren.

Die **Abbildung 2-1** zeigt längsgeschichtete abgerundete KP-Holzstäbe vor und nach dem Einsatz in ölgefüllten Transformatoren. Durch die Prozedur erfährt das KP-Holz eine Imprägnierung mit Transformatoren-Öl.

Nicht ölimprägniertes KP-Holz



Ölimprägniertes KP-Holz



Abbildung 2-1 Längsgeschichtete KP-Holzstäbe vor (links im Bild) und nach (rechts im Bild) der Imprägnierung mit Transformatoren-Öl

Seine elektrischen und guten mechanischen Festigkeiten machen das Material für Verarbeitungen zu Druckringen bzw. Drucksegmenten und Stufenhölzer sehr interessant. [3]

Mit modernen Maschinen ist man heutzutage in der Lage komplizierte Fertigteile herzustellen. Die **Abbildung 2-2** zeigt eine in den Transformatoren eingesetzte Vierkant-Mutter aus hochverdichtetem kreuzgeschichteten KP-Holz mit M 16 Gewinde.



Abbildung 2-2 Vierkant-Mutter aus hochverdichtetem kreuzgeschichteten KP-Holz

Bei der Koordination der Isolierstoffe in einem ölgefüllten Leistungstransformator wird ölprägniertes KP-Holz aus Sicherheitsgründen in elektrischen Feldstärkebereichen kleiner als 2 kV/mm eingesetzt. [4]

Da mit einem Naturprodukt gearbeitet wird, ist es nicht möglich, bei der Fertigung und Herstellung von KP-Holz in einer Produktserie eine absolute qualitative Gleichmäßigkeit zu erreichen. Jedes angelieferte Einzelfurnier besitzt eine unterschiedliche Oberfläche, natürliche Wachstumsmerkmale und Materialdichte. Aus diesem Grunde unterliegen die mechanischen und elektrischen Festigkeiten einer gewissen Streuung und müssen mit statistischen Methoden ermittelt werden. [5]

2.1.1 Schichtaufbau von KP-Holz

Um hohen mechanischen Belastungen standzuhalten, wird das geschichtete KP-Holzmaterial aus einzelnen Holzlagen bzw. Furnieren hergestellt. Bei der Herstellung werden die phenolharzgetränkten Einzelfurniere je nach Schichtaufbautyp übereinander gestapelt und anschließend in die Presse verlagert. In elektro-technischen Anwendungen kommen vorwiegend

- längsgeschichtete,
- kreuzgeschichtete und
- tangentialgeschichtete

KP-Holzaufbauten vor (**Abbildung 2-3**).

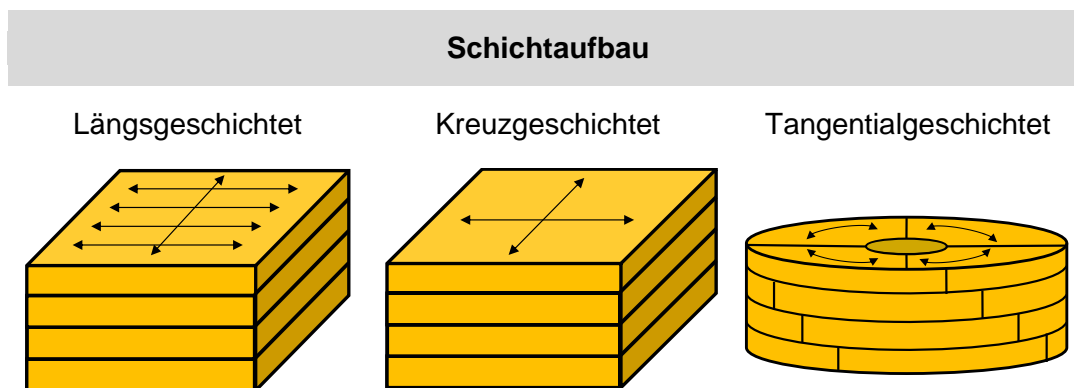


Abbildung 2-3 Drei unterschiedliche Schichtaufbauten von KP-Holz

In längsgeschichtetem und leichtverdichtetem KP-Holzmaterial kommt nach vier gleichgerichteten Holzfasern eine Querlage (**Abbildung 2-1**). Beim kreuzgeschichteten KP-Holz erfolgt der Richtungswechsel nach jeder Schicht (**Abbildung 2-2**).

2.1.2 Rohdichte von KP-Holz

Die Rohdichte von KP-Holz ist im Wesentlichen von der Größe und Anzahl der Zellräume und dem Feuchtegehalt abhängig. Entzieht man Holz die gesamte Feuchtigkeit und presst die Zellwände zusammen, so dass keine freien Hohlräume vorhanden sind, haben alle Holzarten eine annähernd gleiche Dichte von $1,56 \text{ g/cm}^3$. [6]

In der **Abbildung 2-4** sind zwei unterschiedliche Rohdichten von längsgeschichtetem KP-Holz aufgeführt.

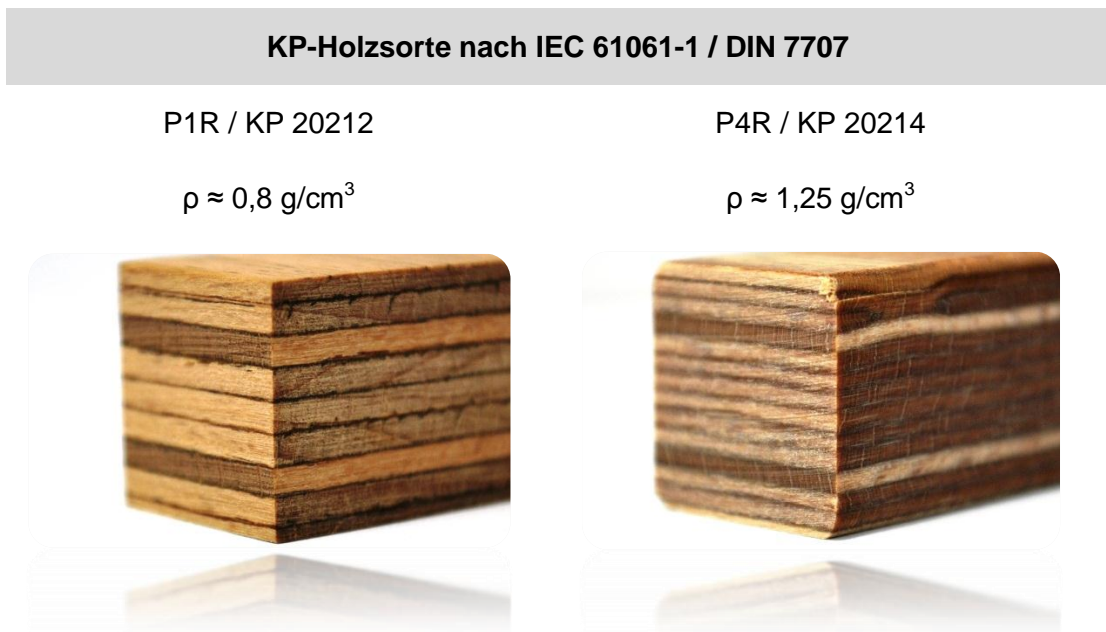


Abbildung 2-4 Längsgeschichtetes KP-Holz mit unterschiedlichen Rohdichten ρ

Beide Materialien werden nach der Herstellung unter gleichen Bedingungen trockengelagert. Das leichtverdichtete Material (links im Bild) weist mehr Zellhohlräume und weniger einzelne Fasern auf als das mittelverdichtete Material (rechts im Bild).

2.1.3 Normbezeichnung von KP-Holz

Die KP-Holztypen sind nach der IEC 61061-1 zu unterteilen. Die **Tabelle 2-1** zeigt die Zuordnung der Beziehungsschlüssel von KP-Holztypen nach neuer Norm.

1. Stelle	Furnierlage	P: Parallel-/ längsgeschichtet (Abbildung 2-4) C: Kreuzgeschichtet T: Tangentialgeschichtet A: Furniere mit jeweils um 45° versetzte Lagen
2. Stelle	Rohdichte ρ [g/cm ³]	1: $\rho \geq 0,70 - 0,90$ (Abbildung 2-4 links im Bild) 2: $\rho \geq 0,90 - 1,10$ 3: $\rho \geq 1,10 - 1,20$ 4: $\rho \geq 1,20 - <1,30$ (Abbildung 2-4 rechts im Bild)
3. Stelle	Holzart	B: Birke M: Ahorn R: Buche

Tabelle 2-1 Beziehungsschlüssel nach neuer Norm IEC 61061-1 [7]

In einigen Datenblättern von KP-Holzherstellern wird das KP-Holz noch immer unter der alten Bezeichnungen nach DIN 7707 geführt. Die Zuordnung der alten Kennzeichnung ist aus der Arbeit von Michael Kleine-König entnommen worden. [1]

1. Stelle	Struktur	2: Schichtpressstoff
2. Stelle	Harztyp	0: Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharz
3. Stelle	Holzart	2: Rotbuche
4. Stelle	Furnierlage	1: Parallel-/ längsgeschichtet (Abbildung 2-4) 2: Kreuzgeschichtet 4: Tangentialgeschichtet
5. Stelle	Rohdichte ρ [g/cm ³]	2: $\rho = 0,90 - 1,10$ (Abbildung 2-4 links im Bild) 4: $\rho = 1,20 - 1,30$ (Abbildung 2-4 rechts im Bild)

Tabelle 2-2 Beziehungsschlüssel nach alter Norm DIN 7707 [1]

2.2 Grenzschichtverhalten von Feststoffen / Flüssigkeiten

Grenzflächen zeigen sich in elektrischen Isoliersystemen tendenziell als problembehaftete Bereiche und bestimmen dadurch sehr häufig die Lebensdauer der Isoliersysteme. Die elektrische Beanspruchung an der Grenzfläche ist im allgemeinen abhängig von den unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen der Isolierstoffe. Zusätzlich kommt dazu, dass die Grenzflächen in ihrer Wirkung auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Feststoffes und von den Eigenschaften der Flüssigkeit, wie Verunreinigungen, Feuchtegehalt, Strömungsverhalten und Ladungsträgermenge beeinflusst werden. [8]

2.2.1 Elektrische Beanspruchung an der Grenzschicht

In der Literatur [9] werden die elektrischen Beanspruchungen von Grenzflächen anhand dreier einfacher Beispiele für quer-, senkrecht- und schräggeschichtetes Dielektrikum zum elektrischen Feld beschrieben. Die nachfolgenden Darstellungen gelten nur für zeitveränderliche Spannungsbeanspruchung. Dabei sind die Leitungsstromdichten gegenüber den Verschiebungsstromdichten zu vernachlässigen und die elektrische Beanspruchung der Isolierstoffe ist demnach überwiegend von ihren Kapazitäten und somit von deren relativen Dielektrizitätszahlen abhängig.

2.2.2 Quer geschichtetes Dielektrikum

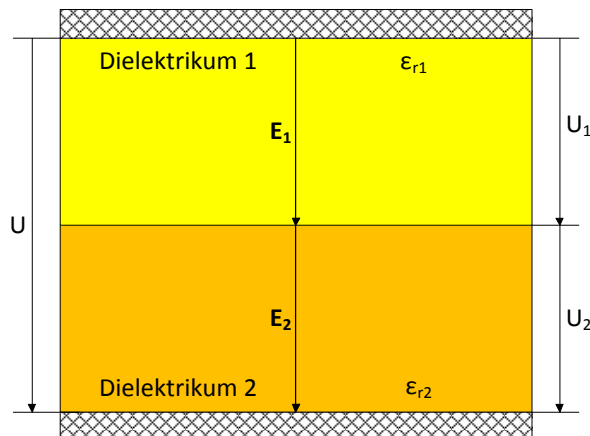


Abbildung 2-5 Quer geschichtetes Dielektrikum zum elektrischen Feld

Befinden sich mindestens zwei Dielektrika mit unterschiedlichen, relativen Dielektrizitätszahlen quer zum elektrischen Feld (**Abbildung 2-5**) gehen im dielektrischen Verschiebungsfeld die Normalkomponenten der Verschiebungsdichte D stetig über.

Die Beträge der elektrischen Feldstärke sind umgekehrt proportional zu deren Dielektrizitätszahl (**Formel 2-1**).

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$$

Formel 2-1 Feldstärkeberechnung von geschichtetem Dielektrikum quer zum E-Feld [10]

Für die Berechnung der elektrischen Feldstärke in der k-ten Schicht in einem Plattenkondensator gilt (**Formel 2-2**).

$$E_{Nk} = \frac{U}{\epsilon_k \cdot \sum_{v=1}^n \frac{s_v}{\epsilon_v}}$$

Formel 2-2 Feldstärkeberechnung für k- Schicht Plattenkondensator [10]

Die unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen der Dielektrika führen zum Effekt der Feldverdrängung. Das bedeutet, dass das elektrische Feld in dem Medium mit der niedrigeren relativen Dielektrizitätszahl höher elektrisch belastet wird. Für die Hochspannungstechnik ist die Feldverdrängung von hoher Bedeutung. In luft- und gasisolierten Isolierschichten trägt die Feldverdrängung zu dem Effekt einer hohen elektrischen Feldstärkebeanspruchung bei. Gasgefüllte Fehlstellen in Isolationsanordnungen und unvollständige Imprägnierung der Hohlräume von festen Isolierstoffen sind Quellen für Teilentladungen und führen zu einer schleichenden Erosion, die bei dauerhaftem Anhalten zu einer Zerstörung der Isolationsfestigkeit führen kann (**Abbildung 2-6**). [9, 10]

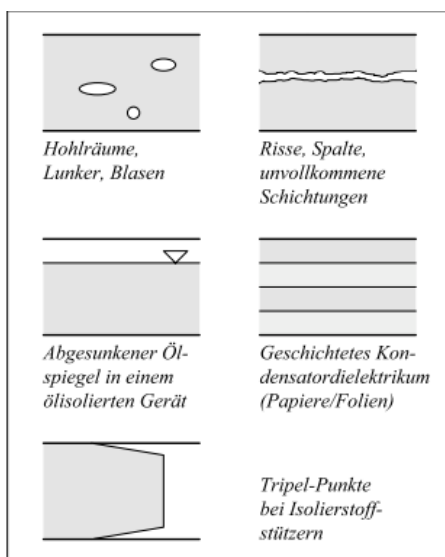


Abbildung 2-6 Feldverdrängungen in der Hochspannungstechnik [9]

2.2.3 Längs geschichtetes Dielektrikum

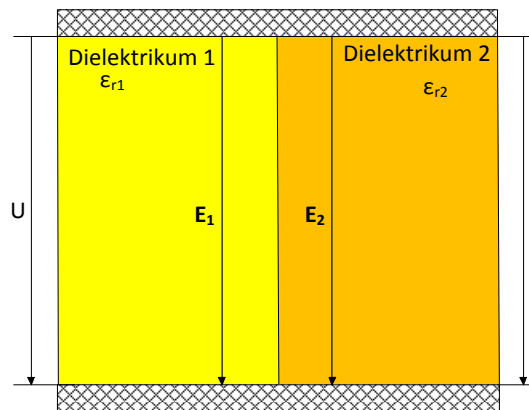


Abbildung 2-7 Längs geschichtetes Dielektrikum zum elektrischen Feld

Befinden sich mindestens zwei Dielektrika (**Abbildung 2-7**) mit unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen parallel zum elektrischen Feld, werden beide Medien mit der gleichen elektrischen Feldstärke belastet (**Formel 2-3**). Der Betrag der elektrischen Feldstärke ist tangential gerichtet und geht damit stetig über. Die Verschiebungsdichte D an beiden Grenzflächen steigt mit höherer relativer Dielektrizitätszahl an.

$$E_1 = E_2 = \frac{U}{s}$$

Formel 2-3 Feldstärkeberechnung von geschichteten Dielektrikum längs zum E-Feld

Es lässt sich vermuten, dass längs, ein zum E-Feld gerichtetes Dielektrikum wegen der gleichen Feldstärkebelastung eine gute Isolieranordnung wäre. Diese Anordnung weist in der Praxis eine geringere elektrische Festigkeit auf als das Dielektrikum quer zum E-Feld. Ursachen dafür könnten nach [9] sein:

- Isolierstoffoberflächen können im Vergleich zum eigentlichen Material verändert sein, so dass in Störstellen Elektronen schwach gebunden wären und mit Zuwachs von Ladungsträgern, diese für eine Ausbreitung von Oberflächenentladung sorgen.
- Fremdschichtbeläge an der Materialoberfläche können zu Feldstärkeerhöhungen an der Grenzfläche führen und somit für eine Entladung sorgen. Diesen Überschlag bezeichnet man als Fremdschichtüberschlag.
- Isoliermaterialien haben in der Realität keine ideale glatte Oberfläche. Durch die Oberflächenrauigkeit gibt es mikroskopische Trennflächen quer zum E-Feld, welche zu lokalen Feldstärkeerhöhungen führen und somit eine Entladung einleiten können.

2.2.4 Schräg geschichtetes Dielektrikum

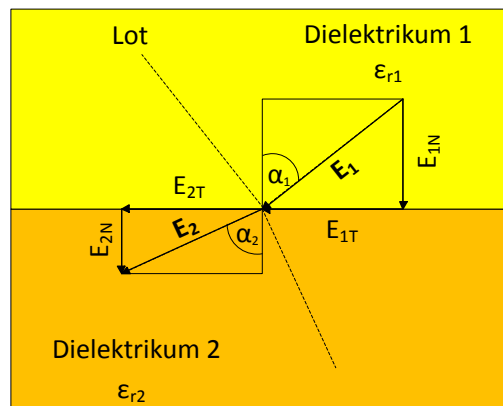


Abbildung 2-8 Schräg geschichtetes Dielektrikum zum E-Feld

Befinden sich mindestens zwei Dielektrika mit unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen schräg zum elektrischen Feld (**Abbildung 2-8**), werden die elektrischen Feldlinien und Potenziallinien an der Grenzschicht gebrochen. Nur die Normalkomponente des elektrischen Feldstärkebetrages nimmt mit zunehmender Winkelstellung ab. Die Tangentialkomponente bleibt stetig gleich. Nach dem Brechungsgesetz laut [9] verhalten sich die die Feldlinien im dielektrisch dichteren Material so, dass diese vom Lot weggebrochen werden. Die Feldlinien im niedrig verdichteten Material werden zum Lot hingebrochen. Finden sich sehr unterschiedliche relative Dielektrizitätszahlen wieder, würden die Feldlinien fast senkrecht aus dem höher verdichteten Material austreten.

2.3 Anisotrope relative Dielektrizitätszahl von ölprägniertem KP-Holz

Untersuchungen im Labor „Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik“ stellten an ölprägniertem KP-Holz eine faserrichtungsabhängige relative Dielektrizitätszahl fest. Die **Abbildung 2-9** zeigt die verwendeten Materialproben aus ein und derselben leichtverdichteten Materialcharge mit einer Rohdichte von ca. $0,70 \text{ g/cm}^3$. [5]



Abbildung 2-9 Versuchspuben mit unterschiedlichen Schnitt zur Faserrichtung

Bei der Holzplatte „Parallel“ werden die Fasern parallel zum E-Feldvektor mit einem elektrischen Feld beansprucht. Bei der Holzplatte „Parallel-Senkrecht“ und „Senkrecht“ werden die Fasern senkrecht zum E-Feldvektor mit einem elektrischen Feld beansprucht. Die Ergebnisse sind an zwei einzelnen KP-Holz furnieren auszuma-chen (**Abbildung 2-10**).

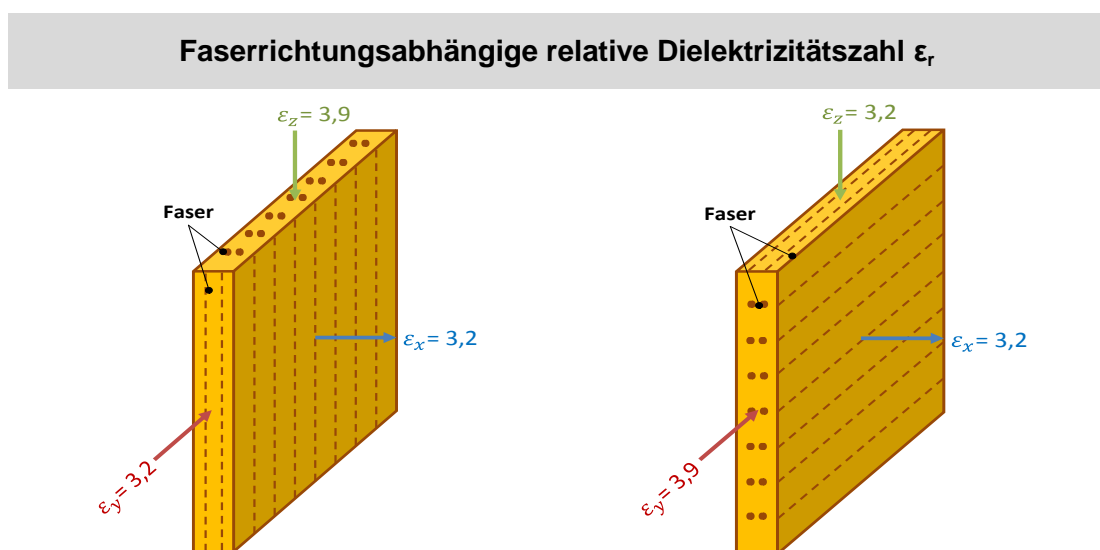


Abbildung 2-10 Faserrichtungsabhängige relative Dielektrizitätszahl an zwei KP-Holz furnieren

Zum Verständnis der Feldstärkenverteilung an der Grenzschicht von Versuchsproben im Öl mit Ölsplatt wird in der **Abbildung 2-11** der Betrag der elektrischen Feldstärke E als Oberflächenplot unter drei möglichen Winkelstellungen dargestellt. Zusätzlich ist die maximal auftretende Feldstärke E_{max} im Öl, bezogen auf die angelegte simulierte Spannung U_{sim} , angeben.

Die gestrichelten Linien und Punkte stellen den Faserverlauf im Material dar. Als numerisches Feldberechnungsprogramm wird die Software COMSOL Multiphysics 4.1 eingesetzt. Der Aufbau des KP-Holzmodells und die Voraussetzungen für 2D-Feldberechnungen werden im Kapitel 4 näher erläutert.

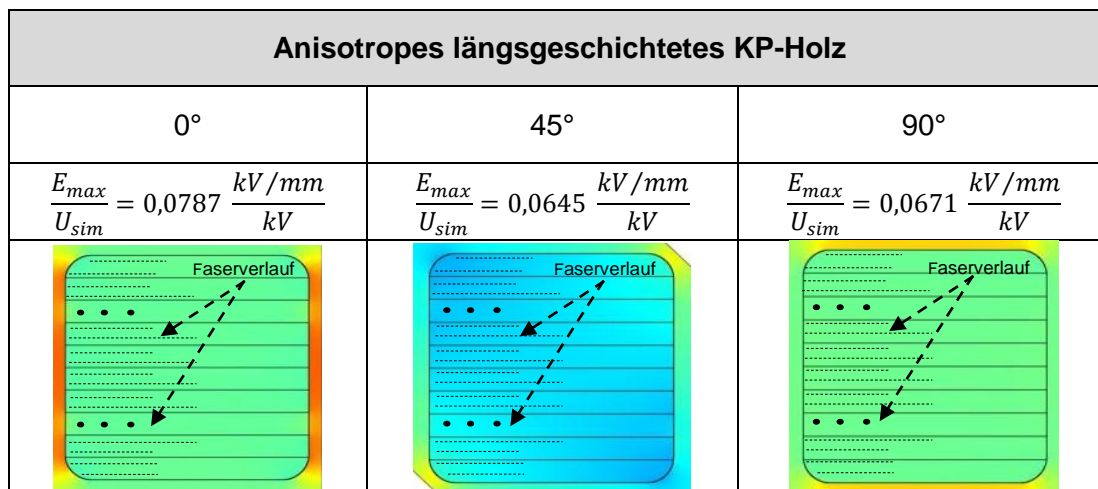


Abbildung 2-11 Oberflächenplot vom Betrag der elektrischen Feldstärke an einem zehnschichtigen längsgeschichteten KP-Holzmodell unter Berücksichtigung einer Anisotropie (Farbskala: blau - niedrige Feldstärken; rot - hohe Feldstärken)

Numerische Feldberechnungen zeigen, dass parallel- und senkrecht laufende Fasern an der Grenzschicht unterschiedlich mit einem elektrischen Feld belastet werden, hier ist mit Feldstärkesprüngen zu rechnen. Der Sachverhalt soll mit den zwei Winkelstellungen 0° und 45° anhand von Linienplots an der abgesägten Seite verdeutlicht werden (**Abbildung 2-12**).

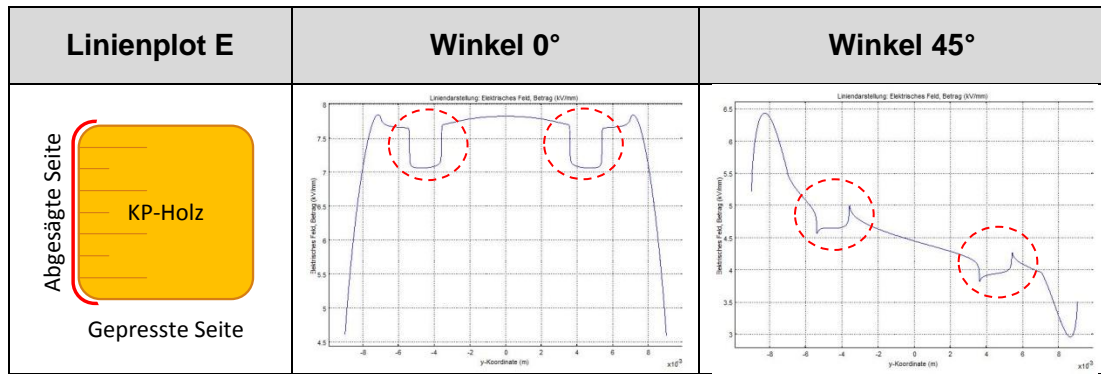


Abbildung 2-12 Linienplot von E im Öl an der abgesägten Seite von längsgeschichtetem KP-Holz mit abgerundeten Kanten ($R = 2 \text{ mm}$) und den Winkeln 0° und 45° zu den Elektroden

Unter gleichen Voraussetzungen werden Feldbeanspruchungen senkrecht zur Schichtung mit 14,2 % niedrigeren Feldstärken an der Grenzschicht KP-Holz/Öl belastet als bei Feldbeanspruchung parallel zur Schichtung (**Abbildung 2-13**).

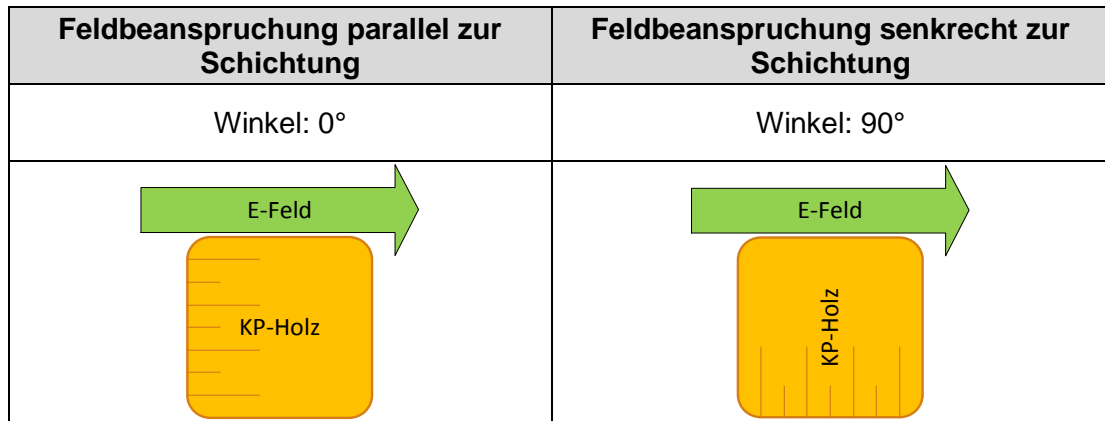


Abbildung 2-13 Feldbeanspruchung parallel und senkrecht zur Schichtung

Mit der Vergrößerung des Winkels von KP-Holz zu den Elektroden ergibt sich eine Verringerung der maximalen Grenzfeldstärke. [5]

Diese Beobachtungen setzen längsgeschichtetes Material mit vier Furnieren parallel zum E-Feld, mit einer darauffolgenden Querlage und zum Abschluss zwei weitere parallele Furniere zum E-Feld, mit einer gleichbleibenden Dichte der einzelnen Holz-furniere, voraus. Während der Bachelorarbeit soll neben der Faserrichtungsabhängigkeit auch die Dichteabhängigkeit von der anisotropen Dielektrizitätszahl näher untersucht werden, da in der Versuchsdurchführung KP-Holzstäbe mit unterschiedlichen Dichten geprüft worden ist.

2.4 Teilentladungen

Teilentladungen (TE), die nicht zum sofortigen Durchschlag führen, treten in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern auf. Selten beeinflussen diese die kurzzeitige elektrische Festigkeit der Isoliermaterialien. Dennoch sind Teilentladungserscheinungen eher unerwünscht, da diese bei organischen Stoffen zu einer meist drastischen Reduzierung der Lebensdauer führen. Die Höhe und die Dauer des anliegenden TE-Pegels ist ein wesentliches Kriterium für die Isolationsqualität. Teilentladungen werden nach dem inneren und äußeren Erscheinen (Korona) unterschieden. [9]

2.4.1 Ursachen für Teilentladungen

Teilentladungsursachen sind zum einem lokale Feldstärkeüberhöhungen (z.B. an leitfähigen Spitzen oder durch Feldverdrängungen) oder lokale Minderung der elektrischen Festigkeit (z.B. durch gasgefüllte Hohlräume, Lunker). Das Entladungsverhalten ist stark von der Art der gewählten Spannung abhängig. Teilentladungen bei Wechselspannung haben die größte technische Bedeutung. [9]

2.4.2 Koronaentladungen

Koronaentladungen entstehen in einem stark inhomogenen Feld einer gasisolierten Elektrodenanordnung, wenn die Zündspannung durch das Erhöhen der anliegenden Spannung überschritten wird. Bei Wechselspannung treten diese im Bereich des Spannungsmaximums auf, solange der Betrag der anliegenden Spannung $u(t)$ höher ist, als die Koronaeinsatzspannung $u_z(t)$ (**Abbildung 2-14**). Die Zündspannung an einer negativen Spitze ist gegenüber einer positiven Spitze aufgrund des Polaritätseffekts niedriger. Eine Spitze an Hochspannung zeigt bei Spannungssteigerung Koronaentladungen zuerst im negativen Maximum. Bei positiver Spitze an Erde treten Koronaentladungen in der positiven Spannungshalbwelle auf. Bei weiterer Spannungssteigerung folgt der Teilentladungseinsatz auch in der anderen Halbwelle. [9]

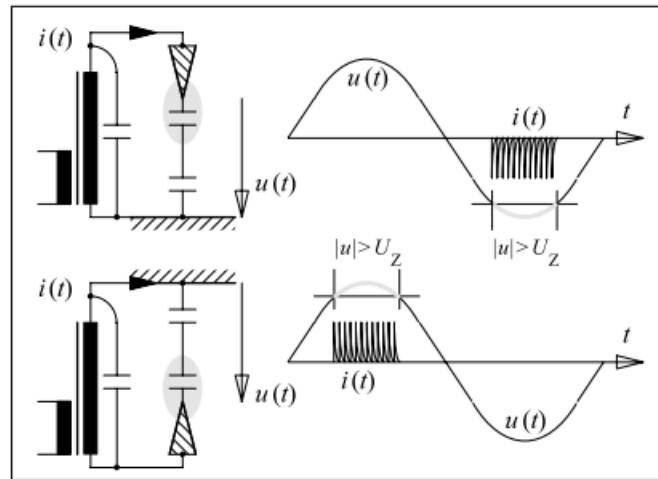


Abbildung 2-14 Koronaentladungen in einer gasisolierten Spitze-Platte-Anordnung bei geringfügiger Überschreitung der Teilentladungseinsetzspannung (Oben: Spitze an Hochspannung, Platte an Erde. Unten: Spitze an Erde, Platte an Hochspannung) [9]

Bei Wechselspannung treten Teilentladungen als dichte Folge von Stromimpulsen auf. Diese entladen sich über die Teilkapazität der Entladungsstrecke und treten im kapazitiven geschlossenen Stromkreis als Stromimpulse $i(t)$ in Erscheinung. Um für weitere Entladungen zu sorgen, müssen vorher gebildete Raumladungen aus der vorherigen Entladung rekombinieren oder wegdriften. Somit entsteht eine regelmäßige Folge von Impulsen (Trichel-Impulse). [1]

2.4.3 Innere Teilentladungen

In festen oder flüssigen Isolierstoffen finden innere TE innerhalb der Fehlstellen statt. Fehlstellen im Material treten dabei häufig durch Hohlräume oder Blasen auf. Vor und nach dem Teildurchschlag kommt es zu Feldverdrängungen, woraus Ladungsverschiebungen im Hohlraum und an den äußeren Elektroden geschehen. Ladungsverschiebungen nach dem Teildurchschlag können mit empfindlicher Teilentladungsmessung und teilentladungsfreiem Prüfaufbau gemessen werden.

Zu nächsten Entladungen kann es erst kommen, wenn die Spannung am Hohlraum einen der Zündspannung entsprechenden Spannungshub erzeugt. Gerade bei großen Spannungsänderungen kommt es in regelmäßigen Abständen zu Entladungen mit gleichen Spannungshüben.

Im vereinfachten kapazitiven Ersatzschaltbild kann ein einzelner Teilentladungsimpuls als Entladung einer Hohlraumkapazität C_h dargestellt werden. Die Nachladung erfolgt bei Wechselspannung durch den kapazitiven Verschiebungsstrom, der über eine in Serie gedachte Teilkapazität C_s fließt.

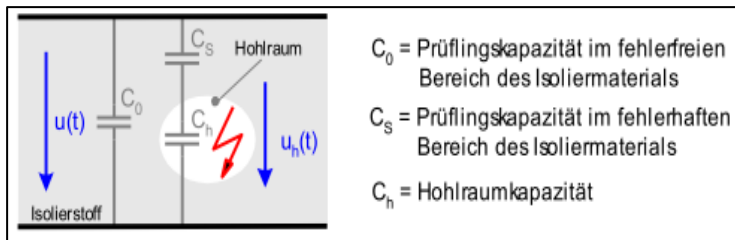


Abbildung 2-15 Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Prüflings zur Beschreibung innerer Teilentladungen von Hohlräumen [4]

Finden keine Teilentladungen statt, eilt die Hohlraumspannung $u_h(t)$ der äußeren Spannung $u(t)$ mit dem entsprechenden kapazitiven Teilverhältnis aus C_s und C_h ohne Phasenverschiebung nach (**Abbildung 2-16**).

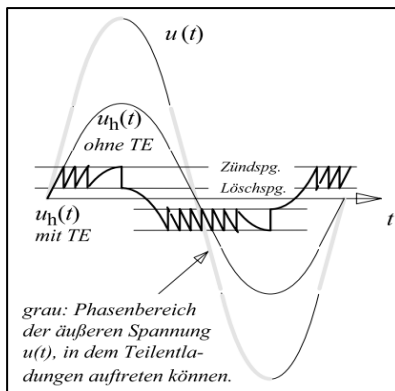


Abbildung 2-16 Äußere Spannung $u(t)$ und Hohlraumspannung $u_h(t)$ ohne TE sowie Hohlraumspannung $u_h(t)$ beim Zünden und Verlöschen der TE

Steigt die Hohlraumspannung $u_h(t)$ über die Zündspannung U_Z und steht ein Startelektron zur Verfügung, kommt es zum Zusammenbruch der Hohlraumspannung $u_h(t)$ bis auf den Wert der Löschespannung U_L (**Abbildung 2-16**).

In der Praxis wird die regelmäßige Entladungsfolge stark gestört. Bei niedrigeren Spannungen führt vor allem der Startelektronenmangel in kleinen Hohlräumen zu einer statistischen Streuung der Teilentladungseinsatzspannung. Bei höheren Spannungen ergibt sich ein regelmäßiges TE-Bild, weil Startelektroden durch die Ionisierung im Hohlraum zur Verfügung stehen.

Das vereinfachte Ersatzschaltbild nach **Abbildung 2-15** beschreibt die wirklichen Feldverhältnisse nicht exakt. Die Leitfähigkeit des Isolierstoffs oder leitfähige Zersetzungsprodukte an der Oberfläche des Hohlraumes können zu einer Phasenverschiebung der Hohlraumspannung $u_h(t)$ führen. Durch Diffusion leitfähiger Entladungsprodukte kann es sogar zu einer Entlastung des Hohlraumes kommen. Beim Einsatz der TE werden die Stromimpulse nach dem Streamer-Mechanismus erzeugt, weil keine leitfähigen Elektroden für die Auslösung neuer Startelektroden zur Verfügung stehen. [9]

2.4.4 Oberflächenentladungen

Gleitanordnungen können durch das Ersatzschaltbild nach **Abbildung 2-15** ähnlich beschrieben werden. Bei einer Oberflächenentladung wird eine Luft-Teilkapazität entladen.

Die Oberflächenentladungen sind nach dem TE-Einsatz mit inneren Teilentladungen vergleichbar. Die Beteiligung der Elektrode führt ebenso zu den Polaritätseffekten.

Bei höheren Spannungen können Oberflächenentladungen durch die Ausbildung von Streamern große Längen überbrücken. [4, 9]

2.4.5 Teilentladungsquellen

In der Versuchsdurchführung kommt flüssiges und festes Isoliermaterial zum Einsatz. Dabei sollen die typischen Teilentladungsquellen näher erläutert werden.

Die **Abbildung 2-17** zeigt die TE-Quellen in flüssigen und festen Stoffen. Besonders gravierend wirken sich in Flüssigkeiten Gasbildungen in Form von Bläschen oder Gasschichten aus. Aufgrund der Feldverdrängung und der niedrigeren elektrischen Festigkeit der Gasblasen kommt es bei niedrigeren Spannungen zu TE. Eine hoher Feuchtegehalt führt zu einer starken Verminderung der elektrischen Festigkeit.

In festen Stoffen tritt TE wegen der hohen elektrischen Festigkeit praktisch immer durch Fehlstellen im Material auf. Dabei handelt es sich fast immer um Hohlräume, die sich aufgrund von Diffusionsvorgängen mit niedermolekularen Bestandteilen aus den umgebenen Medien füllen. Meistens handelt es sich um luftgefüllte Hohlräume. Aufgrund der niedrigeren elektrischen Festigkeit und Feldverdrängungen ist hier mit frühzeitigem TE-Einsatz zu rechnen. [9]

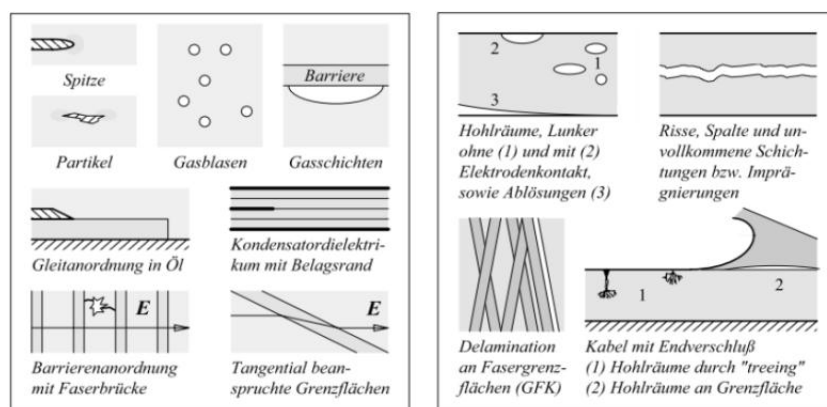


Abbildung 2-17 TE-Quellen in flüssigen (links) und festen (rechts) Stoffen [9]

2.5 Winkelstellung

Untersuchungen an der Hochschule Osnabrück auf das Durchschlagsverhalten mit KP-Holzstäbe schräg im E-Feld haben gezeigt, dass Feldbeanspruchungen senkrecht zur Faser etwa 15 % höheren elektrischen Feldstärken ausgesetzt werden können. [11]

Die folgende **Tabelle 2-3** zeigt die Beträge der Einsatzfeldstärken kurz vor dem Durchschlag in Öl und im KP-Holz.

Winkel	Betrag der elektrischen Feldstärke in Öl	Betrag der elektrischen Feldstärke in KP-Holz
0°	max. 10,4 kV/mm	max. 2,74 kV/mm
45°	max. 10,8 kV/mm	max. 2,84 kV/mm
90°	max. 12,2 kV/mm	max. 3,21 kV/mm

Tabelle 2-3 Einsatzfeldstärken kurz vor dem Durchschlag im Öl und im KP-Holz ohne Berücksichtigung einer Anisotropie [11]

Die Berechnung der Einsatzfeldstärken erfolgte mit noch einer isotropen relativen Dielektrizitätszahl von 3,8. Die Faserrichtungsabhängigkeit zu diesem Zeitpunkt war noch unbekannt.

Die neuen Erkenntnisse einer Anisotropie nach **Kapitel 2.3** zeigen, dass mit zunehmender Winkelstellung die Grenzfeldstärke an KP-Holz/Öl abnimmt. Dieses Erkenntnis hat zur Folge, dass Feldbeanspruchungen senkrecht zur Faser bei gleichem Aufbau mit höherer Spannung beaufschlagt werden können. Die Erwartung, dass nicht die Fehlstellen von KP-Holz sondern die elektrische Festigkeit im Öl aufgrund der Feldverdrängung, die Ursache für den frühzeitigen TE-Einsatz und Durchschlag sein könnten, soll an dieser Stelle untersucht werden.

2.6 Kanteneffekt

Nicht abgerundete Kanten sind nach **Kapitel 2.4.1** denkbare TE-Quellen, da sie spitz und scharfkantig sind. An dieser Stelle treten nach der Theorie hohe elektrische Feldstärken auf, die bei niedrigeren Spannungswerten Teilentladungen bewirken.

Für die Versuchsdurchführung werden längsgeschichtete KP-Holzstäbe mit abgerundeten ($R = 2 \text{ mm}$) und scharfen Kanten auf TE-, Über- und Durchschlag mit Ölspalt untersucht. Untersuchungen mit Ölspalt haben gegenüber anliegenden Elektroden den Vorteil, dass der Zwickel-effekt vermieden werden kann. Der Nachteil an dieser Stelle ist, dass durch die unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen von den eingesetzten Isolierstoffen Feldverdrängungen entstehen.

Die **Abbildung 2-18** zeigt Feldbilder für die Untersuchung des Kanteneffekt. Beide KP-Holzmodelle besitzen einen 1 mm Ölspalt zu den Elektroden und wurden mit einer Simulationsspannung von 100 kV beaufschlagt.

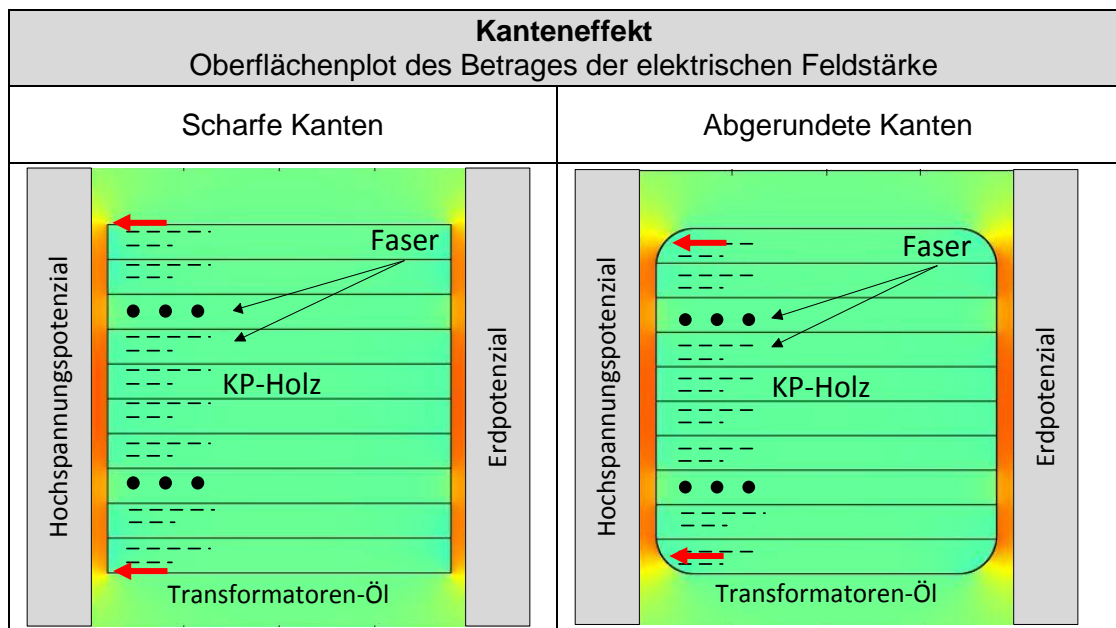


Abbildung 2-18 Oberflächenplot des Betrages der elektrischen Feldstärke von abgerundeten ($R = 2 \text{ mm}$) und scharfkantigen KP-Holzstäben

Bei beiden Feldbildern ist zu beobachten, dass die Grenzfeldstärke von Öl/KP-Holz hoch ist. Außerdem ist zu erkennen, dass bei einem scharfkantigen KP-Holzstab mehr Ölvolumen mit hohen Feldstärken beansprucht wird als bei einem abgerundeten KP-Holzstab.

Der exakte Betrag und Verlauf der elektrischen Feldstärke an der Grenzschicht der abgesägten Seite von Öl/KP-Holz (vgl. **Abbildung 2-12**) sind in der **Abbildung 2-19** und **Abbildung 2-20** zu erkennen. Maximal höhere Feldstärken an scharfen Kanten für diese Anordnung bestätigen sich nicht. Lediglich erfolgt durch die Abrundung der scharfen Kanten eine Homogenisierung des elektrischen Feldes.

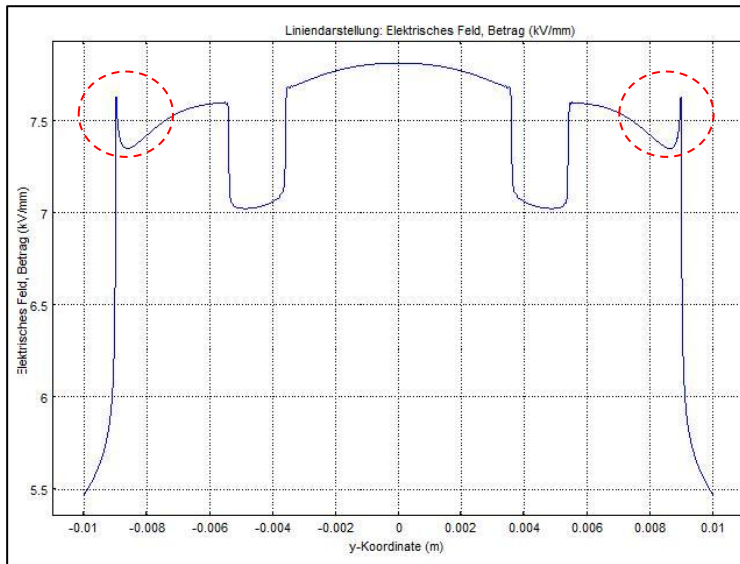


Abbildung 2-19 Liniendarstellung von E an der Grenzfläche von scharfkantigem Öl/KP-Holz

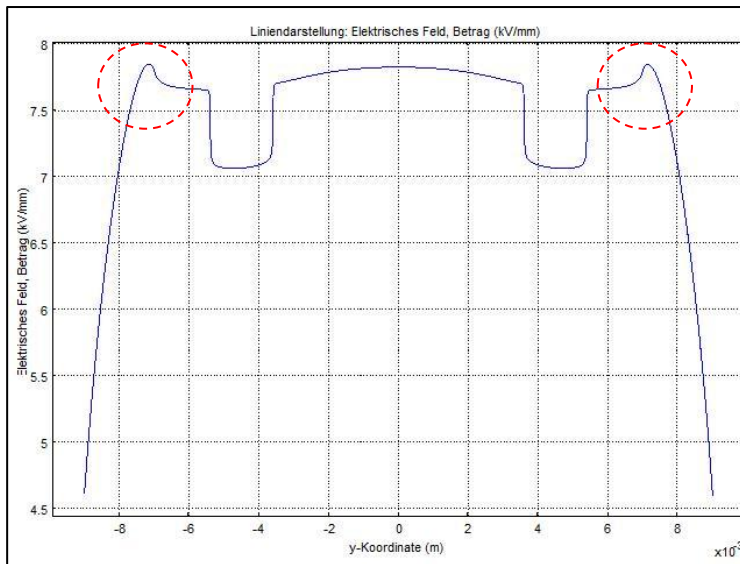


Abbildung 2-20 Liniendarstellung von E an der Grenzfläche von abgerundetem Öl/KP-Holz

2.7 Ölspaltabhängigkeit

Bei der Untersuchung des reinen Ölspaltes haben neben der Feuchtigkeit, Volumen, Spaltweite und Elektrodenbeschichtung einen großen Einfluss auf die elektrische Festigkeit von flüssigen Isolierölen. Mit Vergrößerung des Elektrodenabstands nimmt der Effektivwert der Einsatzfeldstärke für Entladungen im homogenen E-Feld ab, weil dadurch die Bildung von Faserbrücken ermöglicht wird.

Die **Abbildung 2-21** zeigt die Effektivwerte für Entladungen im Isolieröl in Abhängigkeit der Spaltweite. In der Versuchsdurchführung werden blanke Elektroden und entgastes Öl verwendet. [9]

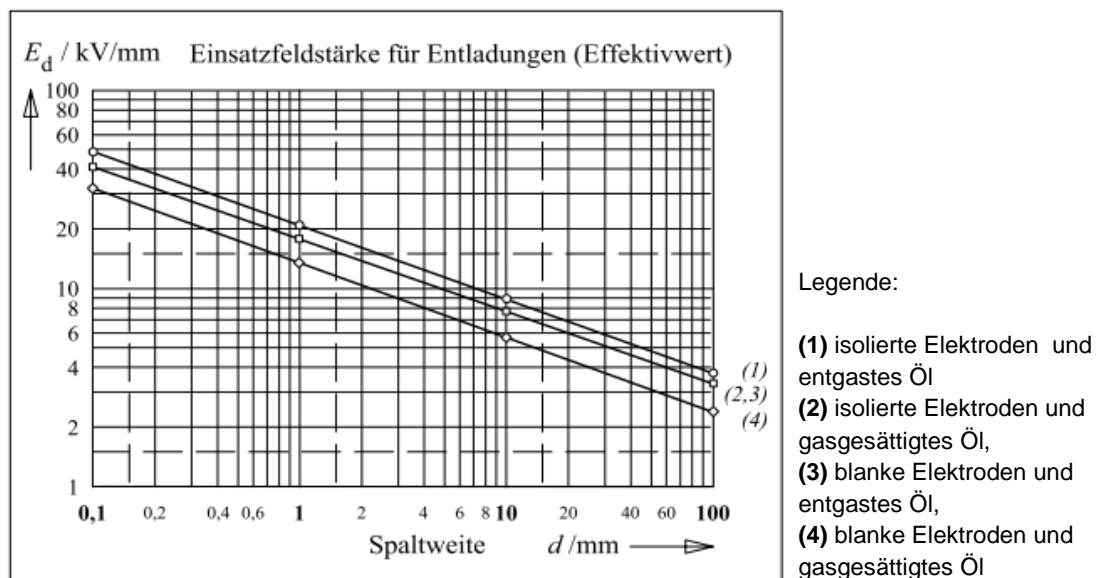


Abbildung 2-21 Elektrische Festigkeit von Ölspalten bei 1-minütigen 50 Hz Prüfwechselfeldspannung in Abhängigkeit von der Spaltweite d [9]

Bei der Untersuchung des Ölspaltes mit eingebettetem KP-Holz im Isolieröl kommt es aufgrund der unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen zum Effekt der Feldverdrängung und folglich zu hohen elektrischen Feldstärken im Öl. Vergrößert sich das Öl-Volumen mit der Schlagweite sinkt nach dem Vergrößerungsgesetz auch die elektrische Festigkeit, weil neben der Bildung von Faserbrücken, die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, freie Elektroden für eine Entladung zu erhalten. [4, 9]

2.8 Rohdichten

Die relative Dielektrizitätszahl von zellulosehaltigen festen Isolierstoffen ist von dem Imprägniermittel und von der Dichte des Materials abhängig. [9]

Die **Abbildung 2-22** zeigt die relative Dielektrizitätszahl von imprägniertem Papier und Pressspan in Abhängigkeit der Dichte und verwendetem Imprägniermittel. Ausgehend davon, dass KP-Holz zur Familie der zellulosehaltigen Isolierstoffe gehört, wird ein ähnlicher Kurvenverlauf mit der Imprägnierung von Mineralöl erwartet.

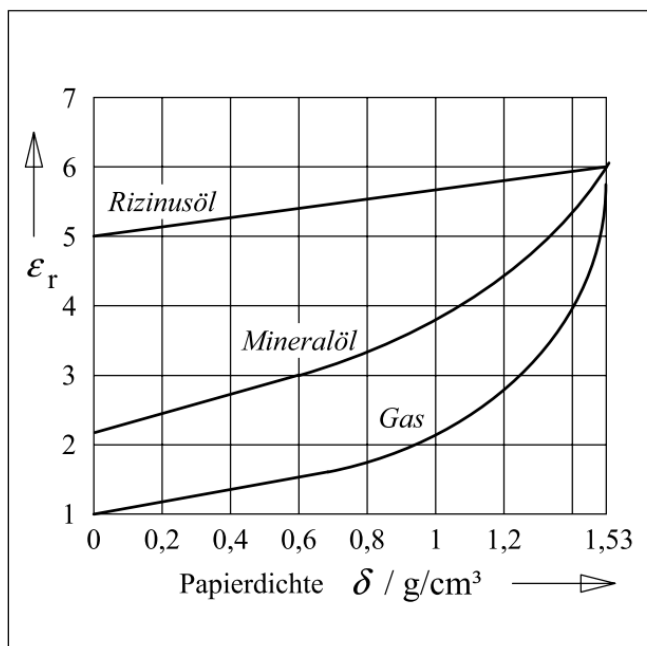


Abbildung 2-22 Relative Dielektrizitätszahl von imprägniertem Papier bzw. Pressspan mit verschiedenen Imprägniermittel in Abhängigkeit von der Papierdichte g/cm³ [9]

Höher verdichtete Materialien weisen eine höhere relative Dielektrizitätszahl auf. Das elektrische Feld wird zunehmend in das Material mit der niedrigeren relativen Dielektrizitätszahl verdrängt. Dadurch entstehen zum einen höhere elektrische Grenzfeldstärken zwischen Öl/KP-Holz als bei leichtverdichteten Materialien, so dass bei niedrigen Spannungswerten Durchschläge im Öl eingeleitet werden können. Weiter wird höherverdichtetes Material im Innern, elektrisch niedriger beansprucht.

2.9 Oberflächenbehandlung

Das Labor „Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik“ hat Untersuchungen an ölprägniertem KP-Holz auf den Gleitentladungseinsatz mit unterschiedlichen Oberflächenprofilen gemacht. [12]

Für die Untersuchungen wurde ein spezieller Versuchsaufbau konzipiert, der in der **Abbildung 2-23** dargestellt ist. Die Proben befanden sich fest zwischen dem Hochspannungs- und Erdpotential.

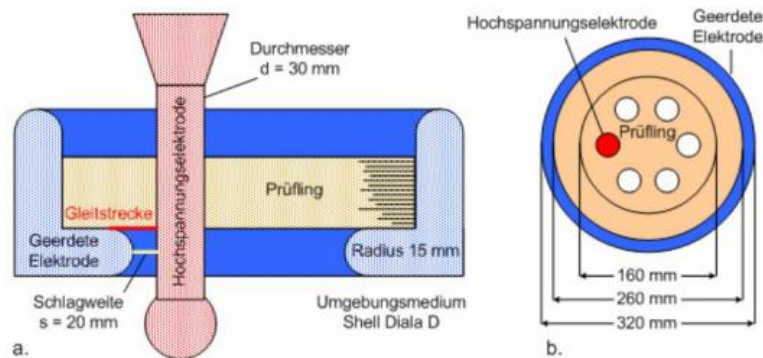


Abbildung 2-23 Elektroden- und Prüflingsaufbau a.) Querschnitt b.) Draufsicht [12]

Bei der Untersuchung wurden zum einen die Oberflächen von KP-Holzproben mit Sandpapier der Körnung 60 (KP 60er Sand) geschliffen und zum anderen werden Proben mit einer dünnen Schicht Phenolharz (KP blank gepresst) beschichtet. Die statistisch ausgewerteten Ergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Durchschlagsspannung an Oberflächen mit einer dünnen Schicht aus Phenolharz gegenüber denen mit rauer Oberfläche, deutlich höher liegen (**Abbildung 2-24**).

Statistische Daten zu den Durchschlagsspannungen		
Probensorte	KP 60 er Sand	KP blank gepresst
Mittelwert [kV]	> 127,3	> 157,8
Standardabweichung [kV]	33,1	26,0
$U_{D63\%}$ [kV]	135,4	163,2
$U_{D0\%}$ [kV]	68,7	117,6
δ	1,88	1,34

Abbildung 2-24 Ergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen mit unterschiedlichen Oberflächenprofilen

Ausgehend von diesen Messergebnissen werden in der Versuchsdurchführung KP-Holzstäbe mit einer dünnen Schicht von Phenolharz auf TE-, Über- und Durchschlag mit Ölpalt untersucht. Weiterhin ist es zu klären, welche Bedeutung die Oberflächenrauigkeit auf die elektrische Festigkeit von KP-Holz mit Ölpalt hat. Gerade hier können sich bei groben Oberflächenprofilen Feldstärkeüberhöhungen an den mikroskopisch herausragenden Fasern ergeben, welche für frühzeitige TE verantwortlich sein können (**Abbildung 2-25**).

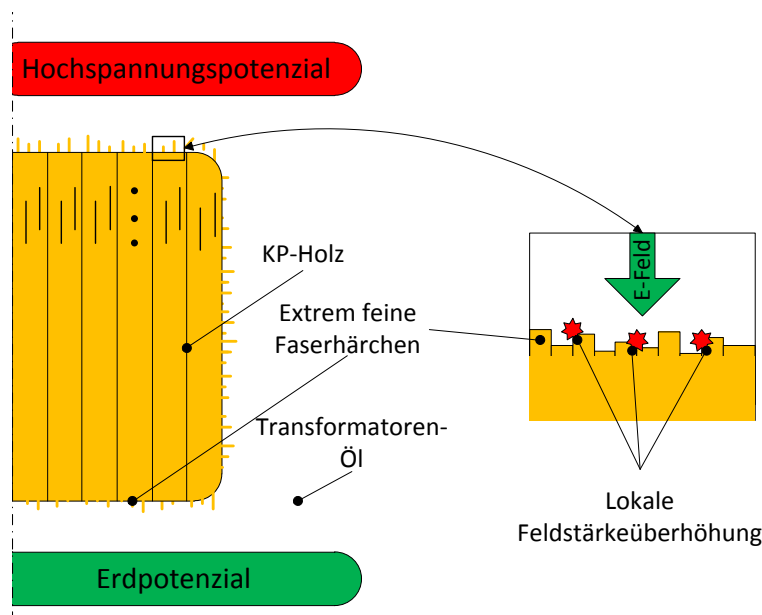


Abbildung 2-25 Lokale Feldstärkeüberhöhungen an mikroskopischen Faserhärchen von ölprägniertem KP-Holz

Da vermutet wird, dass die Grenzfläche Ursache und Entstehungsort für den frühzeitigen TE-Einsatz und Durchschlag ist, werden die KP-Holzstäbe im Versuch mit Ölpapier umwickelt.

Ölpapier ist ein auf Zellulose basierender Isolierstoff und kommt in der Hochspannungstechnik in Bereichen von Durchführungen, Kabeln und Wandlern vor. Aufgrund der Barrierewirkung der einzelnen Fasern besitzt Ölpapier hervorragende elektrische Festigkeiten. Bei 1-minütigen Prüfwechselfspannung bei 50 Hz zeigen sich je nach Verdichtungsstufen Feldstärkebeanspruchungen von 6 - 12 kV/mm und bei maschineller Wicklung sogar bis zu 30 kV/mm. [4]

In der Versuchsdurchführung (Kapitel 3.1.5) wird Ölpapier mit einer Dichte von $1,1 \text{ g/cm}^3$ und einer Dicke von 0,05 mm eingesetzt. Laut der **Abbildung 2-22** kann für Ölpapier ein ϵ_r von 4,2 entnommen werden.

Da Ölpapier eine höhere relative Dielektrizitätszahl hat als leichtverdichtetes KP-Holz ($\epsilon_{\text{senkrechte Faser}} = 3,2$ und $\epsilon_{\text{parallele Faser}} = 3,9$) kommt es zu Feldstärkeentlastungen an der Grenzschicht KP-Holz/Ölpapier und zugleich zu Feldstärkebelastungen an der Grenzschicht Öl/Ölpapier. Die **Abbildung 2-26** stellt den oben beschriebenen Sachverhalt da.

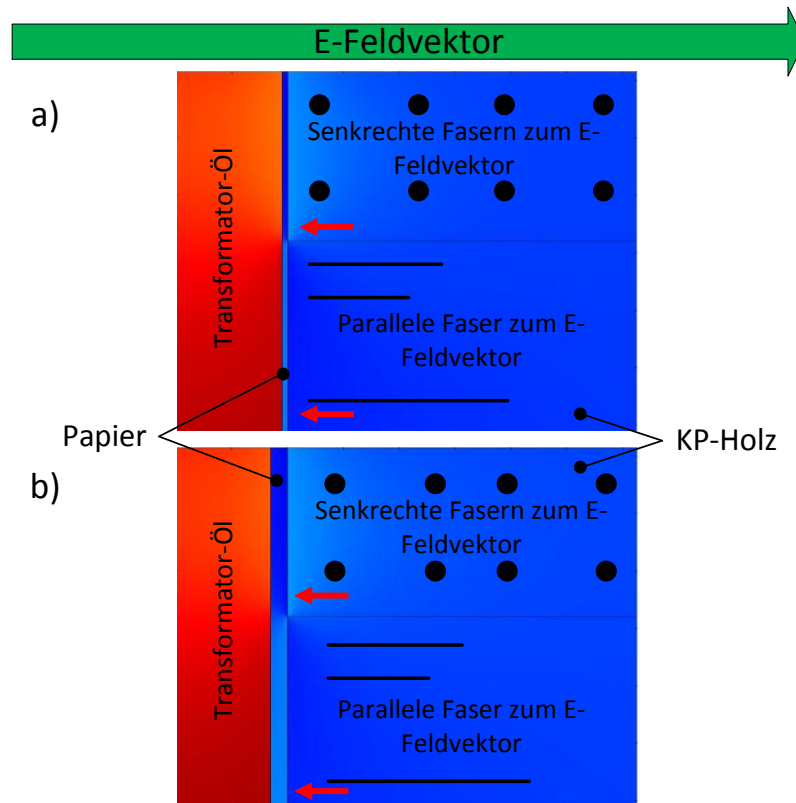


Abbildung 2-26 Feldbild des Betrages der elektrischen Feldstärke E an der Grenzschicht von senkrechten und parallel laufenden Fasern mit a) ein- und b) dreilagiger Bewicklung der KP-Holzstäbe mit Ölpapier (rot - hohe Feldstärken, blau - niedrige Feldstärken)

3 Versuchsdurchführung

3.1 Auswahl der Probekörper für TE und Durchschlag

Für die Messungen stellt die Röchling Stiftung und das Unternehmen Röchling Engineering Plastics KG, KP-Holzproben je nach Anliegen bereit. Dabei kommen folgende längsgeschichtete KP-Holzsorten der Marke Lignostone[®] vor:

- **LI /2 E3** – DIN 7707: KP 20212
- **MI /2 E3** – DIN7707: KP 20214

Im Anhang 9.2 befindet sich das Datenblatt für die oben erwähnten KP-Holzsorten von der Firma Röchling Engineering Plastics KG. Der Zuschnitt der Proben auf eine Größe von 18 x 18 x 400 mm erfolgte maschinell vom Werk aus, ebenso die Abrundung der Kante mit einem Radius von 2 mm. Die **Abbildung 3-1** zeigt die zwei Qualitäten an KP-Holzstäben für die Untersuchung. Bei leichtverdichteten längsgeschichteten Proben sind neben den abgerundeten Stäben, scharfkantige Stäbe zu prüfen (**Abbildung 3-2** und **Abbildung 3-3**).



Abbildung 3-1 KP-Holzstäbe der Größe 18 x 18 x 400 mm, abgerundete Kante (R = 2mm)
(oben - KP 20214, unten – KP 20212)



Abbildung 3-2 Querschnitt
des Stabes mit 2 mm Radius



Abbildung 3-3 Querschnitt
des Stabes ohne Radius

Um eindeutige und aussagekräftige Ergebnisse über die einzelnen Einflüsse zu erzielen, ist es von äußerster Wichtigkeit nur einen Parameter bei der Prüfung zu verändern.

Nach Möglichkeit sind alle Versuchsproben aus ein und derselben Materialcharge zu entnehmen. Um dadurch unterschiedliche produktionsbedingte Materialien, natürlich bedingte Dichtenunterschiede einzelner Furniere, die unterschiedliche Beschaffenheit der Oberfläche und die unterschiedlichen Anzahlen von Furnieren mit parallel und senkrecht laufenden Fasern zu vermeiden (siehe Kapitel 3.7.4).

Bei der Auswahl der Versuchsproben für die Messungen kommen KP-Holzstäbe in Frage, welche die „Sicht-Prüfung“ bestanden haben. Das bedeutet, dass Stäbe bei denen natürliche Fehlstellen wie Riss- bzw. Astlöcher oder Überlappungen einzelner Furniere vorkommen, aussortiert werden.

Die Vergleiche der Messreihen berücksichtigen bei der Auswertung die Anzahl der Furniere, die Materialdichte und die Oberflächenbehandlung.

3.1.1 Versuchsanordnung

Bei der Untersuchung der Versuchsanordnung werden die Proben jeweils anliegend oder mit 1 mm Ölspalt zu den Elektroden versehen geprüft. Bei beiden Messungen kommen abgerundete und scharfkantige Stäbe vor, die nicht aus ein und derselben Materialcharge entnommen worden sind, aber aus der gleichen Qualitätserie „LI /2 E3“ von Lignostone® stammen. Gerade hier zeigen sich unterschiedliche fehlerbehaftete Fertigungseinflüsse. Die **Abbildung 3-4** stellt den Unterschied der Anzahl der Furniere bei den verwendeten Proben gegenüber.



Abbildung 3-4 Vergleich der Anzahl der Furniere mir parallel und senkrecht laufenden Fasern zum Schnitt von den Proben der Messreihe A, B und C (links) und den restlichen Proben (rechts) mit der derselben Qualitätsstufe „LI /2 E3“

Die folgende **Tabelle 3-1** dient zur Übersicht.

Nr.	Prüfanordnung	Messreihe	Kanten	Winkel	Ölspalt
1		A	scharf	0°	0 mm
		B	scharf	0°	1 mm
2		E	abgerundet	0°	0 mm
		RS A	abgerundet	0°	1 mm

Tabelle 3-1 Messreihen-Übersicht für die Versuchsanordnung (kurze hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 0 mm Ölspalt, lange hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 1 mm Ölspalt)

3.1.2 Winkelstellung - Kanteneffekt

Bei der Untersuchung der Winkelstellung bzw. des Kanteneffekts werden die Proben jeweils mit 1 mm Ölspalt und mit einem Winkel von 0° und 45° zu den Elektroden geprüft. Beide Untersuchungen erfolgen mit scharfkantigen (blau gekennzeichnet) und mit einem Radius versehenen KP-Holzstäben (rot gekennzeichnet) (KP 20212).

Die folgende **Tabelle 3-2** dient zur Übersicht.

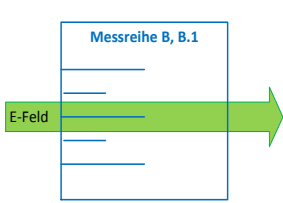
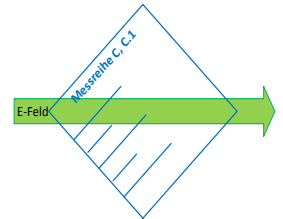
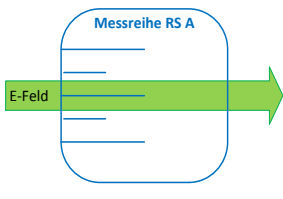
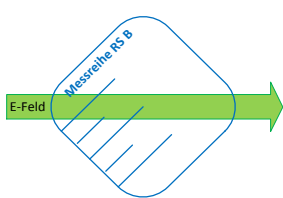
Nr.	Prüfanordnung	Messreihe	Kanten	Winkel	Oberflächenprofil
3.1		B	scharf	0°	*50er Körnung
3.2 3		B.1	scharf		120er Körnung
3.1		C	scharf	45°	*50er Körnung
3.2 4		C.1	scharf		120er Körnung
4.1		RS A	abgerundet	0°	120er Körnung
3			abgerundet		
4.1		RS B	abgerundet	45°	120er Körnung
4			abgerundet		

Tabelle 3-2 Messreihen-Übersicht für die Winkelstellung - Kanteneffekt,
 *keine genaue Angabe zum Zustand der Oberfläche möglich,
 (hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 1 mm Ölspalt, dunkelgrüne 2 mm Ölspalt)

Mit den Messreihen B.1 und C.1 ist es möglich neben der Winkelstellung zusätzlich den Einfluss der Kante bei den Winkelstellungen von 0° und 45° zu vergleichen. Da diese aus ein und demselben Material stammen und die Oberfläche dieselbe Rauigkeit aufweist. In der **Tabelle 3-2** sind die zusätzlichen Vergleiche jeweils farblich mit „Helllila“ und „Dunkellila“ markiert.

3.1.3 Ölspaltabhängigkeit

Bei der Untersuchung der Ölspaltabhängigkeit werden die Proben mit einem Ölspalt von 1 mm und 2 mm zu den Elektroden eingebaut. Die Feldbeanspruchung erfolgt parallel und senkrecht zur Schichtung an abgerundeten, leichtverdichteten KP-Holzstäben (KP 20212).

Die folgende **Tabelle 3-3** dient zur Übersicht.

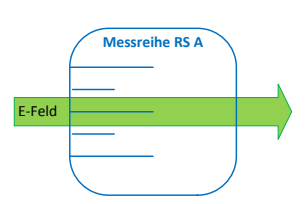
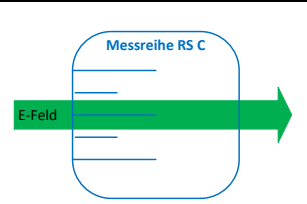
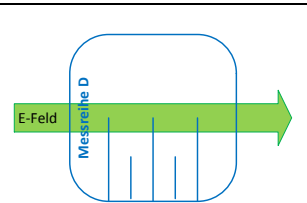
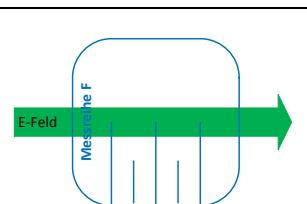
Nr.	Prüfanordnung	Messreihe	Ölspalt	Winkel	Oberflächenprofil
5		RS A	1 mm	0°	120er Körnung
5		RS C	2 mm	0°	120er Körnung
6		D	1 mm	90°	120er Körnung
6		F	2 mm	90°	120er Körnung

Tabelle 3-3 Messreihen-Übersicht für die Ölspaltabhängigkeit
(hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 1 mm Ölspalt, dunkelgrüne 2 mm Ölspalt)

3.1.4 Rohdichte

Bei den Untersuchungen der Rohdichte auf TE-, Überschlag- und Durchschlagsverhalten wird leicht- und mittelverdichtetes abgerundetes Material mit 1 mm Ölspalt verglichen (**Abbildung 3-5**).

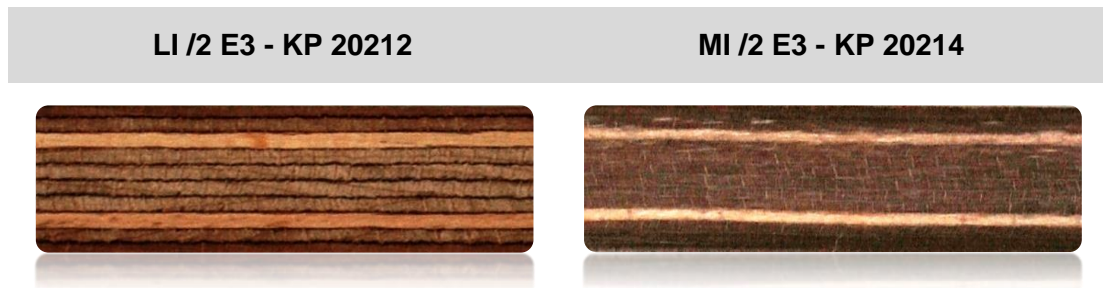


Abbildung 3-5 Vergleich der Rohdichten von LI /2 E3 und MI /2 E3

Die folgende **Tabelle 3-4** dient zur Übersicht.

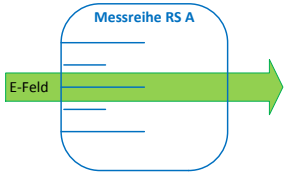
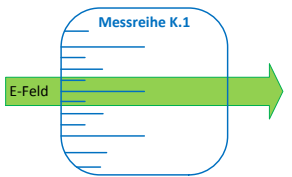
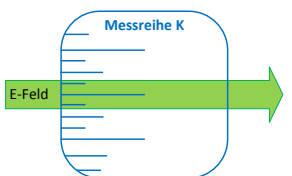
Nr.	Prüfanordnung	Messreihe	Kanten	Winkel	Dichte trocken
7		RS A	abgerundet	0°	0,90 g/cm ³
7		K.1	abgerundet	0°	1,28 g/cm ³
7.1		K	abgerundet	0°	1,28 g/cm ³

Tabelle 3-4 Messreihen-Übersicht für die Rohdichte
(hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 1 mm Ölspalt, dunkelgrüne 2 mm Ölspalt)

Es ist zu erwähnen, dass lediglich die Messreihe RS A und K.1 miteinander verglichen werden können. Da bei beiden Messreihen gleiche Oberflächenbedingungen herrschten. Die Messreihe K stammt direkt aus der Produktion. Eine Angabe zur Oberflächenbehandlung fehlt. Ein direkter Vergleich mit Messreihe K.1 ist nur mit Vorsicht zu interpretieren.

3.1.5 Oberflächenbehandlung und Beschaffenheit

Bei Untersuchungen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen wird ebenfalls mit 1 mm Ölspalt und leichtverdichteten KP-Holzstäben gearbeitet. Folgende Einflüsse an den Oberflächen sind zu untersuchen:

- Oberflächenbeschichtung mit Phenolharz (Rakoll®)
- Oberflächenbeschichtung mit Papier
- Oberflächenrauigkeiten

Für die Prüfung der Oberflächenbeschichtung mit Phenolharz werden Versuchsproben mit einer dünnen Schicht ein- oder zweimal beschichtet (**Abbildung 3-6**). Die genaue Dicke der Schicht ist nicht reproduzierbar. Für ersteres wird ein Wert von etwa 0,05 mm und für den zweiten Wert wird ca. 0,1 mm angesetzt.



Abbildung 3-6 Oberflächenbeschichtung von Stäben mit Phenolharz

Für die Untersuchung der Oberflächenbeschichtung mit Ölpapier werden die KP-Holzstäbe ein- und dreimal mit Papier (Weidmann Kraft Papier) umwickelt.

Abbildung 3-7 zeigt zwei nebeneinander liegende, bearbeitete KP-Holzstäbe.



Abbildung 3-7 Oberflächenbeschichtung von Stäben mit Ölpapier
(Ansicht senkrecht zur Schichtung)

Bei der Untersuchung der Oberflächenrauigkeit wurden die Oberflächen einiger Probenstäbe mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnung vorbehandelt. Die **Abbildung 3-8** zeigt Nahaufnahmen von einem Stereomikroskop an der Grenzfläche von KP-Holzstäben mit unterschiedlichen Rauigkeiten.

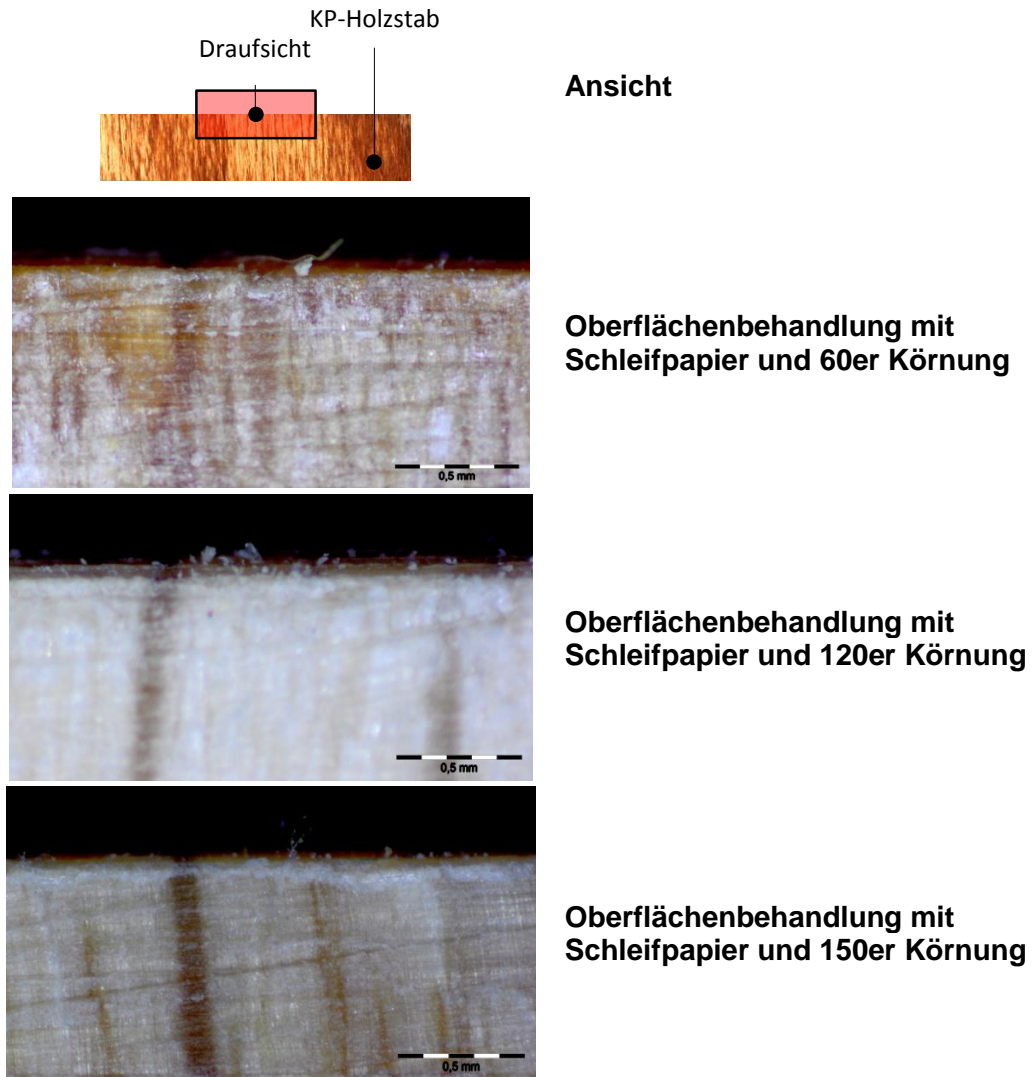


Abbildung 3-8 Nahaufnahmen an der Grenzfläche von Stäben mit unterschiedlichen Oberflächenprofilen mit dem Stereomikroskop

Der Vergleich der Messreihen ist in der **Tabelle 3-5** dargestellt.

Nr.	Prüfanordnung	Messreihe	Kanten	Winkel	Oberflächenprofil
8		RS D	abgerundet	0°	Rakoll 1-mal
8		RS E	abgerundet	0°	Rakoll 2-mal
9		I	abgerundet	0°	Papier 1-mal
9		J	abgerundet	0°	Papier 3-mal
10		H	scharf	0°	60er Körnung
10		B.1	scharf	0°	120er Körnung
10		G	scharf	0°	150er Körnung

Tabelle 3-5 Messreihen-Übersicht für Oberflächenbehandlung und Beschichtung
(hellgrüne E-Feldvektoren kennzeichnen 1 mm Ölspalt)

3.2 Gesamtübersicht der Messreihen und Vergleiche

Eine Gesamtübersicht der Messreihen ist im Anhang 9.3 in der **Tabelle 9-2** zu finden. Es werden nur Messreihen verglichen, bei denen sich ein Parameter bei den Versuchskörpern geändert hat. Dazu ist eine Tabelle erstellt worden, die die aktuell vorzufindenden Gegebenheiten jeder Messreihe auflistet (**Tabelle 9-3**).

3.3 Auswahl der Probekörper für dielektrische Untersuchung

Für die Untersuchung der dichte- und faserrichtungsabhängigen relativen Dielektrizitätszahl von ölimprägniertem KP-Holz werden KP-Holzplatten mit einer Größe von etwa 120 x 120 x 5 mm von der Firma Röchling Engineering Plastics KG bereitgestellt. Für die Dichteabhängigkeit werden KP-Holzproben aus leicht-, mittel- und hochverdichtetem (DIN 7707 - KP 20228) Material entnommen. Um an diesen Materialien die Abhängigkeit der Faserrichtung zu berücksichtigen, werden aus der jeweiligen Materialcharge unterschiedliche Schnittproben entnommen (**Abbildung 3-9**).





Parallel	DIN 7707	Parallel-Senkrecht	DIN 7707
	KP 20212		KP 20212
Senkrecht	DIN 7707	Kreuz	DIN 7707
	KP 20212 KP 20222 KP 20224 KP 20228		KP 20222 KP 20224 KP 20228

Abbildung 3-9 Vier Varianten an KP-Holzplatten nach DIN 7707 für die Untersuchung der dichte- und faserrichtungsabhängigen relativen Dielektrizitätszahl

Holzplatte „Parallel“:	Alle Fasern verlaufen in das Material. Die Messung erfolgt parallel zu den Fasern bzw. senkrecht zum Schnitt.
Holzplatte „Senkrecht“:	Keine Faser verläuft durch das Material. Die Messung erfolgt senkrecht zu den Fasern bzw. parallel zum Schnitt.
Holzplatte „Parallel-Senkrecht“:	vgl. Holzplatte „Senkrecht“.
Holzplatte „Kreuz“:	Gleiche Anzahl von parallelen und senkrechten Fasern zum Schnitt. Messung erfolgt senkrecht und parallel zu den Fasern bzw. zum Schnitt.

Gerade im mittel- und hochverdichteten Bereich ist es nicht möglich KP-Holzplatten zu erstellen, welche nur senkrecht laufende Fasern zum Schnitt enthalten (**Abbildung 3-9**: oben links), weil diese nach dem Pressvorgang keine mechanischen Festigkeiten aufweisen und zerbrechen. In diesen Dichtebereichen kommen statt KP-Holzplatten mit vollständigen, senkrecht laufenden Fasern zum Schnitt kreuzgeschichtete KP-Holzplatten mit abwechselnden parallel- und senkrecht laufenden Fasern vor (**Abbildung 3-9**: unten rechts). Mit einem idealen Ersatzschaltbild aus einer Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren wird auf die vollständige relative Dielektrizitätszahl von parallel laufenden Fasern zum E-Feld umgerechnet.

Die Versuchsproben aus Rakoll® (Phenolharz) werden in einer speziell dafür entworfenen Tellerelektrode erstellt (**Abbildung 3-10**). Es ist darauf zu achten, dass eine dünne Schicht aufgetragen wird. Damit Luft einschüsse und Feuchtigkeit während der Trocknungsphase entweichen können.

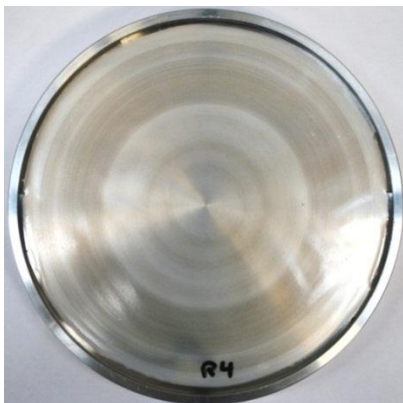


Abbildung 3-10 Tellerelektrode mit Rakoll® für die dielektrische Messung

3.4 Versuchsaufbau für TE- und Durchschlagsversuche

In diesem Kapitel werden für die Untersuchung von ölprägnierten Isolierstoffen der benötigte Versuchsaufbau und die notwendigen Betriebsmittel erläutert. Die Beschreibung der Betriebsmittel richten sich nach dem Kapitel „Versuchsaufbau“ aus der Diplomarbeit von David Klötter und der Bachelorarbeit von Michael Kleine-König. [1, 3]

In der **Abbildung 3-11** ist der aktuelle Versuchsaufbau im Laborbereich der Hochspannungstechnik dargestellt. Die **Abbildung 3-12** zeigt den schematischen Aufbau und den dazugehörigen Schaltplan.

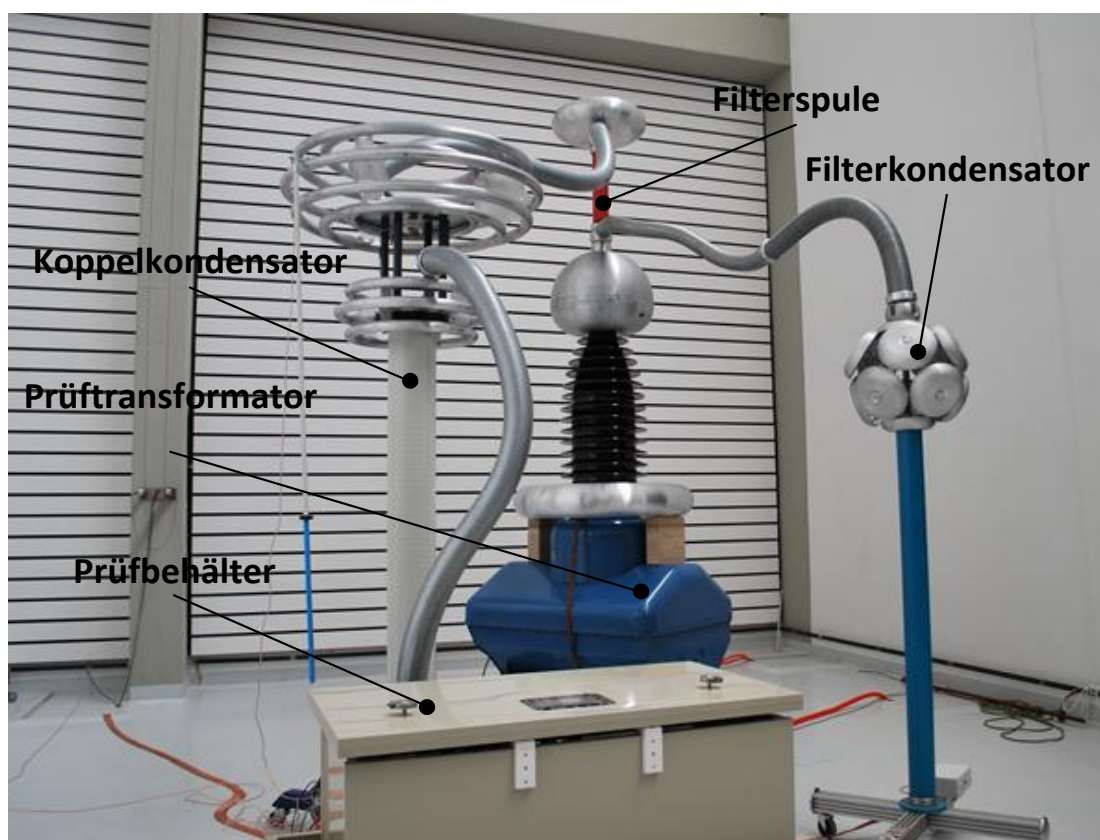


Abbildung 3-11 Übersicht der Hochspannungsprüfanlage mit Betriebsmittelbezeichnung

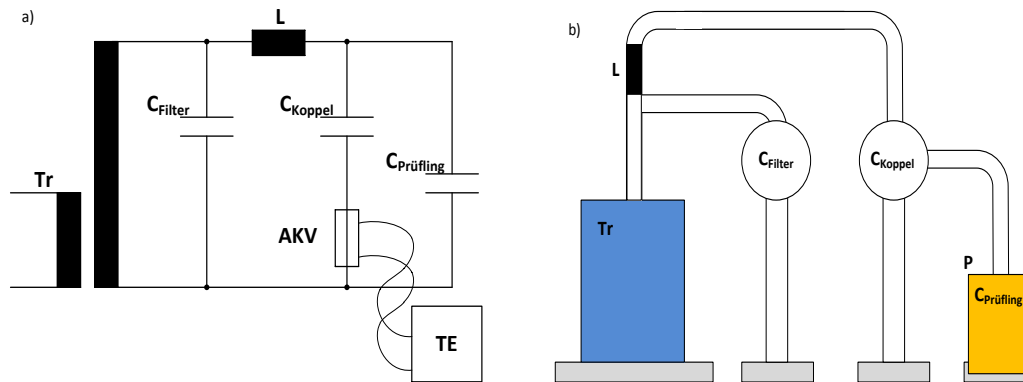


Abbildung 3-12 Aufbau der Prüfanlage, a) Schaltplan, b) Schematischer Aufbau
 Tr = Transformator, L = Filterspule, C_{Koppel} = Koppelkondensator, C_{Filter} = Filterkondensator,
 AKV = Ankopplungsvierpol, P = Prüfbehälter, $C_{\text{Prüfling}}$ = Prüflingskapazität,
 TE = Teilentladungs-Messgerät über LWL angeschlossen

Der am Prüfaufbau montierte einphasige Hochspannungstransformator der Firma Siemens vom Typ WOP 385n/300 (Anhang **Abbildung 9-63**) liefert die Hochspannung. Danach folgt eine sogenannter π -Filter bestehend aus dem Filterkondensator (Anhang **Abbildung 9-65**) und Koppelkondensator mit jeweils 1 nF und der eigens hergestellten Filterinduktivität von 125 mH, um hochfrequente Netzstörungen aus dem bestehenden Versorgungsnetz zu filtern. Mit diesem Aufbau können TE-Messungen unternommen werden, die ein Grundstörpegel von ≤ 500 fC aufweisen.

Der Ankopplungsvierpol (AKV) der Firma Omicron ist an die Erdleitung des vorhandenen Koppelkondensators der Firma Hipotronics (Anhang **Abbildung 9-64**) montiert. Der nachgeschobene Ladungsimpuls Q_s wird vom Koppelkondensator bereitgestellt. Der Ladungs- bzw. Stromimpuls wird vom AKV als Spannungsimpuls erfasst und über eine Lichtwellenleitung an den Hochspannungs-PC übertragen. Die Lichtwellenleitung ist nötig, um elektromagnetische hochfrequente Störungen, wie Schaltimpulse von außerhalb, nicht in das bestehende Messsystem einzukoppeln.

Die Versuchsaufbauten für TE-Messungen sind sehr aufwändig. Um nur den Prüfling auf TE-Entladungen zu untersuchen, muss der Prüfbehälter, die HSP-Zuleitungen und der Transformator TE-frei sein. Mit ausreichend großen Radien der Verbindungsleitungen und der Einsatz von Toroiden an scharfen Kanten wird es ermöglicht, einen teilentladungsfreien Versuchsaufbau bereitzustellen. Zusätzlich müssen alle metallischen Gegenstände am Aufbau auf ein definiertes Potenzial gehalten werden. [4]

3.4.1 Hochspannungserzeuger

Die gewünschte Hochspannung wird aus einer Kaskade aus einem Stelltransformator der Firma Hipotronics und dem Hochspannungsprüftransformator (**Abbildung 3-13**) geliefert. Der Stelltransformator liefert eine Ausgangsspannung von 0 - 400 V. Werden die Unterspannungswicklungen des Prüftransformators parallel geschaltet kann mit dem Übersetzungsverhältnis von 1 : 750 eine am Ausgang maximale Hochspannung von 300 kV erreicht werden. Der maximale ausgangsseitige Nennstrom beträgt 0,4 A das entspricht eine Nennleistung von 120 kVA.



Abbildung 3-13 300 kV Prüftransformator der Firma Siemens

3.4.2 Prüfbehälter und Elektrodenanordnung

Um schneller prüfen zu können und die Standzeiten von 30 min. einhalten zu können, wird als Prüfbehälter ein Doppelprüfaufbau gewählt. Die Prüfung erfolgt nach der Norm IEC 60243-1 mit zwei parallelen Elektroden.

Die Hochspannungselektrode besitzt einen Kragen zur Feldsteuerung (TZ in [1]). Das Steuern der Äquipotentiallinien vermeidet hohe elektrische Feldstärken an nicht gewünschten Stellen in Öl und verringert mögliche Gleitentladungen bei hohen Spannungen am Tripelpunkt vom Hochspannungsrüssel (Aluminium), Luft und Transformatoren-Öl.

Das Innenleben der Prüfbehälters ist in der **Abbildung 3-14** dargestellt.

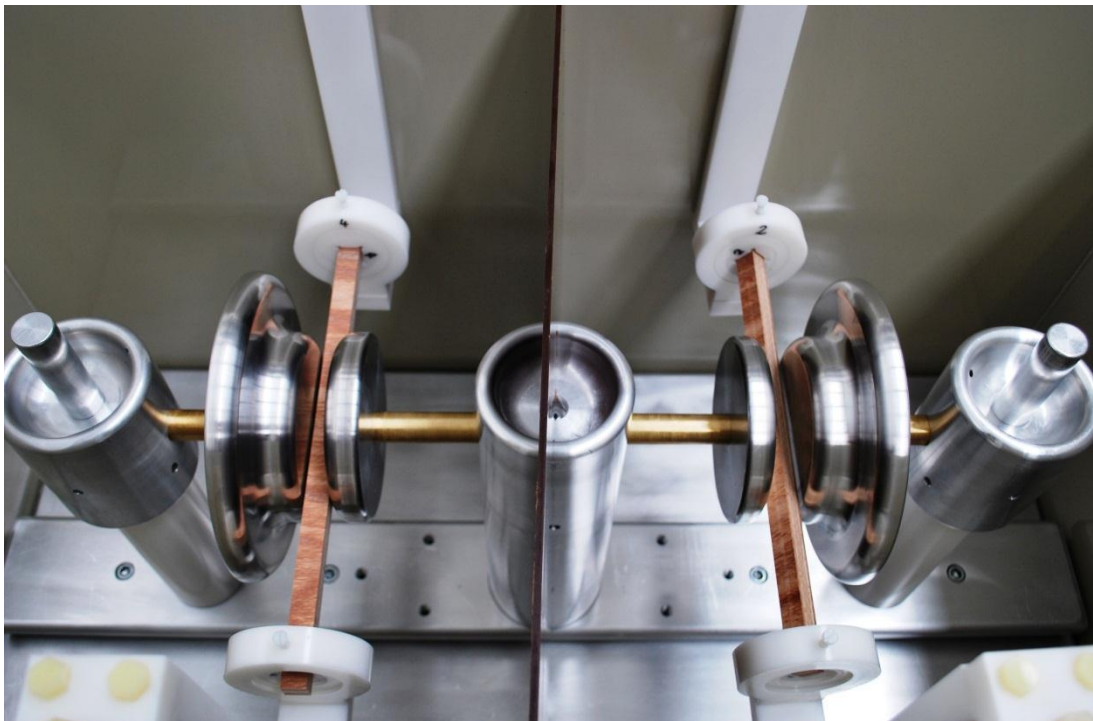


Abbildung 3-14 Elektrodenanordnung im Prüfbehälter (links: KP-Holzstäbe mit 1 mm Ölspalt, rechts: KP-Holzstäbe mit 1 mm Ölspalt und 45° Winkelstellung)

Während der Prüfung wird der Prüfbehälter aus dem Material Polypropylen (PP) mit dem Transformatoren-Öl „Shell Diala D Oil Dried“ (Anhang **Abbildung 9-66**) gefüllt. Im Doppelprüfbehälter finden sich zwei gleiche Elektrodenanordnungen wieder. Diese werden in der Mitte durch eine Trennwand aus Pertinax voneinander getrennt, so dass auf einer Seite geprüft und auf der anderen Seite die 30 min. Standzeit eingehalten werden kann. Die Halterungen für die Untersuchungen mit unterschiedlichen Winkelstellungen und Ölspalt bestehen aus dem Material Polyoxymethylen (POM) (TZ in [1]).

Die Tellerelektroden für die Materialuntersuchungen bestehen aus Aluminium. Die äußeren Elektroden mit Kragen sind die Hochspannungselektroden, die an den Hochspannungsanschlüssen verbunden sind. Die Hochspannungsanschlüsse sind über Rohre aus Polyoxymethylen (POM) gegen die geerdete Grundplatte isoliert. Der sich in der Mitte befindende Stempel aus Aluminium ist durchgehend mit den Erdpotenzial verbunden.

Zur Erläuterung dieses Sachverhaltes ist in der **Abbildung 3-15** der linke Elektrodenaufbau im Querschnitt dargestellt.

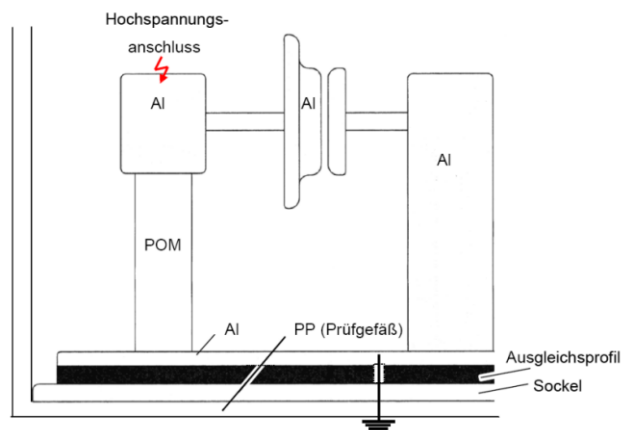


Abbildung 3-15 Technische Zeichnung des linken Prüfaufbaus (Al = Aluminium, POM = Polyoxymethyl, PP = Polypropylen) [3]

Die genaue Elektroden- und Prüflingsanordnung mit verschiedenen Winkelstellungen ist in der **Abbildung 3-16** dargestellt. Für die Untersuchungen kommen Ölspaltweiten von 1 mm und 2 mm vor.

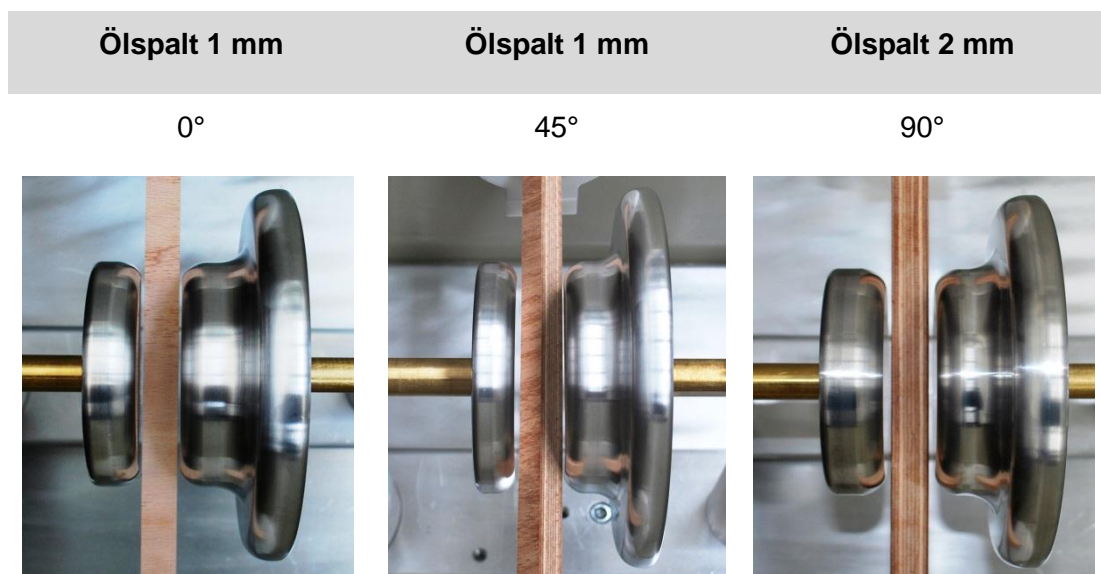


Abbildung 3-16 Elektroden- und Prüflingsanordnung für TE- und Durchschlagsversuche

Nach der Imprägnierungsphase dürfen die KP-Holzproben unter gar keinen Umständen mit Luft in Verbindung treten. Der Transport von der Imprägnierungsanlage zum Prüfbehälter geschieht mit dem eigens entworfenen Transportbehälter (**Abbildung 3-17**). Dabei sind die Proben stets umgeben mit Mineralöl.



Abbildung 3-17 Transportbehälter mit Versuchsproben in Mineralöl

In einer Woche können maximal drei Messreihen mit jeweils 20 Versuchsproben auf TE-Einsatz und Durchschlagsverhalten untersucht werden. Für jede Versuchswoche befindet sich aufbereitetes Transformatoren-Öl „Shell Diala D“ in dem Prüfbehälter. Die Tellerelektroden werden für jede Versuchswoche in der eigenen Betriebswerkstatt auf einer Drehbank geschliffen und poliert, um die Brandmerkmale vom Durchschlag auf der Oberfläche zu entfernen. Diese kleinen Kraterbildungen könnten an der Grenzfläche Metall/Öl zu unerwarteten TE-Einsätzen und damit zu frühzeitigen Entladungen im Öl führen. Die **Abbildung 3-18** zeigt die Tellerelektroden vor und nach der Prüfung .



Abbildung 3-18 HSP-Tellerelektrode und Erdpotenzialelektrode nach (links) und vor (rechts) der Prüfung

3.5 Versuchsaufbau für dielektrische Untersuchungen

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau für die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften erläutert. Die **Abbildung 3-19** zeigt die momentan aktuelle Messeinrichtung.



Abbildung 3-19 Übersicht der Messeinrichtung für die dielektrische Untersuchung

Der Versuchsaufbau besteht aus der Messsensorik der Firma Omicron, einem 4 kV Hochspannungstransformator, einem SF6-gefüllten Referenzkondensator mit einer Kapazität C_N von 100 pF und einer Schutzringelektrode mit einem Durchmesser von 100 mm. Gasgefüllte Referenz- bzw. Vergleichskondensatoren müssen einen niedrigeren Verlustfaktor aufweisen.

Die gewünschte Prüfspannung wird mit einer Kaskade aus dem netzseitigen Trenntransformator mit variabler Ausgangsspannung von 0 - 110 V und dem 4 kV Hochspannungstransformator erzeugt. Geprüft wird mit einer Prüfspannung von 1 kV und einer Netzfrequenz von 50 Hz.

Anders als über die Abgleichbedingung mit einer Scheringbrücke bietet das Messsystem von Omicron die Möglichkeit, Strom und Spannung direkt und gleichzeitig zu messen. Über eine Lichtwellenleitung (LWL) werden die Daten an den PC gesendet und über die bereitgestellte Software ausgewertet. [4]

Die **Abbildung 3-20** zeigt den Schaltplan für die Einrichtung des Messsystems von Omicron mit den notwendigen Messsensoreinheiten des Typs MI 600, Referenzkondensatorkapazität C_{ref} und Prüflingskapazität C_{test} .

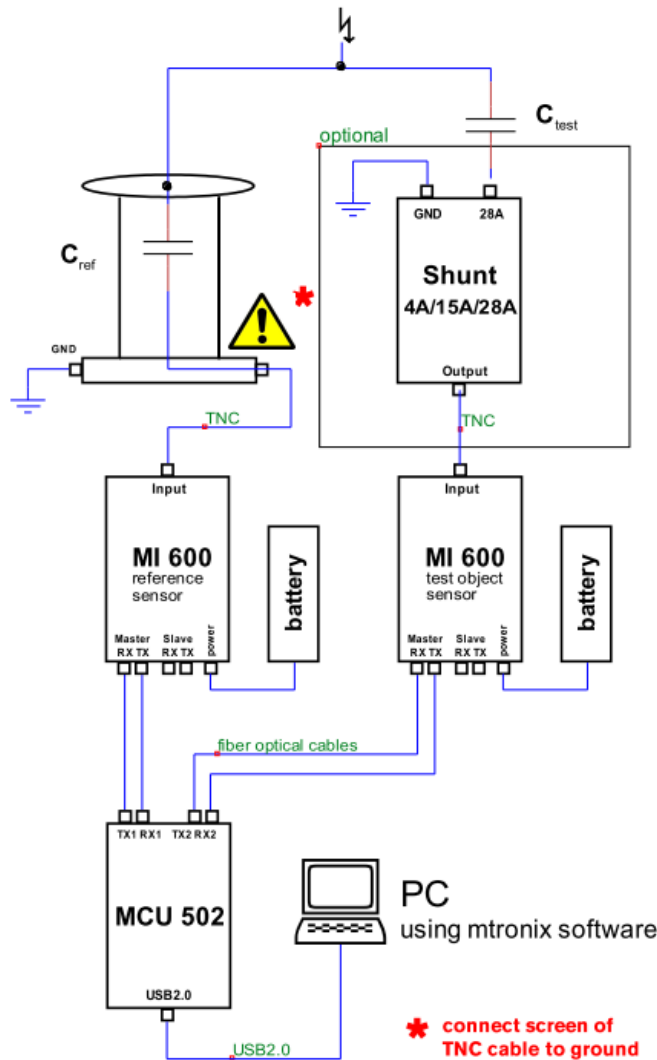


Abbildung 3-20 Schaltplan des Messsystems von Omicron für ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messung [13]

Die zu prüfenden Isolierstoffe bei einer ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messung sollen nach Möglichkeit mit einem homogenen elektrischen E-Feld beansprucht werden. Um diese Bedingung zu erfüllen bedient man sich einer Schutzringelektrode (**Abbildung 3-21**).

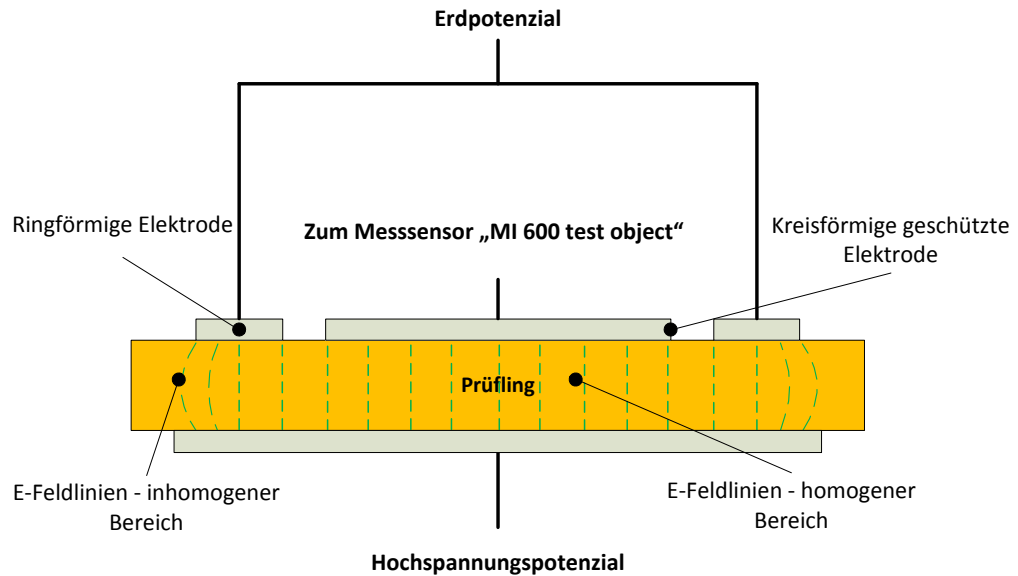


Abbildung 3-21 Schutzringanordnung für eine homogene elektrische Feldverteilung innerhalb des Prüfvolumens

Feldverzerrungen befinden sich demnach im Bereich der ringförmigen Elektrode und werden bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Der für das Messsystem relevante Strom stammt demnach aus dem homogenen Prüflingsbereich. [4]

Für die ϵ - und $\tan \delta$ - Messung kommt in dem Versuchsaufbau folgende Schutzringelektrode vor (**Abbildung 3-22**). Die geschützte kreisförmige Elektrode hat einen Durchmesser von 100 mm. Der Luftspalt der inneren Elektrode zur kreisförmigen Elektrode beträgt 1 mm. Der Ring der ringförmigen Elektrode ist 10 mm breit.



Abbildung 3-22 Schutzringelektrode, geschützte Elektrode Durchmesser von 100 mm

Bei der ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messung von KP-Holzplatten wird die Schutzringelektrode mit einer zusätzlichen mechanischen Kraft belastet, da einige Messproben nach der Imprägnierung krumm waren und deshalb nicht mit den Elektroden eben angelegen hatten. Die benötigte Kraft wurde mit Hilfe von handelsüblichen Schraubzwingen an der ringförmigen Elektrode ausgeübt (**Abbildung 3-23**). Es wurde nur so viel Kraft aufgewendet bis der ölgetränkte Luftspalt an der Grenzfläche von den KP-Holz und Elektrode verschwand (**Abbildung 3-24**).



Abbildung 3-24 ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messung von KP-Holzplatten mit anliegender KP-Holzplatte

Abbildung 3-23 ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messung von KP-Holzplatten mit Anpresskraft an der ringförmigen Elektrode

Der Transport der Versuchsproben von der Imprägnierungsanlage zur ϵ_r - und $\tan \delta$ - Messeinrichtung erfolgte über die Zwischenlagerung in einem Exsikkator (**Abbildung 3-25**). Auch hier, wie im Kapitel 3.4.2 dürfen die Versuchsproben nicht mit Luft in Verbindung geraten. Während der Untersuchung kann diese Bedingung nicht eingehalten werden.



Abbildung 3-25 Zwischenlagerung der ölprägnierten KP-Holzplatten in einem Exsikkator

3.6 Versuchsaufbau zur Messung der „Dichte trocken“

Die Rohdichten von KP-Holz nach IEC 61061-1 oder nach DIN 7707 dürfen sich in einer Qualitätserie in einem gewissen Toleranzbereich bewegen. Für die verwendeten Qualitäten bedeutet dies,

- **LI /2 E3** : $0,80 \text{ g/cm}^3 - 0,90 \text{ g/cm}^3$
- **MI /2 E3**: $1,20 \text{ g/cm}^3 - 1,30 \text{ g/cm}^3$

Um die gemessenen relativen Dielektrizitätszahlen den Versuchsproben für die TE- und Durchschlagsversuche zuordnen zu können, müssen die KP-Holzplatten und Stäbe auf die Materialdichte untersucht werden. Da die Rohdichte wie unter Kapitel 2.1.2 unter anderem von der Luftfeuchtigkeit abhängig ist, werden die Versuchsproben vor der Prüfung für TE- und Durchschlagsverhalten unter gleichen Bedingungen vorbehandelt wie die KP-Holzplatten vor der dielektrischen Untersuchung. Die Versuchsproben werden 24 h in dem Wärmeofen bei etwa 105°C gelagert. Nach Beendigung der Trocknungsphase sind die Proben auf das Gewicht zu überprüfen (**Abbildung 3-26**). Das benötigte Volumen der Proben wird über die Geometrie bestimmt. Der Quotient der Masse m [g] und des Volumens V [cm^3] bildet die Rohdichte ρ [g/cm^3] für ein bestimmte Restholzfeuchtigkeit ab.

Untersuchungen mit längeren Trocknungsphasen von 48 h Stunden und 105°C haben keinen nennenswerten Unterschied an dem gemessenen Gewicht erbracht.



Abbildung 3-26 Messwaage der Firma Denver Instrument für die Gewichtsmessung

3.7 Teilentladungs- und Durchschlagsmesseinrichtung

3.7.1 Teilentladungsmesseinrichtung

Teilentladungen eines Gerätes werden in der Regel während der Stehspannungsprüfung gemessen. Für das Bestehen einer Hochspannungsprüfung ist somit nicht die kurzzeitige Festigkeit entscheidend, sondern auch die Intensität der TE-Impulse, die für bestimmte Geräteklassen in Normen empfohlen oder zwischen Hersteller und Kunde spezifisch vereinbart wird. [4]

Während der Teilentladungsmessung werden Signale erfasst, die in der Regel nicht mit dem Prüfling in Verbindung stehen. Diese Signale werden dem Grundstörpegel zugeordnet. Damit der Grundstörpegel auf ein niedriges Niveau gehalten werden kann, muss ein hoher technischer Aufwand mit Filtern und Abschirmung erfolgen. [4]

Für die weiteren Grundlagen zum Teilentladungsmesskreis, scheinbare Ladung und Kalibrierung wird auf [1] und [4] verwiesen.

3.7.2 Durchschlagsmesseinrichtung

Kommt es zum Über- oder Durchschlag an der Prüfanordnung, muss die Hochspannung unmittelbar vom Netz genommen werden, da der energiereiche Lichtbogen die Bildung von Kohlestoffpartikeln ermöglicht und die Elektrodenoberfläche stark beschädigt.

Die Registrierung eines Lichtbogens beim Durch- oder Überschlag erfolgt über die Messung hochfrequenter elektromagnetischer Impulse (EMP). Über eine Antenne werden die Signale an die regelbare Überwachungseinrichtung gesendet, die mit der Hochspannungseinrichtung gekoppelt ist. Damit ist eine sichere und schnelle Abschaltung möglich. Bei einer zur feinen Einstellung der Überwachungseinrichtung können von außen hochfrequente Signale erfasst werden, welche folglich für eine Schnellabschaltung verantwortlich sind. [3]

3.7.3 Ereignisse und Start-/ Messwerte

Bei der Untersuchung der Isolierstoffe kommt es zu mehreren Ereignissen. Diese werden unterteilt nach

- Teilentladungen (**TE**)
- Durchschlag Probe (**DP**)
- Durchschlag Versuchsanordnung bzw. Durchschlag in Öl (**DV**)
- Überschlag glatte Seite bzw. Überschlag gepresste Seite (**ÜG**)
- Überschlag raue Seite bzw. Überschlag gesägte Seite (**ÜR**)

Die Begriffe „Abgesägte Seite“ und „Gepresste Seite“ werden in der nachfolgenden **Abbildung 3-27** dargestellt. Die Presskraft für eine gewünschte Dichte wird an der „gepressten Seite“ ausgeübt. Die Oberfläche der abgesägten Seite fühlt sich immer rauher an als die Oberfläche der gepressten Seite. Dieses ist nach der Trocknungsphase deutlich zu beobachten.

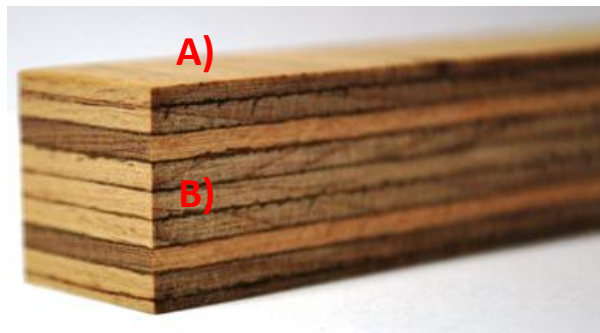


Abbildung 3-27 KP-Holzstab mit A) Gepresste Seite „Prüffläche bei 90°“ und B) abgesägte Seite „Prüffläche bei 0°“

Üblicherweise besteht eine Messreihe für die Prüfung aus 20 Versuchsproben. Für die TE-Prüfung dienen fünf Proben zur Ermittlung des Startwertes. Bei der ersten Prüfung wird der Prüfling bis zum Durchschlag mit einer Rampenspannung von einer Steigung von 30 kV/min beaufschlagt. 60 % der Durchschlagsspannung dienen als Startwert für die 1-minütige Prüfwechselfspannung an der zweiten Vorprobe. Die Spannungsstufen betragen 5 % vom Startwert. Ab der zweiten Probe wird neben dem Durchschlag auch der TE-Einsatz als Ereignis gewertet. Der Startwert der dritten Vorprobe setzt sich aus dem Mittelwert der Ereignisspannung der beiden vorherigen Vorproben zusammen. Auch hier wird ebenfalls mit der 1-minütigen Prüfwechselfspannung und 5 %-Schritten bis zum Ereignis geprüft. Die vierte und fünfte Vorprobe erfährt die gleiche Prozedur. Der Mittelwert der Ereignisspannungen aus der zweiten bis fünften Vorprobe dienen als Startwert für die anderen Proben.

Die restlichen Proben erfahren ebenfalls die 1-minütige Prüfwechselfeldspannung wie oben beschrieben. In dem Prüfprotokoll werden die Ereignisse in einer Spannungsstufe dokumentiert. Kommt es zum TE-Einsatz, wird trotzdem die Spannung bis zum Über- bzw. Durchschlag gefahren. Neben dem Ereignis, der erwarteten Ereigniseinsatzspannung, der jeweiligen Größe der Proben und dem Durchschlagort wird im Protokoll die minimale Ereigniseinsatzspannung, der Mittelwert und die Standardabweichung eingetragen. Gleiches gilt für das Über- und Durchschlagsverhalten. Bei anliegenden Proben kann die Ereigniseinsatzfeldstärke über die jeweilige Ereigniseinsatzspannung und des Abstandes berechnet werden. Die Berechnung der Ereigniseinsatzfeldstärken bei Proben mit Ölpalt kann mit numerischen Feldberechnungsprogrammen oder mit der Formel für geschichtetes Dielektrikum erfolgen (siehe Kapitel 3.8 und 4)

3.7.4 Probenvorbehandlung

Damit die Versuche vergleichbare Ergebnisse liefern können, darf stets nur ein Parameter an dem Material verändert werden. Die Proben werden sorgfältig für die Untersuchung vorbereitet und KP-Holzstäbe, welche sichtbare natürliche und produktionsbedingte Mängel aufweisen, aussortiert. Unter die natürlichen Mängel fallen Fehlstellen wie Ast- und Risslöcher und Überlappungen von einzelnen Furnieren. Produktionsbedingte Mängel sind unterschiedliche Anzahl von senkrecht- und parallelaufenden Furnieren zum Schnitt, Oberflächenbeschaffenheit und Materialdichten. Wobei letzteres ebenso zu den natürlichen Mängeln eingeordnet werden kann.

Wie im Kapitel 3.1 erwähnt, werden die Stäbe vom Werk aus auf eine Größe von 18 x 18 x 400 mm zugeschnitten. Ebenso die Abrundung der Kanten auf einen Radius von $R = 2$ mm und deren Oberflächenbeschaffenheit. Lediglich die Messreihen A, B, C aus der Charge „Neu“ nach Kapitel 3.8.3 haben eine nicht genau identifizierbare Oberflächenrauigkeit. Laut Zulieferer sollten die Oberflächen dieser Charge mit Sandpapier 50er Körnung geschliffen sein. Die Oberflächen aller anderen Messreihen, außer der Messreihe K, sind, wenn nicht speziell vom Zulieferer angegeben, von Hand auf eine gleiche Oberfläche geschliffen. Bei der Untersuchung der Oberflächenrauigkeit werden zwei Messreihen mit Schmirgelpapier mit 60er- und 150er-Körnung vorbehandelt.

Für die Versuche mit beschichteten Stäbe werden die Oberflächen ein- und zweimal mit einem auf phenolharzbasierenden Kleber (Rakoll®) beschichtet. Das Auftragen der Klebeschicht erfolgt mit einem herkömmlichen Pinsel an allen Seiten.

Die Stäbe der Messreihen I und J werden mit Kraftpapier der Dicke 0,05 mm umwickelt. Das Papier wird mit einem nicht wässrigen Kleber (Rakoll®) auf der gepressten Seite befestigt und endet nach der Bewicklung wieder auf dieser. Anschließend wird eine dünne Schicht Phenolharz an der gepressten Seite aufgetragen. Es ist darauf zu achten, dass das Papier stramm an dem Stab liegt. Das Spannen des Papiers erwies sich als schwierig, weil zum Abschluss der Bewicklung Druck auf die gepresste Seite gegeben und gleichzeitig das Papier auf Spannung gehalten werden muss. Es ist nicht immer möglich gewesen, dass das Papier an jeder Stelle gleichmäßig an dem Stab anlag.

3.7.5 Probenaufbereitung

Zellulosehaltige Isolierstoffe müssen getrocknet und unter Vakuum imprägniert werden, damit eine alterungsstabile, hohlraum- und teilentladungsfreie Isolierung entsteht. Das eingesetzte Imprägniermittel selbst muss vor der Aufbereitung getrocknet und entgast werden.

Feuchtigkeitsaufnahmen in Öl wirken sich bei geringen Mengen stark negativ auf die elektrische Festigkeit aus. Bei einer relativen Feuchte von 100 % ist das Lösungsvermögen des Öles erschöpft. Es kommt zur Bildung von Emulsionen die gleichbedeutend mit einem völligen Versagen der Isolation ist und sollten unbedingt verhindert werden. Da sich das Lösungsvermögen für Wasser und ebenso auch für die relative Feuchte mit der Temperatur ändert, zeigen sich auffällige Temperaturabhängigkeiten bezüglich der elektrischen Festigkeit. Das Lösungsvermögen von Isolieröl für Wasser ist vom Aromatengehalt des Öles, von der Ölsorte und vom Alterungszustand abhängig und steigt mit der Temperatur an (**Abbildung 3-28**). [9]

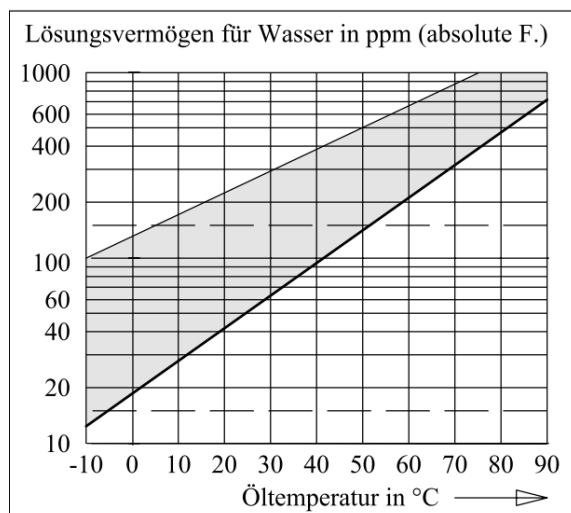


Abbildung 3-28 Absolute Feuchte in ppm bei Sättigung in Abhängigkeit der Öltemperatur für ein Mineralöl mit geringem Aromatengehalt (ca. 10 % untere Kurve) und für Aromate (100% obere Kurve) [9]

Die Proben für die Untersuchung des TE-, Über- und Durchschlagsverhalten sowie für die dielektrischen Untersuchungen dürfen keine Feuchtigkeit und keine luftgefüllten Hohlräume enthalten, da diese die dielektrischen Eigenschaften sowie die elektrische Festigkeit drastisch vermindern. Durch die Imprägnierung von zellulosehaltigen Isolierstoffen werden die Fehlstellen und Hohlräume im Material mit Mineralöl gefüllt, so dass es zu anderen Feldstärkenverteilungen kommt als mit Luft. Für die Probenaufbereitung müssen folgende Maßnahmen unternommen werden.

In der Vorbereitung sind die Proben nach der Norm IEC 61061-2 bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(50 \pm 5) \%$ vorzubehandeln.

Während der Trocknungsphase befinden sich die Proben 24 h in einem Wärmeschrank bei $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Nach der Vortrocknung sind die Proben aus dem Wärmeschrank (**Abbildung 3-29**) zu entnehmen und im linken Behälter der Imprägnierungsanlage zu legen (**Abbildung 3-30**).

Die Imprägnierung der Proben erfolgt in den folgenden Schritten. Zuerst läuft die Vakuumpumpe eine halbe Stunde warm. Anschließend wird vierzehn Stunden lang der Probenbehälter auf eine Temperatur von $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ aufgeheizt und auf einen Druck $\leq 1\text{mbar}$ evakuiert. Nach Beendigung der 14-stündigen Anlaufphase erfolgt der Ablauf weitere 24 Stunden. Nach der Trocknungsphase kommt die Imprägnierungsphase der Proben. Das aufbereitete Mineralöl wird vorsichtig und mit niedrigem Druck von max. 2,5 mbar von dem rechten in den linken Behälter eingelassen. Der obere Füllstandssensor im linken Behälter schaltet bei genügend Menge ab. Die Proben befinden sich anschließend vollständig in Öl. Die Heizung und der Unterdruck wird nach dem Befüllen aufgehoben. Der Atmosphärendruck sorgt dafür, dass das Öl vollständig in die Proben eingelassen wird.



Abbildung 3-29 Wärmeschrank



Abbildung 3-30 Imprägnierungsanlage
(links Probenbehälter, rechts Ölbehälter)

3.7.6 Ölaufbereitung / Ölqualität Überwachung

Für die Prüfung und Probenaufbereitung wird das Transformatoren-Öl von Shell „Diala Oil D Dried“ (Anhang **Abbildung 9-66**) verwendet. Es erfüllt die Ansprüche der Norm IEC 60296.

Vor jeder Probenaufbereitung und Prüfung wird das Mineralöl in der eigenen Ölaufbereitungsanlage gefiltert und auf 1 ppm getrocknet. Die oben genannte Norm stellt für Transformatoren-Öl die minimalen Anforderungen für die Ölqualität fest. Es ist von großer Wichtigkeit, dass das Öl nach jeder Aufbereitung die gleiche Qualität besitzt, weil gerade bei Untersuchungen mit Ölspalt das Transformatoren-Öl deutlich höher elektrisch belastet wird und Durchschlag in der Versuchsanordnung keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern.

Die Qualität des Öles wird im Labor anhand der Durchschlagsfestigkeit bemessen. Dazu erfolgen **Ölschüsse** in der Prüflingsanordnung und mit dem **Öltester (Abbildung 3-31)**.

An jedem Prüftag wird ein Ölschuss mit voreingestellten Elektrodenabständen von 20 mm oder 30 mm und einer vordefinierten Spannungssteigerung unternommen. Für die Prüfung mit dem Öltester wird vor Beginn des Ölschusses, eine Ölprobe aus dem Prüfbehälter entnommen. Geprüft wird nach VDE 0370 Teil 5: 1996 mit 2,5 mm Ölspalt. Demnach sollte die Durchschlagspannung bei 2,5 mm Ölspalt nicht kleiner als 60 kV betragen.



Abbildung 3-31 Öltester von der Firma BAUR Oil Tester DTA

3.8 Versuchsergebnisse

Da für die Interpretation der Ergebnisse, der Elektrodenabstand nicht immer genau einzuhalten war, sind die Messreihen über die elektrischen Feldstärken zu bewerten. Im Kapitel 4 „Simulation“ erfolgt die Berechnung der vorzufindenden Feldstärken mit einem numerischen Feldeberechnungsprogramm. Als Vergleich dazu wird im Kapitel 5 die Interpretation der Ergebnisse rechnerisch erfolgen.

Für jede mögliche Messreihe wird die Feldstärke an der Grenzschicht zwischen Öl/KP-Holz im Material und im Öl berechnet. Letzteres ist bei den anliegenden Messreihen nicht möglich. Für anliegende Proben mit Elektrodenkontakt gilt,

$$E = \frac{U}{s}$$

Formel 3-1 Feldstärkeberechnung für Proben mit Elektrodenkontakt

Für die Proben mit Ölsplatt sind wegen der Anisotropie drei Fälle zu unterscheiden. An der Grenzschicht zwischen Öl und KP-Holz herrschen im Öl und Material unterschiedliche Feldstärkeverteilungen (Kapitel 2.3). Die maximale Feldstärke an der Grenzschicht beider Medien befindet sich im Öl an der Grenzschicht von parallelen Fasern zum E-Feld. Im Material kommt es bei den senkrecht zum E-Feld laufenden Fasern bzw. an der Grenzschicht beider unterschiedlichen Faserrichtungen vor. Nur für Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung wird für die Berechnung der Grenzfeldstärke im Öl die relative Dielektrizitätszahl von senkrechten Fasern zum E-Feld eingesetzt.

1. Fall	Feldstärke im Öl	$E_{\text{Öl}} = \frac{U}{\varepsilon_{\text{Öl}} \cdot \left(\frac{s_{\text{Öl}}}{\varepsilon_{\text{Öl}}} + \frac{s_{\text{KP-Holz}}}{\varepsilon_p} \right)}$
2. Fall	Feldstärke im Material	$E_{\text{KP-Holz}} = \frac{U}{\varepsilon_s \cdot \left(\frac{s_{\text{Öl}}}{\varepsilon_{\text{Öl}}} + \frac{s_{\text{KP-Holz}}}{\varepsilon_s} \right)}$
3. Fall	Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung im Öl	$E_{\text{Öl},90^\circ} = \frac{U}{\varepsilon_{\text{Öl}} \cdot \left(\frac{s_{\text{Öl}}}{\varepsilon_{\text{Öl}}} + \frac{s_{\text{KP-Holz}}}{\varepsilon_s} \right)}$

Formel 3-2 Formeln für die Berechnung der Feldstärken im Öl und im Material

Die einzelnen Parameter können aus den Messergebnissen im Kapitel 3.8.4, oder im Kapitel 4.4 entnommen werden. Für die Feldstärkeberechnung mit Oberflächenbehandlung wird jeweils die Dicke und die relative Dielektrizitätszahl der Beschichtung im Nenner mit einbezogen.

3.8.1 Teilentladungsinterpretation

Bei unterschiedlichen Teilentladungsursachen (Kapitel 2.4.1) kommen unterschiedliche Teilentladungserscheinungen mit charakteristischen Eigenschaften vor. Dadurch besteht die Möglichkeit in einigen Fällen auf die Art und den Ort des Fehlers zu schließen. Moderne Diagnosesysteme liefern allerdings oft wegen der Vielzahl der möglichen TE-Quellen, der vielschichtigen Isoliersysteme und deren Fehlerquellen keine eindeutigen Messergebnisse. [9]

Die TE-Messeinrichtung (Kapitel 3.7) im Hochspannungslabor ermöglicht es die Intensität der TE-Ladungsimpulse und deren Phasenlage zu messen. Bei jeder Prüfung der Proben wird ebenfalls dazu ein „TE-Stream“ aufgenommen, um so bei unerwarteten charakteristischen TE-Einsätzen z.B. durch netzseitige Störungen von Frequenzumrichter, die Prüfung zu kontrollieren. Mit den Erfahrungen der letzten Jahre ist ein bewährtes TE-Einsatzkriterium entstanden. Damit ist es möglich, TE-Erscheinungen bei allen Messreihen gleich zu beurteilen.

Für die Untersuchung von ölprägniertem KP-Holz nach dem TE-Einsatz gilt:

- Zwei Nadelimpulse $> 2 \text{ pC}$
- Dauer-TE $> 2 \text{ pC}$
- Ein Nadelimpuls $> 6 \text{ pC}$

Teilentladungen die einen Pegel $< 1 \text{ pC}$ zeigen, gehören zu dem sogenannten Grundstörpegel und sind auch ohne eingeschalteter Hochspannungsanlage messbar. Während der TE-Untersuchung im Hochspannungsprüflabor der HS Osnabrück ist ein Grundstörpegel von $\leq 500 \text{ fC}$ zu finden.

In den folgenden Abbildungen sind die TE-Streams von den untersuchenden KP-Holzproben dargestellt. An diesem Muster sind die oben genannten TE-Kriterien anzuwenden. Die **Abbildung 3-32** zeigt zwei Nadelimpulse in der ersten und siebten Spannungsstufe.

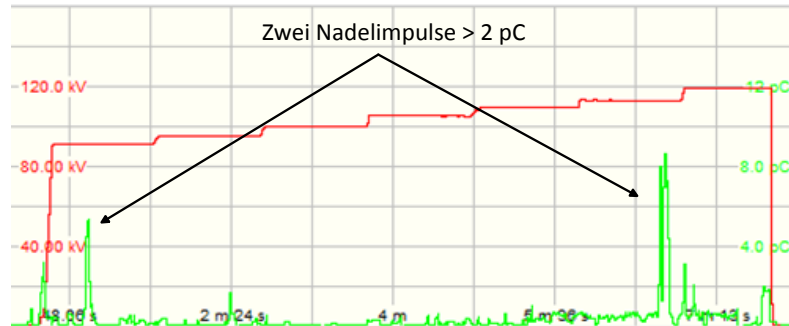


Abbildung 3-32 TE-Einsatz wegen Nadelimpulse > 2 pC

In der **Abbildung 3-33** kommt es während der Untersuchung ab der zehnten Spannungsstufe zu dauerhaftem TE-Einsatz an der Versuchsprobe.

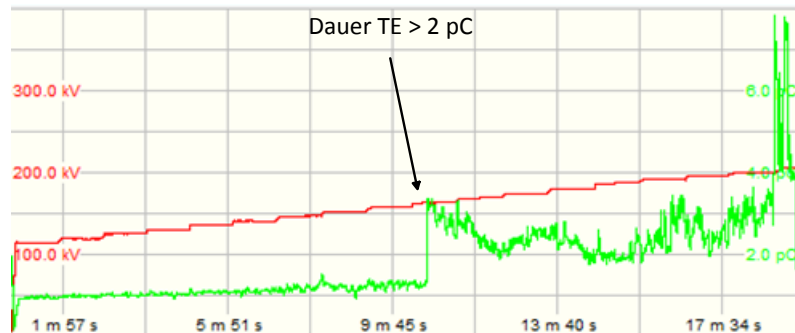


Abbildung 3-33 TE-Einsatz wegen Dauer-TE > 2pC

Bei der **Abbildung 3-34** ist ein einziger Ladungsimpuls in der elften Spannungsstufe von größer als 6 pC am Prüfling zu erkennen.

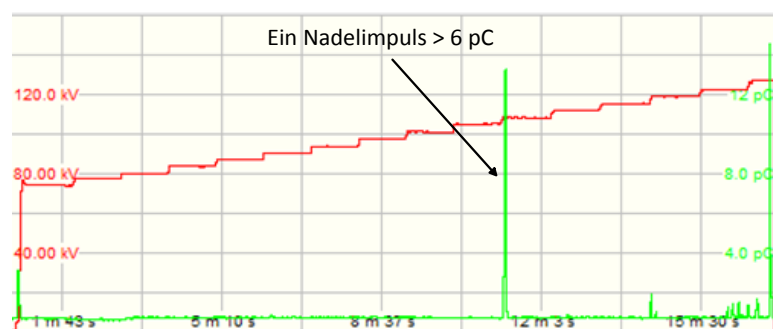


Abbildung 3-34 TE-Einsatz wegen einem Nadelimpuls > 6 pC

Neben der Intensität der TE-Impulse wird auch die Phasenlage bei der Interpretation des Ereignisses ausgewertet bzw. nicht ausgewertet, wenn die Teilentladungen selbst von äußeren Einflüssen oder vom Prüfaufbau und nicht von den Proben selbst stammen.

Auffällig bei der Untersuchung war, dass es bei Prüfung ohne Prüfling in dem rechten Prüffeld vom Doppelprüfbehälter manchmal zu einem charakteristischen Teilentladungsbild kam, die der Koronaentladungen in Öl „Spitze an Erde“ entsprach. Dieses Muster wird dem Versuchsaufbau zugeordnet und nicht weiter in der Auswertung berücksichtigt.

Die **Abbildung 3-35** zeigt einige charakteristische Teilentladungsbilder mit der anliegenden Wechselfspannung, der Phasenlage und die Amplitude der Stromimpulse.

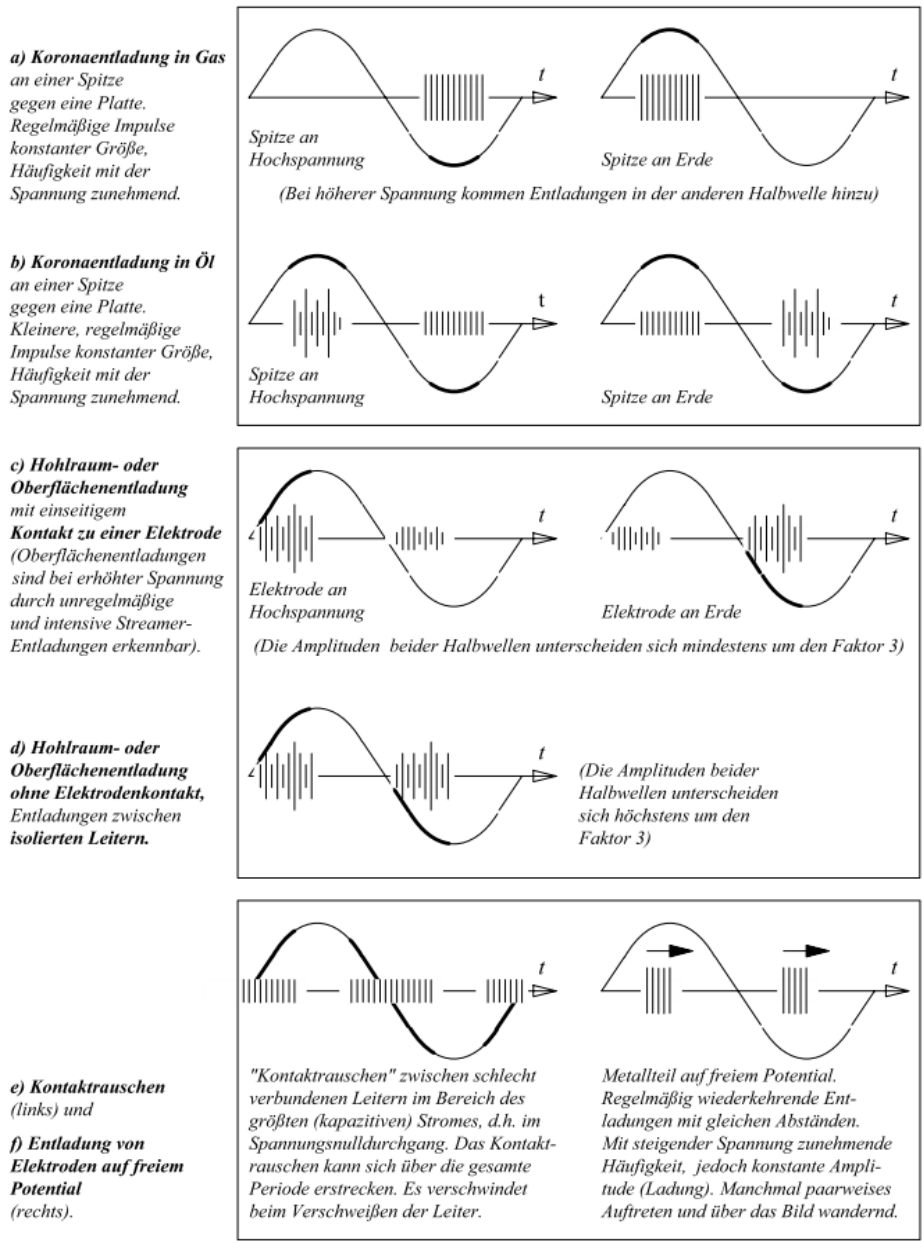


Abbildung 3-35 Charakteristische Teilentladungsbilder bei Beobachtung mit dem Oszilloskop sowie die Phasenlage und die Amplitudenhöhe der Stromimpulse [9]

3.8.2 Beurteilungsbogen für Über- und Durchschläge

Um die Versuchsproben nach Überschlag oder Durchschlag zu untersuchen, müssen eindeutige Beurteilungskriterien festgelegt werden. Die folgende **Tabelle 3-6** beschreibt die Eigenschaften für Proben- und Versuchsdurchschläge sowie für Überschläge an der abgesägten und gepressten Seite.


Ereignis	Beschreibung der Eigenschaft	Bilder an Versuchsproben	
DV	<ul style="list-style-type: none"> • Durchschlag im Versuchsaufbau • Keine Brandspuren am Prüfling erkennbar 		
DP	<ul style="list-style-type: none"> • Durchschlag am Prüfling • Ein- und Austrittspunkte des Durchschlags am Prüfling erkennbar 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Durchschlag unterhalb des Randes bzw. letzten Holzfurniers führt zur tiefen Brandspur innerhalb des Prüflings 		
ÜR	<ul style="list-style-type: none"> • Überschlag an der abgesägten Seite • Brandspurverlauf an der gepressten Seite des Prüflings erkennbar • Kein Eindringen des Durchschlags in den Prüfling 		
			
ÜG	<ul style="list-style-type: none"> • Überschlag an der gepressten Seite • Leichter Brandspurverlauf an der abgesägten Seite des Prüflings erkennbar • Kein Eindringen des Durchschlags in den Prüfling 		
			

Tabelle 3-6 Beurteilungsbogen für Über- und Durchschlag

3.8.3 Messergebnisse bei der Dichteuntersuchung

In der folgenden Tabelle sind die gemessenen Dichten aus einigen Proben nach der Trocknung von den KP-Holzstäben und KP-Holzplatten aufgeführt. Die „Dichte trocken“ ρ_{Trocken} wird aus dem Mittelwert der gemessenen Dichte einer Messreihe gebildet. Die Messreihen aus der Charge „alt“ sind Proben, die aus dem Lagerbestand des Labors entnommen worden sind. Die Charge „neu“ bedeutet, dass die Proben für die Untersuchung neu bestellt worden sind. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang unter 9.4 zu finden. Nach der Trocknung zeigt sich eine ca. 5 % geringere Rohdichte. Eine längere Trocknungsdauer von 45 h zeigte keinen weiteren Einfluss auf das Gewicht.

Qualität	Charge	Messreihen	Dichte trocken [g/cm ³]
LI /2 E3	alt	A.1, B.1, C.1, D, E, F, G, H, I, J, RS A – RS E	0,90
LI /2 E3	neu	A,B,C	0,83
MI /2 E3	neu	K, K.1	1,28

Tabelle 3-7 Messergebnisse der Dichte KP-Holzstäbe im trockenen Zustand

Qualität	Bezeichnung	Feldbeanspruchung zur Faserrichtung	Dichte trocken [g/cm ³]
LI /2 E3	A.2.P	parallel	0,76
	A.2.P.S	senkrecht	0,75
	A.2.S	senkrecht	0,86
LI /2 E3	A	senkrecht	0,67
	B	parallel	0,67
	C	senkrecht	0,67
LII /2 E3	A.1.S	senkrecht	0,96
	A.1.K	kreuz	0,90
MII /2 E3	B.1.S	senkrecht	1,06
	B.1.K	kreuz	1,19
HII /2 E3	C.1.S	senkrecht	1,22
	C.1.K	kreuz	1,24

Tabelle 3-8 Messergebnisse der Dichte von KP-Holzplatten im trockenen Zustand

3.8.4 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an den ölimprägnierten KP-Holzplatten, sowie die der mit Öl imprägnierten Phenolharzproben dargestellt. Dabei ist bei beiden Untersuchungen die relative Dielektrizitätszahl von Bedeutung. Die detaillierten Messergebnisse sind im Anhang 9.5 zu ersehen.

Die **Tabelle 3-9** zeigt die berechneten Mittelwerte der gemessenen relativen Dielektrizitätszahlen für die kreuzgeschichteten KP-Holzplatten $\epsilon_K(\rho_{\text{Trocken}})$ und KP-Holzplatten mit senkrechten Faserverlauf $\epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}})$ zum E-Feld. Diese Zahlen sind abhängig von den außerdem angegebenen „Dichte trocken“ ρ_{Trocken} -Werten. Die Ergebnisse der relativen Dielektrizitätszahlen aus den Messreihen A, B und C stammen aus früheren internen Untersuchungen. [5]

Senkrechte Fasern zum E-Feld			Kreuzgeschichtetes KP-Holz		
Messreihe	$\rho_{\text{Trocken}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$\epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}})$	Messreihe	$\rho_{\text{Trocken}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$\epsilon_K(\rho_{\text{Trocken}})$
A, C	0,67	ca. 3,2	A.1.K	0,90	4,06
A.2.P S	0,75	3,43	B.1.K	1,19	4,75
A.2.S	0,86	3,67	C.1.K	1,24	5,01
A.1.S	0,96	3,79			
B.1.S	1,06	3,95			
C.1.S	1,22	4,43			

Tabelle 3-9 Gemessene relative Dielektrizitätszahlen von KP-Holzplatten in Abhängigkeit von der getrockneten Dichte

Um einen Überblick von der relativen Dielektrizitätszahlen in Abhängigkeit von der getrockneten Dichte zu schaffen, ist im Anhang 9.8 der Kurvenverlauf beider Untersuchungen mit einem Polynom 2. Grades angenähert worden. Zusätzlich wurde als Schnittpunkt an der relativen Dielektrizitätszahl bei einer Dichte von 0 g/cm^3 ein Wert von 2,3 ($\epsilon_{\text{öl}}$ von Mineralöl) angegeben, da in diesem Fall nur Mineralöl gemessen würde.

Aus dem Kurvenverlauf sind für beide KP-Holzplatten folgende Funktionen der relativen Dielektrizitätszahlen in Abhängigkeit von der trockenen Dichte zu entnehmen.

$$\begin{aligned} \epsilon_K(\rho_{\text{Trocken}}) &= 0,5918 \cdot \rho_{\text{Trocken}}^2 + 1,409 \cdot \rho_{\text{Trocken}} + 2,3 \\ \epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}}) &= 0,5582 \cdot \rho_{\text{Trocken}}^2 + 1,0632 \cdot \rho_{\text{Trocken}} + 2,3 \end{aligned}$$

Formel 3-3 Die Funktionen der dichteabhängigen relativen Dielektrizitätszahl von kreuzgeschichtetem KP-Holz und KP-Holz mit nur senkrechten Fasern zum E-Feld

Da für die weitere Auswertung der Versuchsreihen die relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der getrockneten Dichte für parallellaufende Fasern zum E-Feld benötigt wird, muss eine Umrechnung erfolgen. Die Herleitung der Formel ist aus dem Anhang 9.7 zu entnehmen. Die folgende **Formel 3-4** ermöglicht es, unter bestimmten Voraussetzungen auf die dichteabhängige relative Dielektrizitätszahl von parallellaufenden Fasern zum E-Feld $\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}})$ zu schließen.

$$\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}}) = 2 \cdot \epsilon_K(\rho_{\text{Trocken}}) - \epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}})$$

Formel 3-4 Berechnung der dichteabhängigen relativen Dielektrizitätszahl für Feldbeanspruchungen an parallelen Fasern

Da in der Versuchsdurchführung zwei KP-Holzplatten vorhanden waren, bei denen die Fasern parallel zum E-Feld standen, werden die gemessenen Werte mitausgewertet. Die **Tabelle 3-10** zeigt die vorhandenen Messwerte, sowie die berechneten Werte nach der oben genannten Formel $\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}})$.

Parallele Fasern zum E-Feld			
	Nr.	$\rho_{\text{Trocken}} [\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}]$	$\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}})$
Gemessene Werte	B	0,67	ca. 3,90
	A.2.P	0,76	4,28
Berechnete Werte	1	0,67	3,83
	2	0,76	4,08
	3	0,86	4,37
	4	0,96	4,67
	5	1,22	4,98

Tabelle 3-10 Gemessene und berechnete relative Dielektrizitätszahlen von KP-Holzplatten in Abhängigkeit von der getrockneten Dichte von parallelen Fasern zum E-Feld

Anhand der Tabelle ist gut zu erkennen, dass die berechneten Werte im unteren Dichtebereich niedriger ausfallen, als die beiden gemessenen Werte (rot markiert). Da keine zusätzlichen Proben mit anderen Rohdichten für weitere Untersuchung bereitstanden, muss mit den erzielten Ergebnissen weitergerechnet werden.

Um die Funktion $\epsilon_p(\rho_{\text{Trocken}})$ im unteren Bereich der Dichte nicht stark zu verfälschen, werden neben den gemessenen Werten nur drei berechnete Werte im oberen Dichtebereich hinzugefügt. Es hat sich gezeigt, dass die fett markierten Punkte 3, 4 und 5 aus der **Tabelle 3-10** den Kurvenverlauf im unteren Dichtebereich nicht stark beeinträchtigen. Die Annäherung an die Funktion erfolgt über ein Polynom 2.Grades mit einem Schnittpunkt bei ρ_{Trocken} von 0 von 2,3 (ϵ_{01}) an der Ordinatenachse.

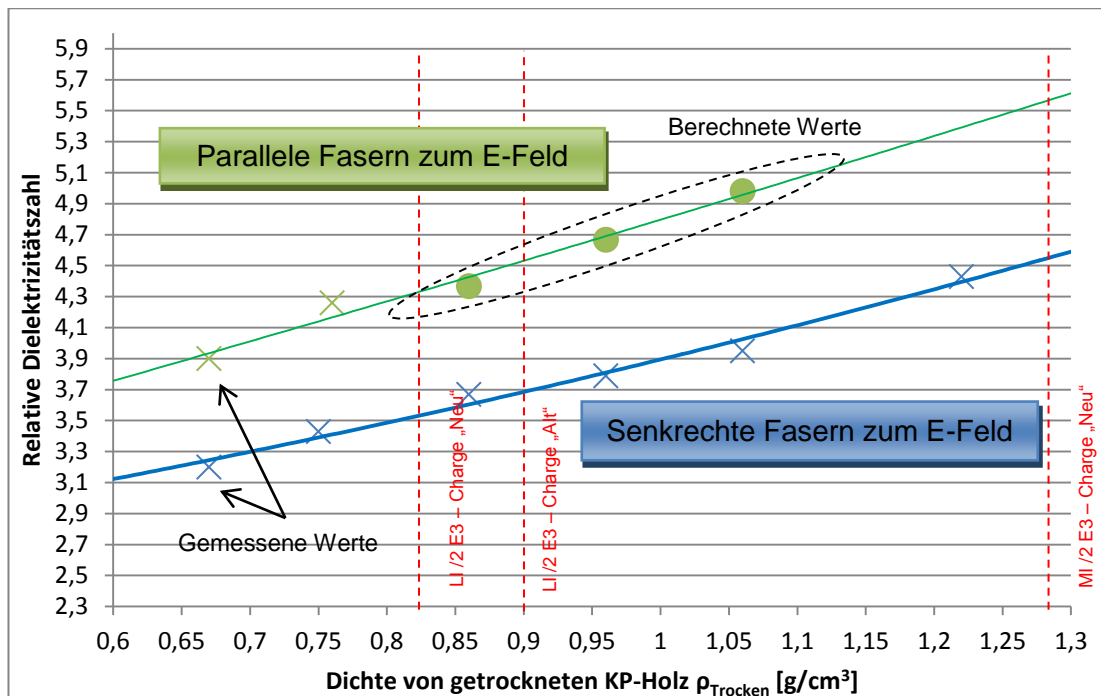


Abbildung 3-36 Die relative Dielektrizitätszahl für Feldbeanspruchungen an parallelen und senkrechten Fasern in Abhängigkeit von der trockenen Dichte

Aus dem Diagramm kann folgender Kurvenverlauf für die dichteabhängige relative Dielektrizitätszahl für Feldbeanspruchungen an parallelen und senkrechten Fasern entnommen werden. Die Funktionen der jeweiligen Kurven sind in der folgenden **Formel 3-5** dargestellt.

$$\epsilon_p(\rho_{\text{Trocken}}) = 0,1715 \cdot \rho_{\text{Trocken}}^2 + 2,3249 \cdot \rho_{\text{Trocken}} + 2,3$$

$$\epsilon_s(\rho_{\text{Trocken}}) = 0,5582 \cdot \rho_{\text{Trocken}}^2 + 1,0362 \cdot \rho_{\text{Trocken}} + 2,3$$

Formel 3-5 Die anisotrope Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der trockenen Dichte

Anhand der **Abbildung 3-36** ist zu erkennen, wie stark die anisotrope relative Dielektrizitätszahl von der Dichte abhängig ist. In diesem Diagramm ist es nicht möglich den Toleranzbereich der Rohdichte von dem verwendeten KP-Holzserien anzugeben, da es sich hier um die getrocknete Dichte von KP-Holz handelt.

Nach der Theorie sollten die relativen Dielektrizitätszahlen beider Faserrichtungen mit zunehmender Materialdichte auf einen gemeinsamen Wert zustreben, da die Aufnahme von Öl im KP-Holz sinkt. Bei einer Ölaufnahme von 0 % ist die reine Zellulose zu messen. Die **Formel 3-5** berücksichtigt nicht die Ölaufnahme von KP-Holz.

Wegen der unzureichenden Messpunkte sind die Funktionen $\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}})$ und $\epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}})$ nur als mögliche Richtwerte festzuhalten, sind aber aufgrund der Versuche mit niedrig- und mittelverdichteten KP-Holzstäben für die Auswertung notwendig.

Für die dielektrische Untersuchung mit ölprägnierten Phenolharzproben steht lediglich ein Messwert zur Verfügung, da sich bei der Imprägnierung die anderen Versuchsproben ohne Elektrodenteller stark verformt haben und bei leichter Beanspruchung gebrochen sind. Die **Tabelle 3-11** zeigt die relative Dielektrizitätszahl $\epsilon_{\text{Phenolharz}}$ und den Verlustfaktor $\tan \delta$ einer einzigen Probe. Für die weitere Auswertung dient dieses Ergebnis als Richtwert.

Probe	$\epsilon_{\text{Phenolharz}}$	$\tan \delta$
R 4	2,65	1,61E-02

Tabelle 3-11 Ergebnis der dielektrischen Untersuchung von ölprägniertem Phenolharz

3.8.5 TE-, Überschlag- und Durchschlagsuntersuchungen

Die Ergebnisse jeder Messreihe für die TE-, Überschlag- und Durchschlagsuntersuchung ist im Anhang unter Kapitel 9.6 hinterlegt. Hier ist die Ereignistabelle von jeder Messreihe mit jeder bewerteten Probe dargestellt. Des Weiteren ist die erwartete Ereigniseinsatzspannung, der Mittelwert der Einsatzspannungen und deren Standardabweichungen aufgezeigt. Die Mittelwerte und die Standardabweichungen für die Einsatzfeldstärken werden für das Erstereignis und für den Über- und Durchschlag im Öl sowie im Material berechnet (siehe Kapitel 3.8).

4 Simulation

4.1 Modellbildung und Simulation

Die Berechnungen der elektrischen Feldstärke an der Grenzfläche von Öl/KP-Holz und im KP-Holz unter Berücksichtigung einer Anisotropie erfolgen mit dem numerischen Feldberechnungsprogramm „COMSOL Multiphysics 4.1“. Dabei ist möglichst auf eine praxisnahe Modellierung zu achten, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Als Spannungswerte für die Simulation werden die Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsspannungen der Messreihen genutzt.

4.2 Vereinfachung für 2D-Feldberechnungen

3D-Feldsimulationen sind aufgrund hoher Rechenzeiten, großer Speicherkapazitäten und der sehr aufwendigen Auswertung der Ergebnisse nach Möglichkeit durch 2D-Feldsimulationen zu ersetzen. Im vorliegenden Fall ist dies ohne Genauigkeitsverlust möglich. Zum Verständnis wird die **Abbildung 4-1** mit einem Ausschnitt und dem Querschnitt von den zu untersuchenden KP-Holzstäben in einem 3D und 2D Modell betrachtet.

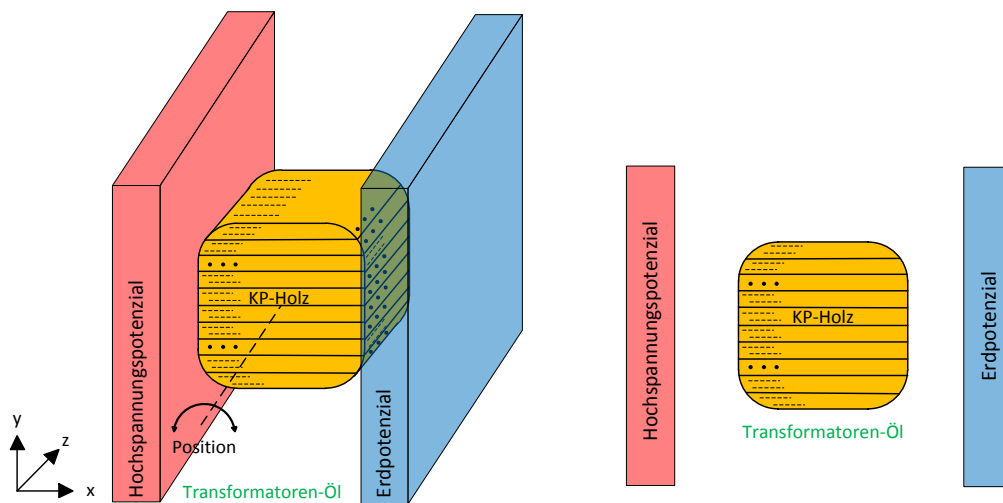


Abbildung 4-1 Vereinfachung der Feldberechnung von 3D- auf 2D-Modellen

Die Elektrodenanordnung entspricht der in der Versuchsdurchführung. Idealerweise wird ein homogenes E-Feld in x-Richtung erzeugt. Da keine elektrische Feldkomponente in der z-Richtung vorhanden ist, können sich die relativen Dielektrizitätszahlen der einzelnen ölprägnierten Furniere in z-Richtung nicht bemerkbar machen. Gleiches gilt, wenn die Elektroden oder der Probekörper für eine andere Winkelstellung um die z-Achse gedreht werden. [5]

4.3 Berücksichtigung von scharfen Kanten in der Simulation

Feldberechnungen an scharfen Ecken oder Kanten führen mit zunehmender Diskretisierung des Netzes zu höheren elektrischen Feldstärken. Die **Tabelle 4-1** stellt den oben beschriebenen Sachverhalt dar.

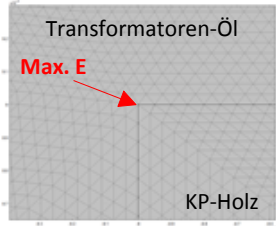

Netzqualität	Diskretisierungsnetz	Max. E [kV/mm]
Niedrig		9,24
Hoch		11,31

Tabelle 4-1 Max. E an scharfen Ecken und Kanten mit unterschiedlichen Diskretisierungsstufen

Um den Effekt der scharfen Ecken und Kanten zu vermeiden, werden die Ecken mit einer Abrundung von 10^{-3} mm versehen. Die Feldstärkenspitzen werden bei den Ergebnissen vernachlässigt, da bei der Durchschlagsuntersuchung der Proben mit einer Position von 0° der Durchschlagkanal selten an der Ecke erfolgt. Lediglich die Untersuchungen mit Stäben schräg im E-Feld zeigen sehr häufig, dass die Ecke den Entladungsverlauf beeinflusst. [5]

4.4 Geometrie-/ Modellaufbau

Das längsgeschichtete 2D KP-Holzmodell besteht aus zehn Schichten und hat eine Größe von 18 x 18 mm, so dass jedes Furnier eine Größe von 1,8 x 18 mm hat. Für die Höhe der anliegenden Hochspannung U wird der Mittelwert für die Ereigniseinsatzspannung und die Gleit- und Durchschlagsspannung aus der jeweiligen Messreihe eingesetzt. Der Elektrodenabstand s ist ebenso aus den Messergebnissen zu entnehmen. Die **Abbildung 4-2** zeigt die drei möglichen Konstellationen von KP-Holz im Öl.

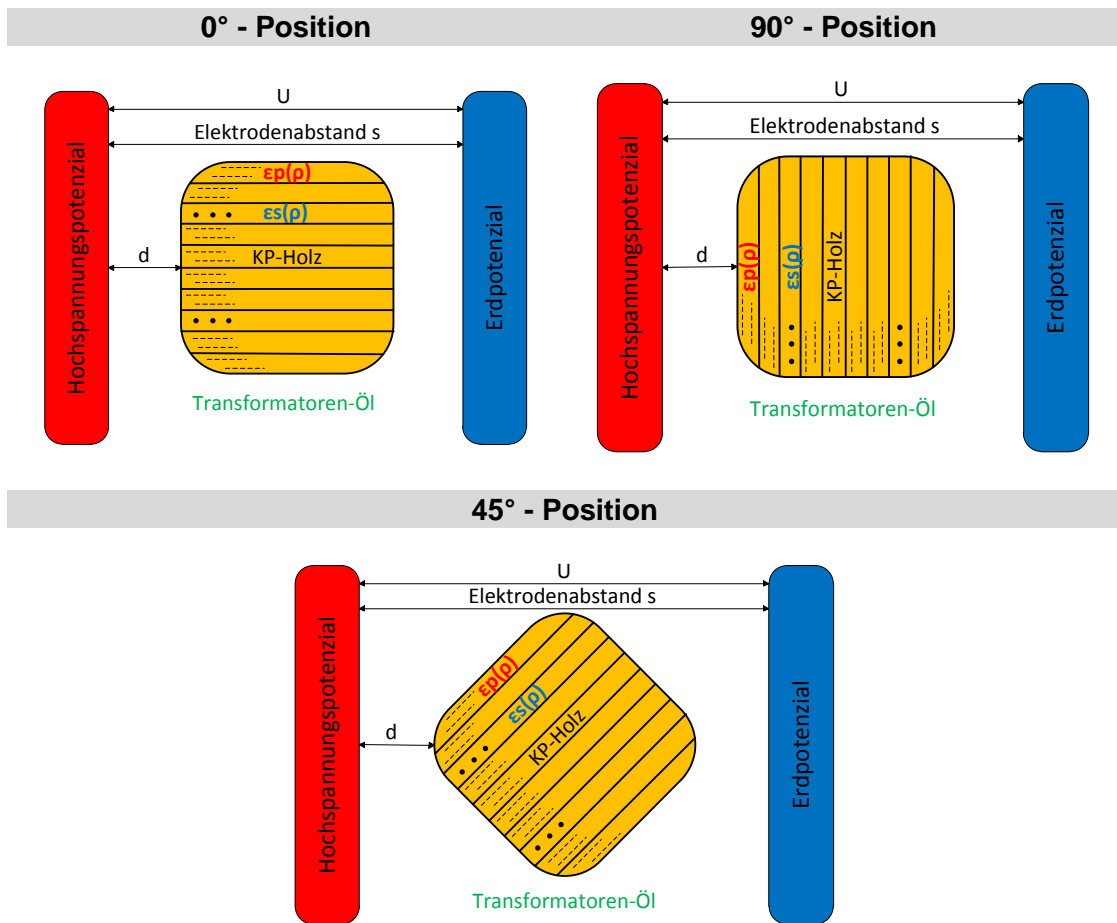


Abbildung 4-2 2D Simulationsmodelle mit Ölspalt d und drei unterschiedlichen Winkelstellungen 0° , 45° und 90° für die Feldberechnung

Im nächsten Schritt folgen die spezifischen Materialeigenschaften. Dabei werden die dichteabhängigen anisotropen relativen Dielektrizitätszahlen der einzelnen Holzfurniere und die relativen Dielektrizitätszahlen für die verwendeten Beschichtungen benötigt.

Die **Tabelle 4-2** zeigt alle benötigten relativen Dielektrizitätszahlen.

Messreihe	$\rho_{\text{Trocken}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$\epsilon_P(\rho_{\text{Trocken}})$	$\epsilon_S(\rho_{\text{Trocken}})$	ϵ_r
A, B, C	0,83	4,35	3,55	-
B.1, C.1, D, E, F, G, H, I, J, K, RS A, RS B, RS C, RS D, RS E	0,9	4,53	3,68	-
K, K.1	1,28	5,56	4,54	-
R4 (Phenolharz)	-	-	-	2,65
Ölpapier (Kapitel 2.8)	1,1	-	-	4,2
Transformatoren-Öl	-	-	-	2,3

Tabelle 4-2 Die relativen Dielektrizitätszahlen von allen Materialien in der Simulation

Der Mittelwert des Ereigniseinsatzes, der Überschlag- und Durchschlagsspannung mit deren Standardabweichung, sowie den Elektrodenabstand jeder Messreihe wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Messreihe	Elektrodenabstand s [cm]	Ereigniseinsatzspannung		Überschlag- und Durchschlagsspannung	
		Mittelwert U [kV]	Stabw. U [kV]	Mittelwert U [kV]	Stabw. U [kV]
A	-	87,7	18,7	97,2	17,4
B	20,5	106,4	25,9	119,3	21,7
B.1	20,5	106,5	19	111,6	19,8
C	28	148	13,7	182,1	33,3
C.1	28	156	27,6	163,5	28,0
D	21	154,5	22,7	169,9	12,7
E	-	89,7	21,4	92,1	19,8
F	23	157	23,1	179,9	28,3
G	20,5	113,9	18,2	118,9	19,7
H	20,5	106,5	22,2	110	18,7
I	20,5	75	27,4	87,6	31,2
J	20,5	97,2	32,4	110,3	19
K	20,5	114,4	18,1	118,2	15,4
K.1	20,5	97,1	16,1	100,9	18,5
RS A	20,5	103,4	20,1	106,3	20,5
RS B	26,5	165,3	36,9	168	40,6
RS C	23	113,6	20,1	122,7	26,7
RS D	20,5	78,2	15,7	89,5	21,5
RS E	20,5	75,2	25,8	75,6	25,7

Tabelle 4-3 Messergebnisse der TE-, Überschlag- und Durchschlagsuntersuchung

4.5 Simulationsergebnisse

4.5.1 Ermittlung der auftretenden elektrischen Feldstärken im Öl und im KP-Holz

Um die elektrischen Feldstärken an der Grenzfläche zwischen Öl/KP-Holz im Öl und im Material unter Berücksichtigung einer Anisotropie, beim Entladungseinsatz zu ermitteln, werden die Variationen mit einem Feldberechnungsprogramm nachgebildet. Als Spannungswerte werden die Mittelwerte der Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagseinsatzspannungen nach **Tabelle 4-3** eingesetzt.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen den berechneten Betrag des elektrischen Feldes als „Oberflächenplot“. In diesen Feldbildern ist das Feldstärkemaximum durch das dunkelste Rot und das Feldstärkeminimum mit dem dunkelsten Blau gekennzeichnet. Neben dem Feldbild wird für jede Untersuchung der Betrag der elektrischen Feldstärke im Öl, sowie im Material angegeben.

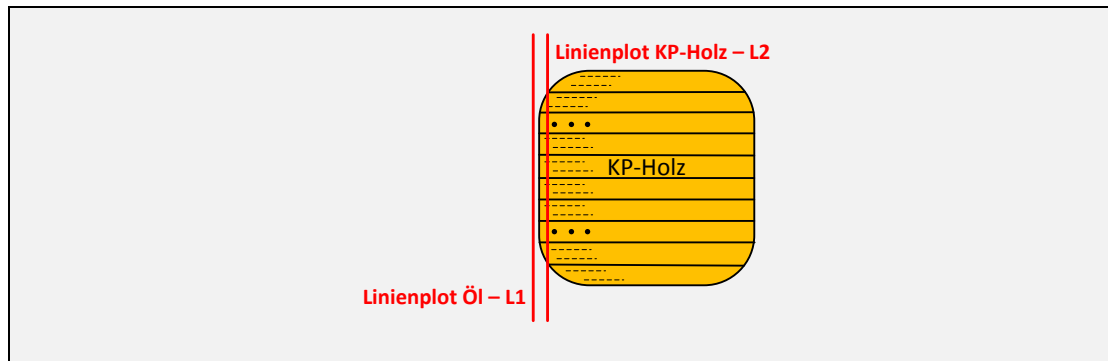
Die **maximale Feldstärke im Öl ist bei jeder Konstellation** im Bereich der Prüflingskante zu finden. Da der Verlauf des Durchschlages im Öl nicht ersichtlich ist, wird der berechnete Feldstärkebetrag an der Kante angenommen. Bei den Stäben schräg im E-Feld ist nach der Untersuchung häufig festzustellen, dass der Durchschlag an der Ecke startet, entlang der abgesägten Seite verläuft und dann am Rand oder häufig an der Mitte das Material durchschlägt.

Die **maximale Feldstärke im Material bei der Position von 0°**, setzt sich aus dem Mittelwert der maximalen Feldstärken bei den senkrechten Fasern zum E-Feld und den parallelen Fasern zum E-Feld in der Mitte zusammen, da sich gezeigt hat, dass etwa 50 % der Durchschläge an der Grenzschicht beider Faserrichtung vorliegen.

Die **maximale Feldstärke im Material bei der Position von 45°**, setzt sich aus dem Mittelwert der maximal und der mittleren auftretenden Feldstärke im Material zusammen, da nach der Untersuchung, Durchschläge am Rand und in der Mitte aufgefallen sind.

Die **maximale Feldstärke im Material bei der Position von 90°**, setzt sich aus dem Mittelwert der maximalen und der minimalen auftretenden Feldstärke im Material zusammen.

Die **Tabelle 4-4** zeigt den Verlauf des Betrages der elektrischen Feldstärke an der Grenzschicht Öl/KP-Holz im Öl und im Material an.



Position	Grenzfeldstärke E im Öl - L1	Grenzfeldstärke E im KP-Holz - L2
0°		
45°		
90°		

Tabelle 4-4 Der Verlauf des Betrages der elektrischen Feldstärke E an der Grenzschicht Öl/KP-Holz im Öl und im Material (rote Punkte zeigen den gewählten Feldstärkewert, aus den grünen Punkten wird der Mittelwert gebildet)

4.5.2 Ergebnisse der Simulation - Versuchsanordnung



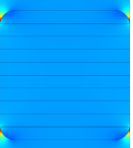

Oberflächenplot Farbskala: 3 - 10 kV/mm	Mess- reihe	Nr.	Max. E_{mittel} [kV/mm] Ereigniseinsatz		Max. $E_{\text{ÜDPmittel}}$ [kV/mm] Über- und Durchschlageseinsatz	
			Öl	KP-Holz	Öl	KP-Holz
	A	1	-	4,87	-	5,4
	B	1	8,8	4,88	9,87	5,47
	E	2	-	4,96	-	5,1
	RS A	2	8,82	4,72	9,07	4,85

Tabelle 4-5 Max. E für den Ereigniseinsatz, Über- und Durchschlag im Öl und im Material - Versuchsanordnung

Die Messreihe A, B und C aus der Materialcharge „Neu“ enthält eine geringe Anzahl von Furnieren in der Mitte, so dass das Feldbild nicht direkt übereinstimmt. Da kein Unterschied der Feldstärkebeträge mit einer geringen Anzahl von Furnieren festzustellen ist, wird mit diesem Modell gearbeitet.

4.5.3 Ergebnisse der Simulation - Winkelstellung / Kanteneffekt

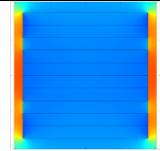
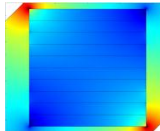
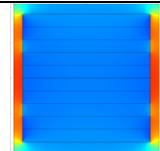
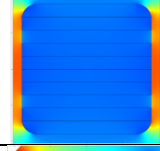
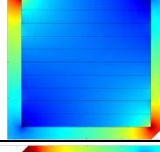
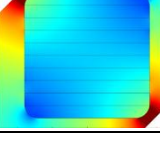
Oberflächenplot Farbskala: 3 - 10 kV/mm	Mess- reihe	Nr.	Max. E_{mittel} [kV/mm] Ereigniseinsatz		Max. $E_{\text{ÜDPMittel}}$ [kV/mm] Über- und Durchschlageinsatz	
			Öl	KP-Holz	Öl	KP-Holz
	B	3.1	8,8	4,88	9,87	5,47
	C	3.1	*11,8 / 9,2	4,93	*14,52 / 11,32	6,07
	B.1	3 3.2	9,16	4,85	9,6	5,08
	RS A	3 4.1	8,82	4,72	9,07	4,85
	C.1	4 3.2	*13,2 / 10	5,14	*13,83 / 10,48	5,39
	RS B	4 4.1	11,78	5,91	11,87	6,01

Tabelle 4-6 Max. E für den Ereigniseinsatz, Über- und Durchschlag im Öl und im Material – Winkelstellung / Kanteneffekt (*Die hohen Feldstärkebeträge entstehen genau in der Nähe der Ecke durch die Feldberechnung)

4.5.4 Ergebnisse der Simulation - Ölspaltabhängigkeit

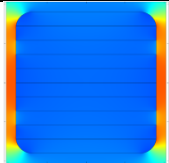
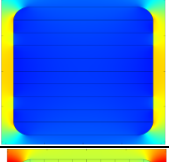
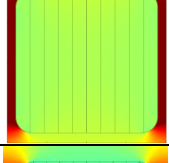
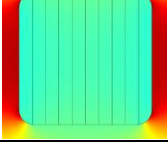
Oberflächenplot Farbskala: 3 - 10 kV/mm	Mess- reihe	Nr.	Max. E_{mittel} [kV/mm] Ereigniseinsatz		Max. $E_{\text{ÜDPMittel}}$ [kV/mm] Über- und Durchschlageinsatz	
			Öl	KP-Holz	Öl	KP-Holz
	RS A	5	8,82	4,72	9,07	4,85
	RS C	5	8,11	4,28	8,75	4,62
	D	6	10,88	6,7	11,96	7,37
	F	6	9,78	5,94	11,21	6,81

Tabelle 4-7 Max. E für den Ereigniseinsatz, Über- und Durchschlag im Öl und im Material – Ölspaltabhängigkeit

4.5.5 Ergebnisse der Simulation – Rohdichte

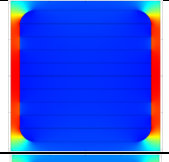
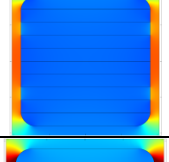
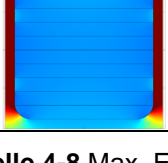
Oberflächenplot Farbskala: 3 - 10 kV/mm	Mess- reihe	Nr.	Max. E_{mittel} [kV/mm] Ereigniseinsatz		Max. $E_{\text{ÜDPMittel}}$ [kV/mm] Über- und Durchschlageinsatz	
			Öl	KP-Holz	Öl	KP-Holz
	K.1	7 7.1	9,71	4,23	10,1	4,4
	RS A	7	8,82	4,72	9,07	4,85
	K	7.1	11,47	4,98	11,83	5,15

Tabelle 4-8 Max. E für den Ereigniseinsatz, Über- und Durchschlag im Öl und im Material – Rohdichte

4.5.6 Ergebnisse der Simulation – Oberflächenbehandlung und -beschaffenheit

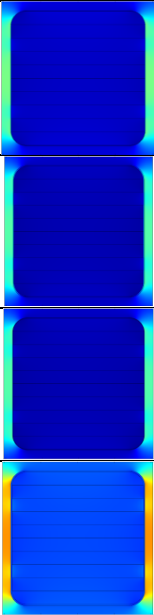
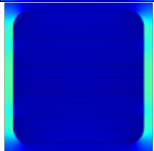
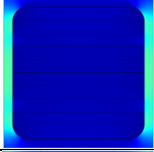
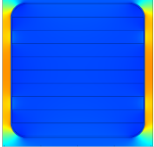
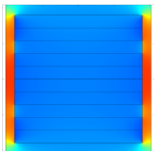
Oberflächenplot Farbskala: 3 - 10 kV/mm	Messreihe	Nr.	Max. E _{mittel} [kV/mm] Ereigniseinsatz		Max. E _{ÜD} P _{mittel} [kV/mm] Über- und Durchschlageinsatz	
			Öl	KP-Holz	Öl	KP-Holz
	RS D	8	6,64	3,56	7,6	4,7
	RS E	8	6,36	3,45	6,15	3,47
	I	9	6,41	3,43	7,48	4,01
	J	9	8,35	4,45	6,47	5,05
	G	10	9,8	5,19	10,23	5,41
	B.1	10	9,16	4,85	9,6	5,08
	H	10	9,16	4,85	9,46	5

Tabelle 4-9 Max. E für den Ereigniseinsatz, Über- und Durchschlag im Öl und im Material – Oberflächenbehandlung und -beschaffenheit

4.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus der Simulation haben im Vergleich mit den berechneten Werten nach Kapitel 3.8 etwa 2 % ähnliche Ergebnisse gezeigt. Darum erfolgt die Interpretation der verschiedenen Einflüsse unter Berücksichtigung der Streuung im nachfolgenden Kapitel 5 „Interpretation der Versuchsergebnisse“.

5 Interpretation der Versuchsergebnisse

Neben der Simulation im Kapitel 4 erfolgt hier die Interpretation der Ergebnisse über die standardüblichen Methoden, wie z.B. MS Excel 2010 mit Mittelwert und Standardabweichung als Balkendiagramm und mit MS Visual X-SEL 11.0 für die Erstellung von 2-parametrischen Weibullverteilungen mit den dazugehörigen Weibull-Parametern.

Um die jeweiligen Einflüsse vergleichen zu können, werden die berechneten Feldstärken der Messreihen in Diagrammen gegenübergestellt. Um die Übersicht zu bewahren, werden die Erstereignisfeldstärken und die Über- und Durchschlagsfeldstärken mit deren Standardabweichung in getrennten Diagrammen gegenübergestellt. Gleiches gilt für die Grenzfeldstärke in Öl. Neben diesen Diagrammen werden die Messreihen nach ihren Ereignissen und Durchschlagsorten am Material untersucht. Da es nicht immer ersichtlich ist, um welche Überschlagsart es sich handelt, werden beide Varianten als Überschlag an Probe (ÜP) zusammengefasst. Neben diesem wird weiter zwischen TE, DP und DV unterschieden. Die Durchschlagsorte werden zuerst grob in zwei Klassen unterteilt: Durchschläge in der Mitte und am Rand.

Als zweites wird der Verlauf des Durchschlages unterteilt in: Beteiligung von nur parallellaufende Fasern oder von beiden Faserrichtungen zum E-Feldvektor. Die **Abbildung 5-1** erklärt die Begriffe für die Bewertung der Durchschlagsorte.

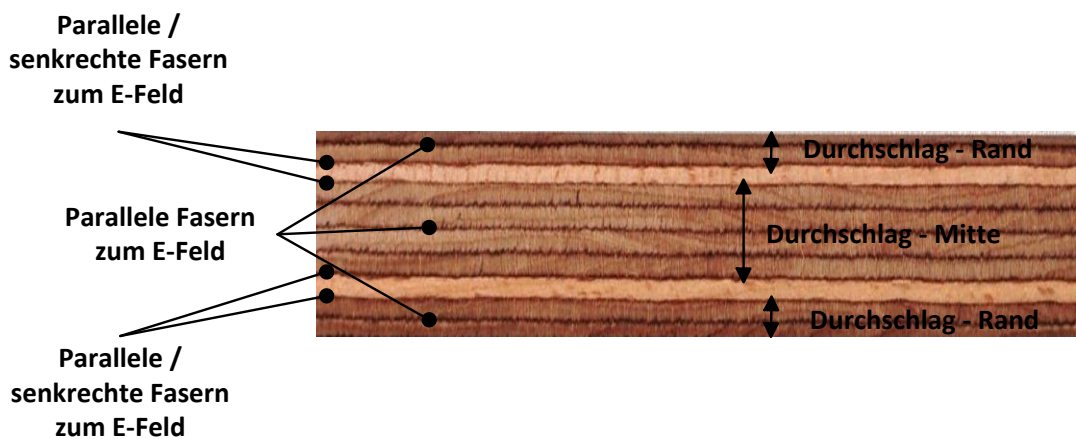


Abbildung 5-1 Definition Durchschlag: Rand / Mitte, parallele und parallele / senkrechte Fasern zum E-Feld

5.1 Ereignisseinsatzfeldstärken

Generell zeigt sich bei jeder Messreihe eine hohe Streuung. Unter anderem weil mit schwankenden Umweltbedingungen und mit einem nicht homogenen Isoliermaterial gearbeitet wird. Allgemeingültige Aussagen, die für jede Bedingung gelten, sind nur schwer zu treffen.

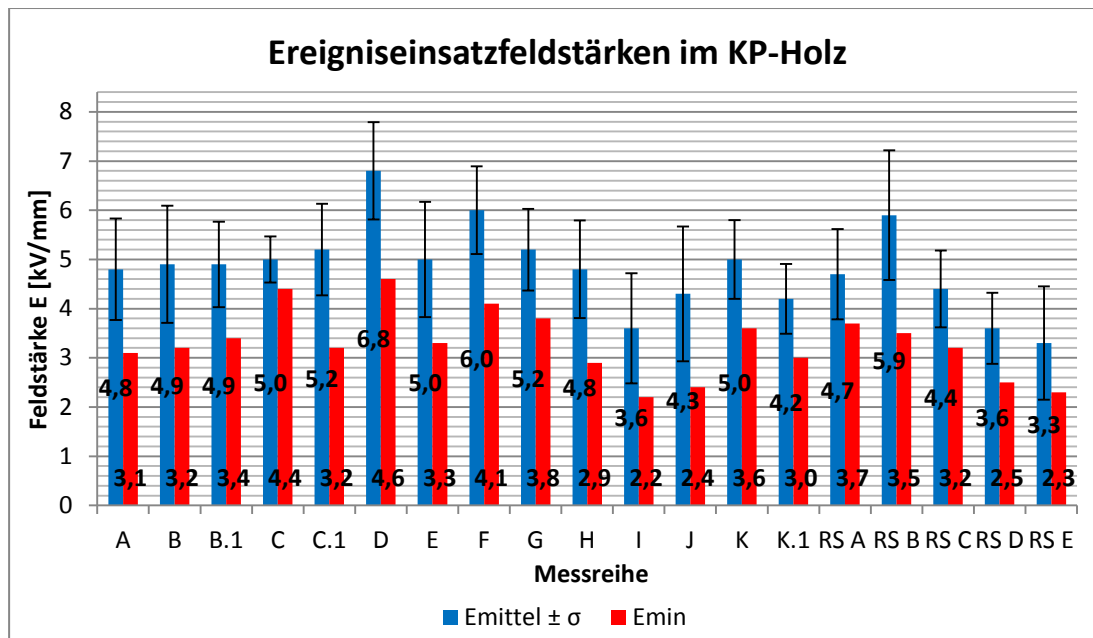


Abbildung 5-2 Ereigniseinsatzfeldstärken im KP-Holz: $E_{mittel} \pm \sigma$

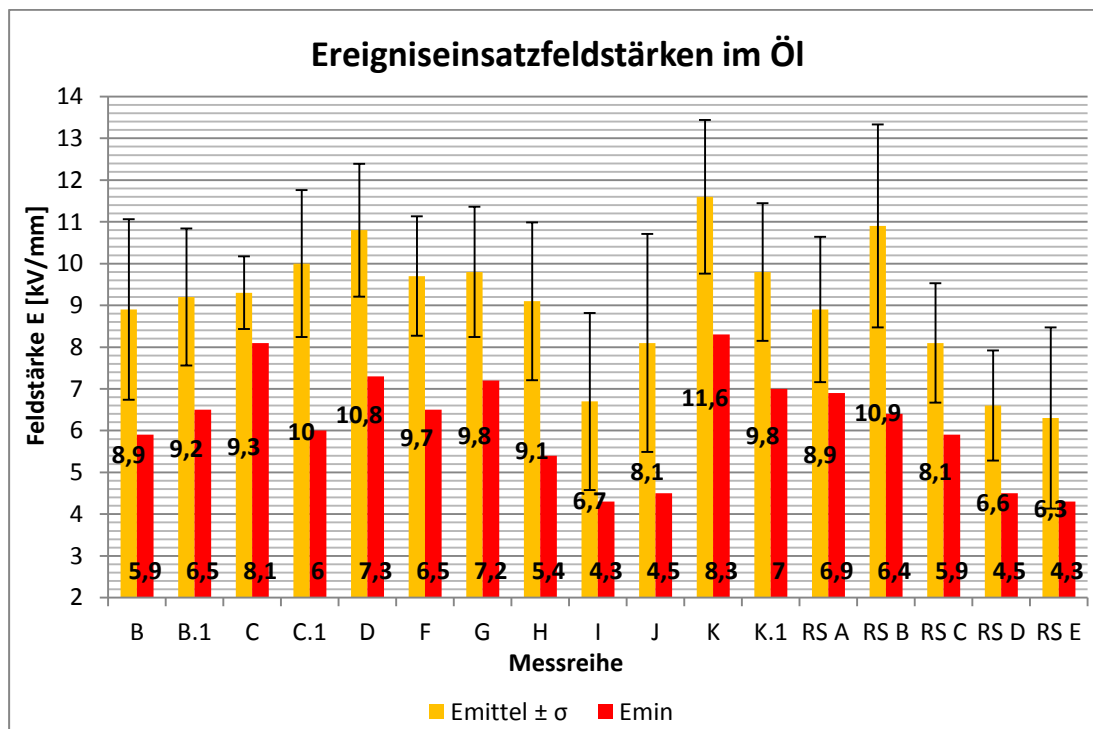


Abbildung 5-3 Ereigniseinsatzfeldstärken im Öl: $E_{mittel} \pm \sigma$

5.1.1 Versuchsanordnung

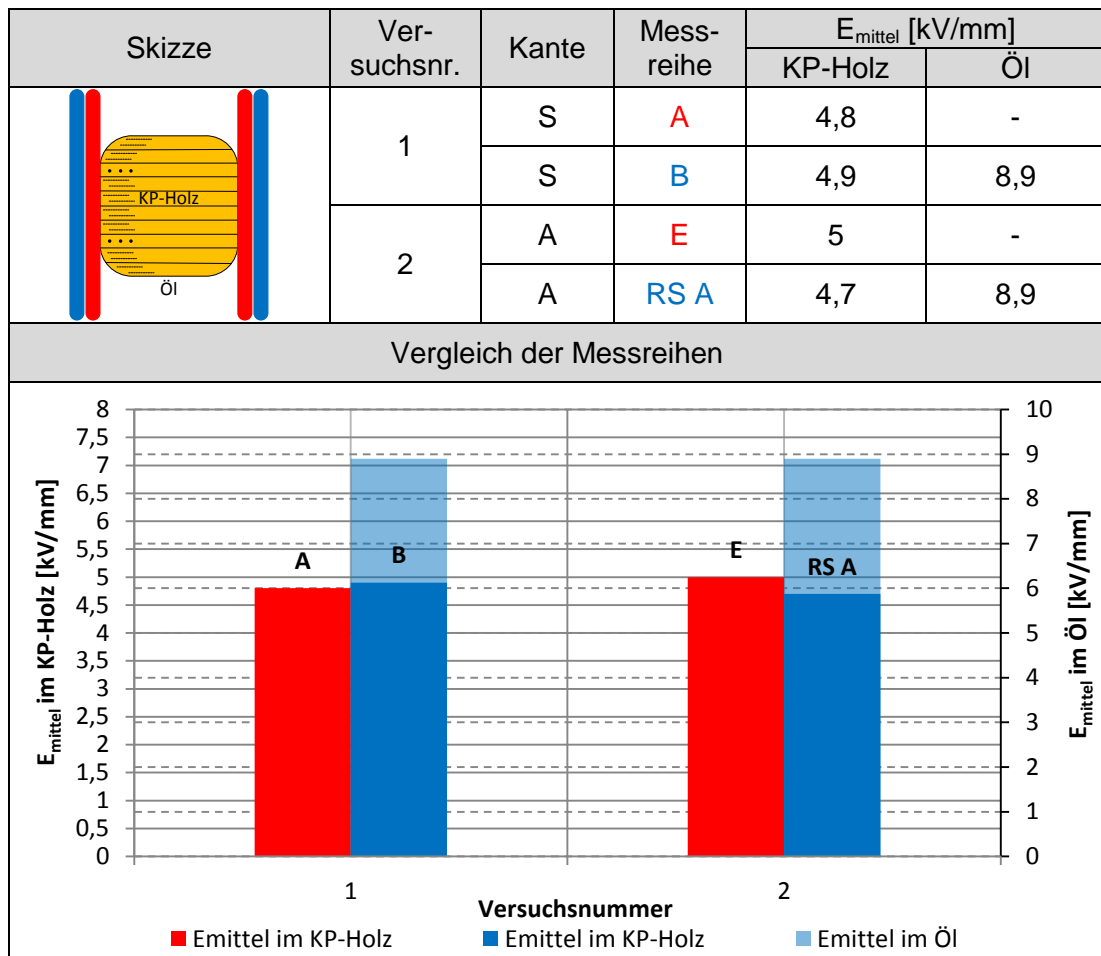


Tabelle 5-1 Ereigniseinsatzfeldstärke E_{mittel} – Versuchsanordnung; Scharfe (S) und abgerundete (A) Kanten (Elektrodenanordnung: rot - anliegend; blau - 1 mm Ölspalt)

Der Vergleich der Messreihen A und B, sowie E und RS A zeigt einen Vergleich der Versuchsanordnung mit scharfen und abgerundeten Kanten. Betrachtet man die Mittelwerte der Messreihen bezüglich der Grenzfeldstärke im Material, ist kein großer Unterschied zu erkennen. Das scharfkantige Material der Charge „Neu“ hat eine mittlere Grenzfeldstärke im Material von ca. 4,85 kV/mm, sowohl bei anliegenden Proben als auch bei 1 mm Ölspalt. Der Unterschied bei abgerundeten Material beträgt 0,3 kV/mm und machen einen Unterschied von 6 % aus. Die Grenzfeldstärke im Öl variiert um 8,9 kV/mm und kann Feldstärken über 10 kV/mm annehmen. Die Simulation zeigen ähnliche Ergebnisse. Unter Berücksichtigung der Streuung ist kein eindeutiger Unterschied zwischen Untersuchungen mit anliegenden und mit einem Ölspalt versehenen Proben festzustellen. Da bei anliegendem Material der Effekt der Feldverdrängung nicht zum Tragen kommt und die Feldstärke im Material bei anliegenden und mit einem Ölspalt versehenen Proben nahezu gleich groß sind, wird die Ursache für die elektrische Festigkeitsminderung das Material sein.

5.1.2 Winkelstellung / Kanteneffekt

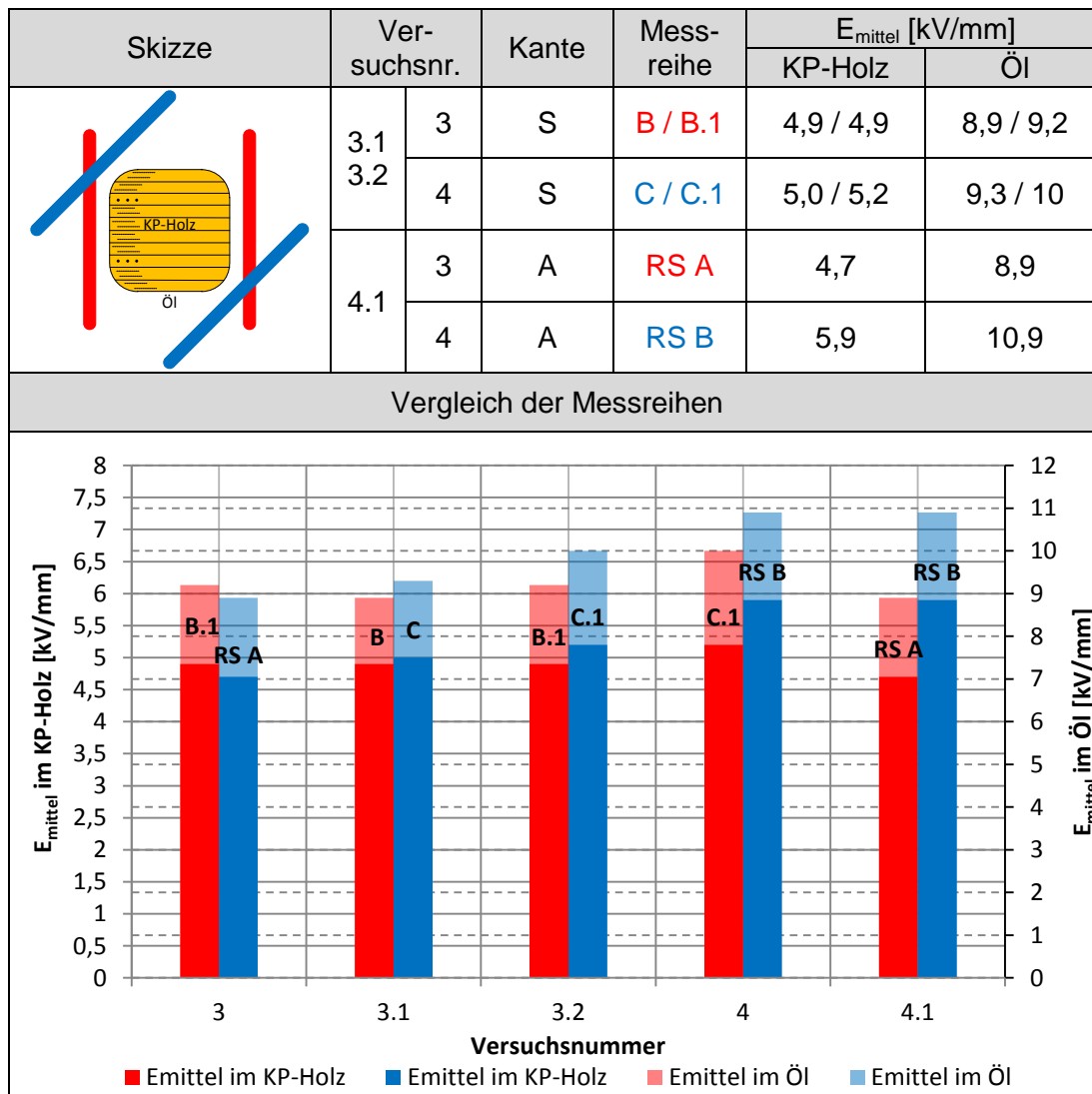


Tabelle 5-2 Ereigniseinsatzfeldstärke E_{mittel} – Winkelstellung / Kanteneffekt; Scharfe (S) und abgerundete (A) Kanten; (1 mm Ölspalt, Winkelstellung: rot – 0°; blau – 45°)

Der Vergleich der Winkelstellung mit scharfkantigen Materialien ist unter den Messreihen B und C aus der Materialcharge „Neu“ und den Messreihen B.1 und C.1 aus der Materialcharge „Alt“ möglich. Ersteres zeigt, dass die Feldstärke im Material, bei scharfkantigem Material mit den Probenstellung 0° und 45° ca. 5 kV/mm beträgt. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur um etwa 2 % (0,1 kV/mm). Für die Grenzfeldstärke im Öl gilt etwa 4 %. Bei den Messreihen B.1 und C.1 variiert die Feldstärke im Material zwischen 4,9 – 5,2 kV/mm. Diese Abweichung machen schon ca. 6 % aus. Da die Proben beider Messreihen von Hand auf eine gleiche Oberflächenbeschaffenheit geschliffen worden ist, könnte vermutlich die scharfe Ecke ein wenig abgerundet sein, da im folgenden Vergleich festgestellt wird, dass abgerundete Stäbe schräg im E-Feld deutlich höher elektrisch beansprucht werden können.

Der Vergleich der Winkelstellung mit abgerundeten Materialien kann aus den Messreihen RS A und RS B entnommen werden. Die Feldstärke im Material variiert bei den Probenstellungen 0° und 45° zwischen 4,7 und 5,9 kV/mm. Prozentual gesehen unterscheiden sie sich etwa um 20 %. Die Grenzfeldstärke im Öl beträgt im Mittel maximal 10 kV/mm. Die Simulation zeigt ähnliche Ergebnisse. Der Grund der hohen elektrischen Festigkeit bei einer Probenstellung von 45° könnte an dem kleineren hoch elektrisch beanspruchten Öl-Volumen liegen, wie auch an der Abrundung der Kante.

Mit den Messreihen B.1, RS A und C.1 und RS B kann ein Vergleich der Probenstellung mit scharfen und abgerundeten Kanten erfolgen. Feldbeanspruchungen parallel zur Schichtung mit abgerundeten und scharfkantigen Material zeigen bezüglich der elektrischen Beanspruchung im Material einen Unterschied von 0,2 kV/mm. Die Vermutung, dass scharfe Kanten denkbare TE-Quellen sind und damit für eine frühzeitige Entladung sorgen, bestätigt sich nicht. Im Kapitel 2.6 wurde darauf hingewiesen, dass der Einfluss der Kante keine Feldstärkeüberhöhung liefert. Für diese Anordnung der Stäbe und unter Berücksichtigung der Streuung scheint der Beweis damit erbracht.

Anders ist der Vergleich der Kante bei Stäben schräg im E-Feld zu sehen. Die Feldsimulationen mit scharfkantigem Material zeigen, dass die Feldstärke an der Ecke im Öl ca. 13 kV/mm beträgt. Bei abgerundetem Material ist eine um etwa 16 % niedrigere Feldstärke zu beobachten. Während der Untersuchung der Stäbe nach ihren Durchschlagsverlauf ist festgestellt worden, dass der Durchschlag sehr häufig an der Prüflingsecke startet und sich dann seinen Weg zur Gegenelektrode entlang der gepressten Seite oder durch das Material bahnt. An diesen Beobachtungen ist zu erkennen, dass die Abrundung der Kante für die Stäbe schräg im E-Feld eine um 12 % höhere elektrische Feldbeanspruchung zulässt.

5.1.3 Ölspaltabhängigkeit

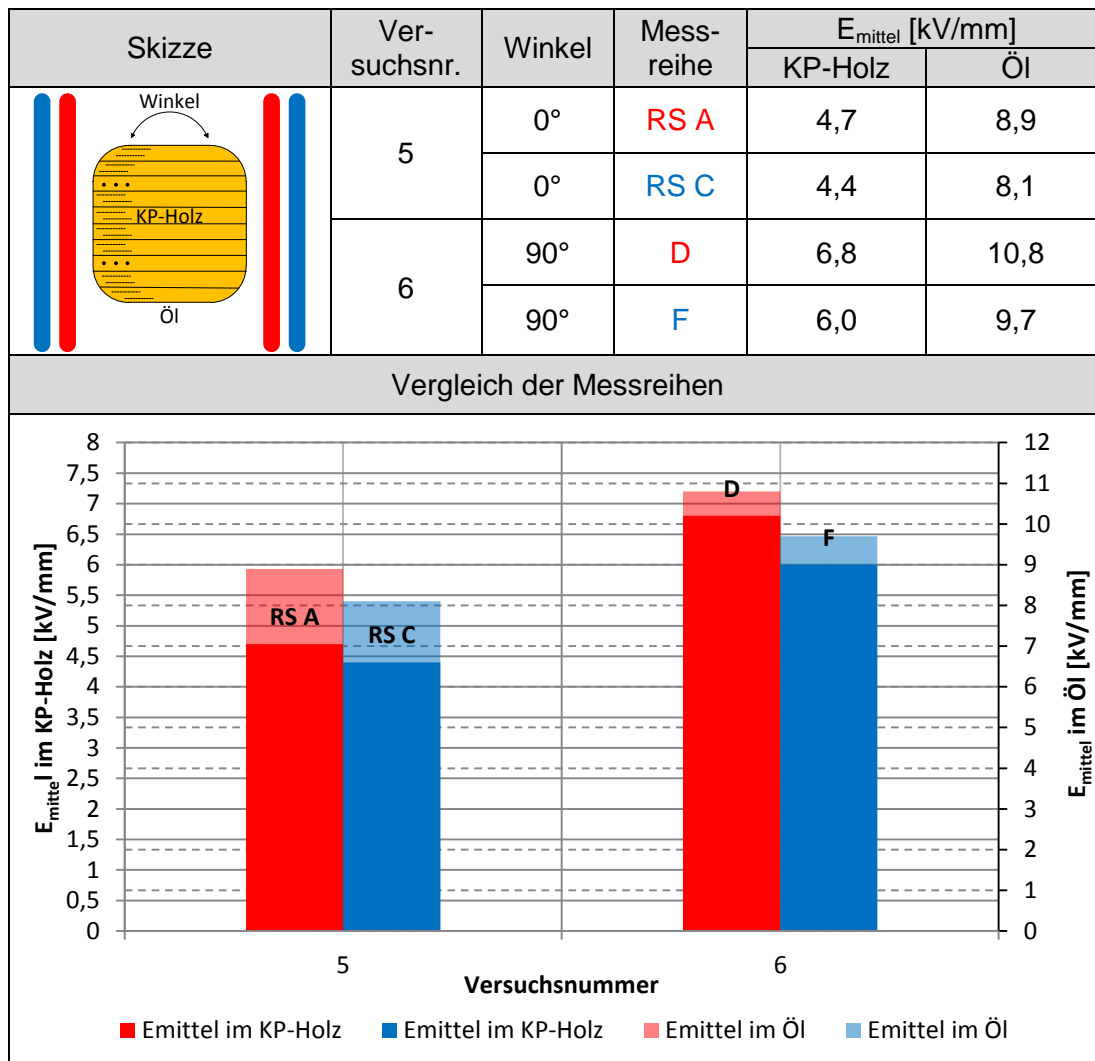


Tabelle 5-3 Ereigniseinsatzfeldstärke E_{mittel} – Ölspaltabhängigkeit; Scharfe (S) und abgerundete (A) Kanten (Ölabstand: rot – 1 mm, blau – 2 mm)

Für die Ölspaltabhängigkeit können die Messreihen RS A und RS C sowie D und F miteinander verglichen werden. Grundsätzlich zeigt sich, dass mit Zunahme der Ölspaltweite die elektrische Festigkeit abnimmt. Bei Feldbeanspruchung parallel zur Schichtung sinkt die elektrische Festigkeit im Material um ca. 6 %. Feldbeanspruchungen senkrecht zu Schichtung zeigen eine ca. 12 % geringere Festigkeit. Dass die beanspruchte Fläche und das Volumen der Probanden unverändert blieb, die elektrische Festigkeit des Materiales höher ist und sich nur das beanspruchte Ölvolumen vergrößert hat, ist darauf zurückzuführen, dass die elektrische Festigkeit von Öl nachgegeben hat. Bei Vergrößerung der Ölspaltweite auf 2 mm sinkt die elektrische Festigkeit von Öl um 10 % ab.

5.1.4 Rohdichte

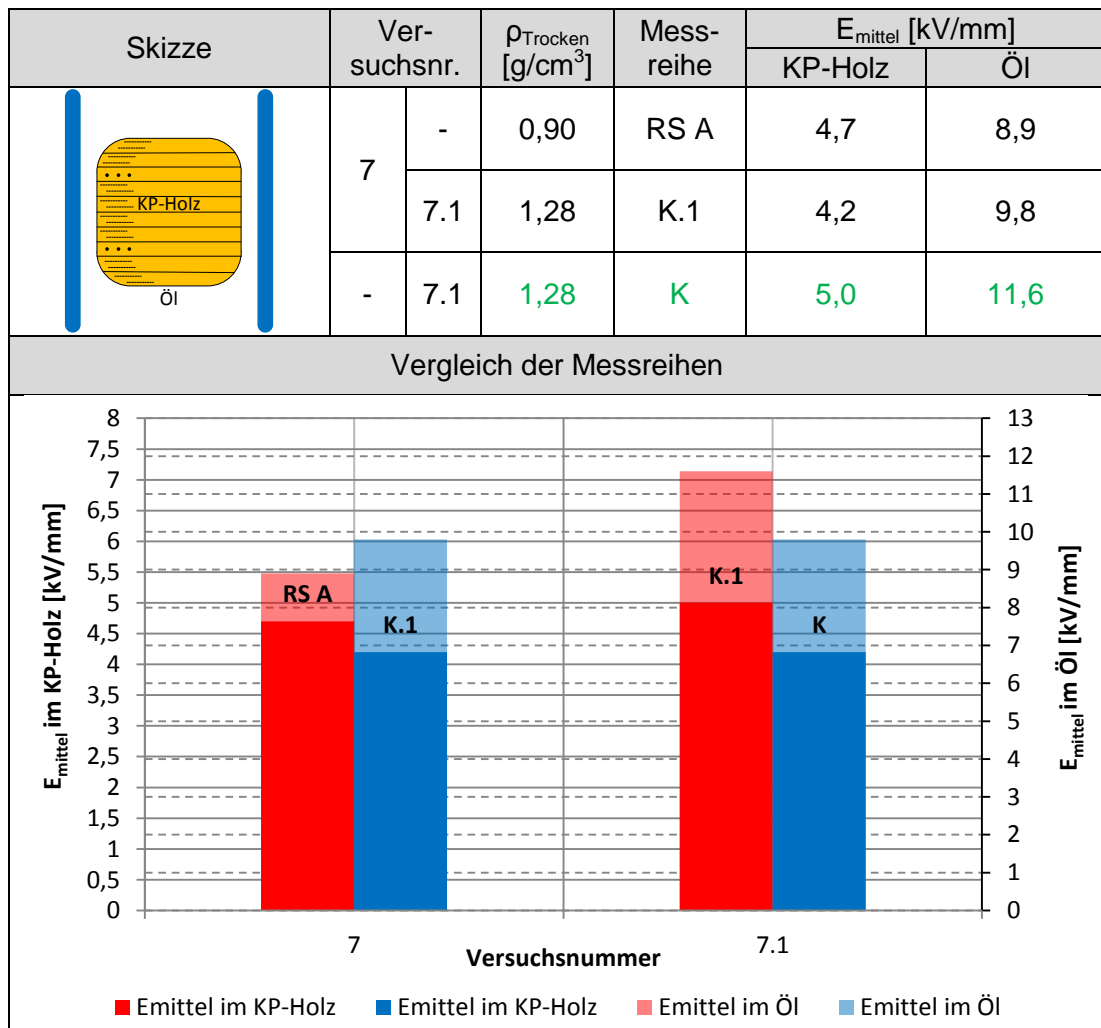


Tabelle 5-4 Ereigniseinsatzfeldstärke E_{mittel} – Rohdichte, 1 mm Ölabstand, abgerundetes Material (grün „Messreihe K“ - Oberflächenprofil unbekannt)

Der Vergleich der Rohdichten ist mit den Messreihen RS A und K.1 möglich. Die Vermutung, dass im mittelverdichteten Material eine niedrigere Feldstärke vorzufinden ist als bei leichtverdichtetem Material, bestätigt sich. Prozentual gesehen liegt der Unterschied bei etwa 10 %. Die Grenzfläche im Öl beim mittelverdichtetem Material wird mit einer um ca. 9 % höheren Feldstärke beaufschlagt und liegt bei etwa 9,8 kV/mm. Nach der Theorie sollte höherverdichtetes Material eine höhere elektrische Festigkeit aufweisen. Dieses Verhalten ist hier nicht zu beobachten. Zur Messreihe K.1 ist zu erwähnen, dass das aufbereitete Mineral-Öl im Prüfbehälter über die Ruhephase einem hohen Luftfeuchtegehalt ausgesetzt war, aufgrund innerbetrieblicher Störungen im Gebäude. Dadurch könnte die elektrische Festigkeit von Öl negativ beeinflusst werden, welches folglich für die niedrigeren Feldstärken verantwortlich ist. Als indirekte Vergleichsmessung kann die Messreihe K und K.1 vergli-

chen werden. Leider sind die Oberflächen der Messreihen nicht identisch. Die Oberfläche der Messreihe K fühlt sich glatter an, als die der vorbehandelten Messreihe K.1. Die Feldstärke im Innern beträgt 5 kV/mm und ähnelt unter Berücksichtigung der Streuung der der Messreihe RS A. Die Ereigniseinsatzfeldstärke im Öl beträgt 11,6 kV/mm. Dieser Wert liegt um etwa 16 % höher als bei Messreihe K.1 und etwa 23 % höher als bei Messreihe RS A.

5.1.5 Oberflächenbehandlung- und Beschaffenheit

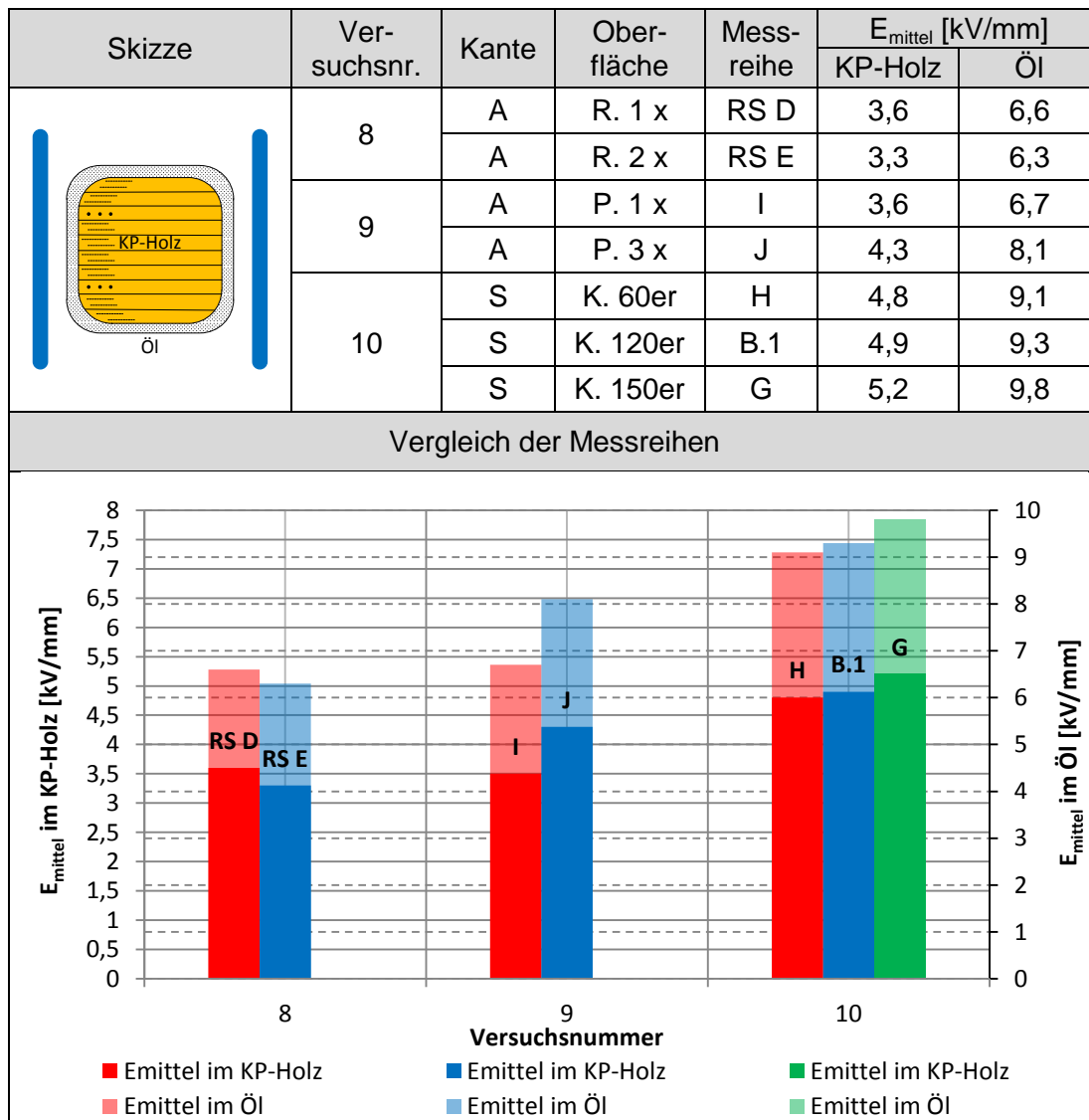


Tabelle 5-5 Ereigniseinsatzfeldstärke E_{mittel} – Oberflächenbehandlung und –beschaffenheit, 1 mm Ölabstand; Scharfe (S) und abgerundete (A) Kanten; (R = Phenolharz, P = Ölpapier, K = Schleifpapier der Körnung)

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Behandlung der Oberfläche mit Papier und Phenolharz keine Steigerung der elektrischen Festigkeit bewirkt. Vermutlich liegt die Ursache daran an der Vorbereitung der Proben. So könnten sich beim unregelmäßigen Auftragen der Phenolharzschicht Unebenheiten an der Oberfläche gebildet haben, so dass sich bei dickeren Stellen mikroskopisch kleine Luft einschüsse im Kleber nicht verflüchtigen können. Die Messreihen RS D und RS E werden im Mittel mit einer Feldstärke von ca. 3,45 kV/mm belastet. Die Grenzfeldstärke im Öl beträgt etwa 6,5 kV/mm. Die Ergebnisse fallen gegenüber nicht beschichteten Stäben um 27 % kleiner aus.

Auch die Bewicklung der Stäbe mit Ölpapier erwies sich als schwierig. Nicht immer war es möglich das Ölpapier 100 % an jeder Stelle am Stab anzulegen. Des Weiteren war selten ein nahtfreier Abschluss der Umrandung gegeben. Mit den Messreihen I und J ist ein Vergleich mit ein- und dreimal bewickelten Stäben möglich. Für die Untersuchung ist zu erwähnen, dass nur eine geringe Anzahl von Proben zur Verfügung standen. Deshalb wurde als erwartete Ereigniseinsatzspannung die der unbehandelten Stäbe der Messreihe RS A gewählt. Nach einigen Spannungstufen kam es direkt in fast immer derselben Spannungsstufe von etwa 77,3 kV zum Ereignis. Nach drei bzw. vier Proben wurde die erwartete Ereignisspannung auf 77,6 kV heruntersetzt. Da sich auch hier Ereignisse in niedrigen Spannungen ereignet haben, werden die Ergebnisse aus den ersten Proben mitberücksichtigt.

Die dreimal bewickelten Stäbe zeigen eine im Mittel 16 % höhere elektrische Beanspruchung als die der einmal bewickelten Stäbe von etwa 4,3 kV/mm und gegenüber nichtvorbehandelten Stäben um nur noch etwa 9 % kleinere Werte. Die Ereigniseinsatzfeldstärke im Öl bleibt bei beiden unter 9 kV/mm.

Der Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit kann mit den Messreihen H, B.1 und G erfolgen. Die Messreihen H und B.1 mit der rauen Oberfläche zeigen ein ähnliches Verhalten. Der Mittelwert der Ereigniseinsatzfeldstärke im Material beträgt bei beiden etwa 4,9 kV/mm. Auffällig ist, dass die Ergebnisse der KP-Holzstäbe welche mit einem Schleifpapier mit 60er Körnung geschliffen worden sind (Messreihe H), eine etwas größere Streuung besitzen. Bei den KP-Holzstäben, bei denen die Oberfläche mit einem Schleifpapier mit 150er Körnung behandelt worden sind, zeigt sich eine um 7% höhere elektrische Festigkeit. Tendenziell ist zu sagen, dass das Material mit glatten Oberflächen und unter Ölspalt höher elektrisch belastet werden kann.

5.2 Überschlag- und Durchschlagsfeldstärken

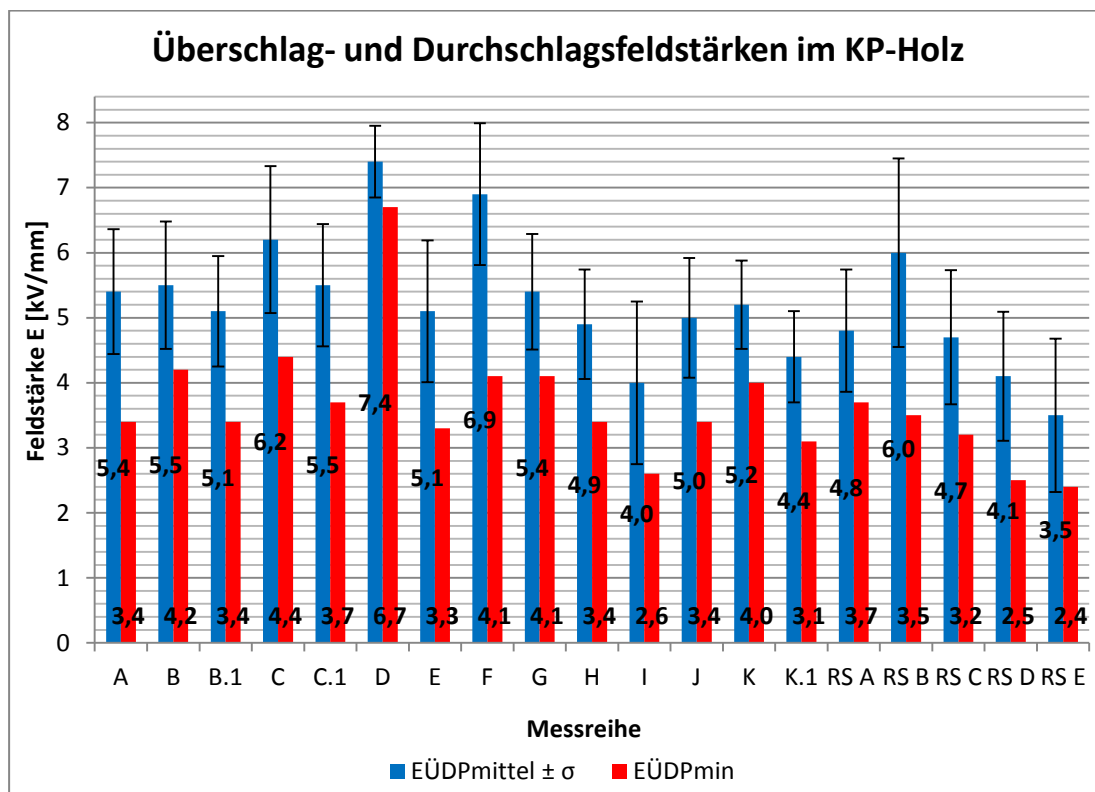


Abbildung 5-4 Überschlag- und Durchschlagsfeldstärken im KP-Holz: $E_{\text{ÜDPmittel}} \pm \sigma$

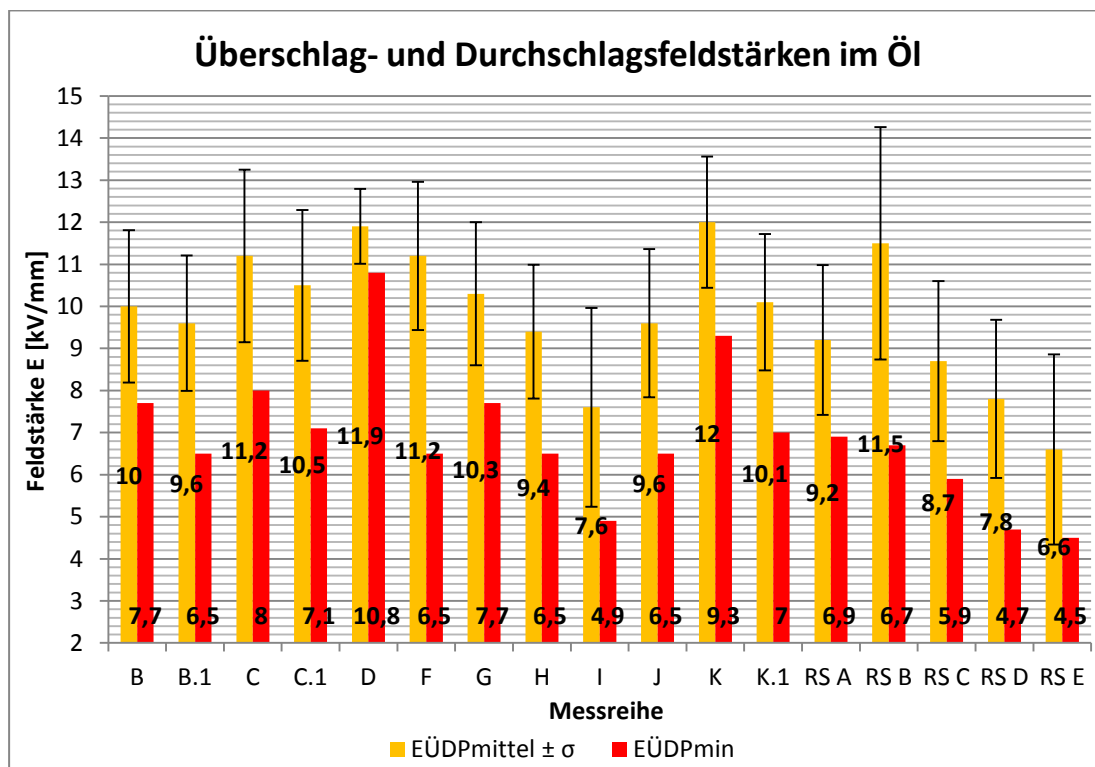


Abbildung 5-5 Überschlag- und Durchschlagsfeldstärken im Öl: $E_{\text{ÜDPmittel}} \pm \sigma$

Bei den Überschlag- und Durchschlagsfeldstärken im KP-Holz und im Öl ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Ereigniseinsatzfeldstärken (**Abbildung 5-2** und **Abbildung 5-3**). Vergleicht man die Überschlag- und Durchschlagsfeldstärken mit den Ereigniseinsatzfeldstärken im Material ist festzustellen, dass sich die minimalen Feldstärken kaum voneinander unterscheiden. Grund für dieses Verhalten ist, dass es sich beim ersten Ereignis um einen Über- oder Durchschlag handelt. Oft treten die minimalen Werte bei allen Proben in einer Messreihe nur ein einziges Mal auf.

Der Mittelwert der Feldstärken im KP-Holz und im Öl liegt bei den Über- und Durchschlägen etwas höher. Teilweise zeigen sich Über- und Durchschläge nach dem TE-Einsatz nicht in derselben Spannungsstufe sondern benötigen zum Teil höhere Spannungen.

Die maximal erreichbare Über- und Durchschlagsfeldstärke im Material von 7,4 kV/mm tritt bei Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung mit 1 mm Ölspalt auf (Messreihe D). Dabei kommt es sehr selten zu Durchschlägen. Diese erfolgt aber nicht, wie erhofft, durch die senkrechte Anordnung der Furniere, sondern verläuft entlang der abgesägten Seite, dringt in die Mitte des Materials ein und wandert an der Grenzschicht der abgesägten Seite/Öl entlang zur Gegenelektrode.

Die maximal mittlere Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl beträgt ca. 12 kV/mm und kommt bei Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung (Messreihe D), beim mittelverdichteten Material (Messreihe K) sowie beim Material mit abgerundeten Kanten schräg im E-Feld (Messreihe RS B) vor. Unter Berücksichtigung der Streuung sind sogar ca. 19 % höhere Feldstärken im Öl möglich.

5.3 Ereignisverteilung

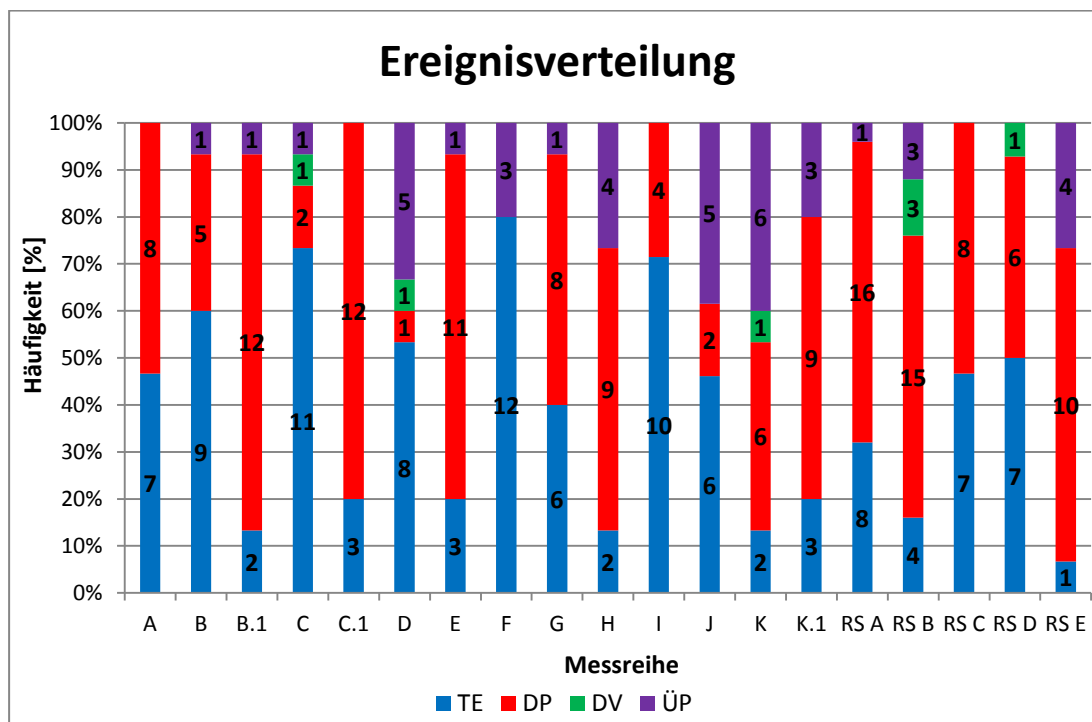


Abbildung 5-6 Ereignisverteilung

Die **Abbildung 5-6** zeigt die Verteilung der Ereignisse prozentual und absolut an. Bei einigen Messreihen kam es während der Prüfung zu Durchschlägen in der Versuchsanordnung bzw. im Öl, sowie Überschlüge an der abgesägten und gepressten Seite. Beide Variationen an Überschlügen werden aufgrund der nicht einfachen Zuordnung zu „Überschlag an der Probe (ÜP)“ zusammengefasst.

Stäbe, bei denen senkrecht zur Schichtung geprüft worden ist, zeigen häufig Überschlüge an der abgesägten Seite. Interessanterweise kommt dieses Verhalten auch bei den dreimal mit Papier bewickelten Stäben (Messreihe J) und bei Stäben mit einer dicken Schicht aus Phenolharz (Messreihe RS E) vor. Ein sehr auffälliges Verhalten ist beim mittelverdichteten Material und einer Feldbeanspruchung parallel zur Schichtung festzustellen (Messreihe K). Alle vorhandenen Überschlüge starten an der abgesägten Seite und wandern um den KP-Holzstab bis zur Gegenelektrode.

Eine eindeutige Aussage über das TE-Verhalten von KP-Holz lässt sich nicht ablesen. Da bei einigen Messreihen die Teilentladung zum sofortigen Über- und Durchschlag führt.

5.4 Durchschlagsverteilung Rand / Mitte

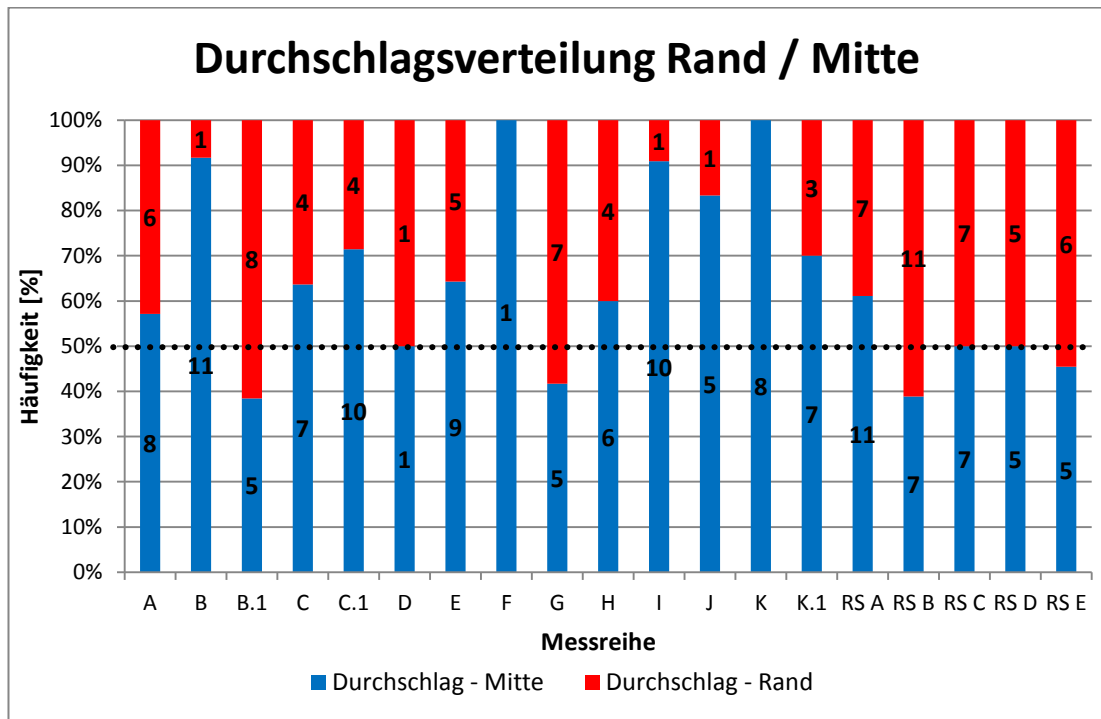


Abbildung 5-7 Durchschlagsverteilung Rand / Mitte

In der **Abbildung 5-7** sind die Messreihen nach ihren Durchschlägen am Rand und in der Mitte bewertet worden. Es sind nur die Durchschläge untersucht worden. Bei einigen Messreihen standen mehr Versuchsproben als bei anderen zur Verfügung. So standen für die Untersuchung bei den Messreihen RS A und RS B 30 Proben und bei den Messreihen I und J 13 bzw. 14 Proben zur Verfügung. Außerdem können die Messreihen A, B und C aus der Materialcharge „Neu“ nicht mit den Messreihen aus der Materialcharge „Alt“ verglichen werden, da die Anzahl und Anordnung der Furniere, die Materialdichte und Oberflächenbeschaffenheit nicht gleich waren.

Die Vermutung, dass die meisten Durchschläge an den Rändern entstehen, bestätigt sich nicht. Eher scheint der Gegenteil der Fall zu sein, nämlich eine gleichmäßige Verteilung von Durchschlägen in der Mitte oder am Rand. Der Grund für die verhältnismäßig gleiche Durchschlagsverteilung könnte an der gleichen Anzahl von parallelaufenden Fasern am Rand und in der Mitte des Versuchsmodells liegen. Die Materialcharge „Alt“ weist vier Furniere in der Mitte und jeweils zwei Furniere an den Rändern mit parallelen Fasern zum E-Feld auf.

Lediglich die Messreihen mit Papier umwickelten Stäben und mit mittelverdichteten Stäben zeigen deutlich mehr Durchschläge in der Mitte. Die Messreihen D und F können vernachlässigt werden, weil typischerweise Durchschläge bei Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung sehr selten sind. Beim mittelverdichteten Material befinden sich mehrere schmale Furniere mit einer Faserrichtung parallel zum E-Feld. Dadurch steigt auch die Anzahl der Klebeschichten. Es ist schwer zu erkennen, ob die Klebeschicht einen Einfluss hatte, da das KP-Holz an der Oberfläche sehr dunkel und die Furnierdicke sehr gering ist. Für die Untersuchung mit papierumwickelten Stäbe wurden die letzten vorhandenen Stäbe genommen, daher rührt auch die geringe Anzahl der Proben für die Untersuchung. Vermutlich waren nicht sichtbare Fehlstellen in der Mitte des Materials vorhanden, die einen Durchschlag in der Mitte begünstigt haben könnten.

Ebenso erstaunlich ist, dass Untersuchungen mit anliegendem abgerundeten Material (Messreihe E) mehr Durchschläge in der Mitte aufweisen als am Rand, obwohl der Zwickel-effekt vorhanden war. Anscheinend ist das hoch beanspruchte Ölvolumen am Rand der abgerundeten Stäbe nicht immer Ursache für das Einleiten eines Durchschlages.

5.5 Durchschlagsverteilung von den Faserrichtungen

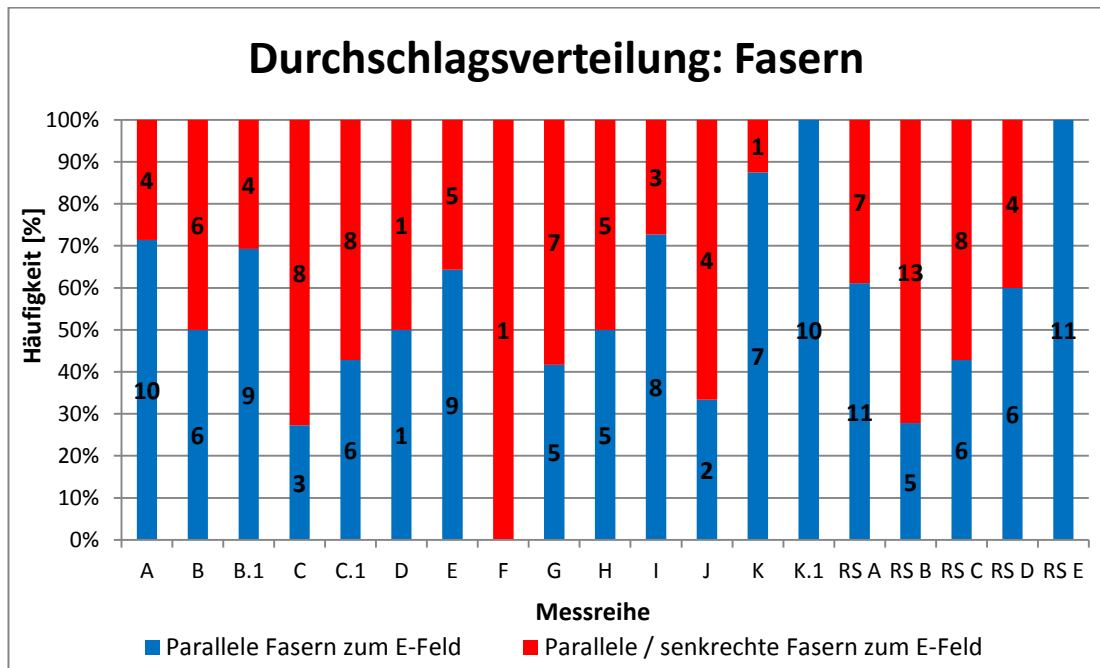


Abbildung 5-8 Durchschlagsverteilung von parallelen und senkrechten Fasern zum E-Feld

Während der Auswertung der Durchschläge ist aufgefallen, dass sich der Durchschlagskanal oft zwischen den parallel- und senkrechtlaufenden Fasern zum elektrischen Feld gebildet hat. Die **Abbildung 5-8** zeigt die Verteilung der Durchschläge an den parallelen sowie an beiden Faserrichtungen auf. Durchschläge an senkrecht stehenden Fasern zur Feldbeanspruchung traten nicht auf. Es war zu beobachten, dass der Durchschlagskanal bei Feldbeanspruchungen von parallelen Fasern nicht immer entlang der Klebeschicht verlaufen ist, sondern mittig durch das Holzfurnier.

Durch die Intensität des Lichtbogens können manche Durchschlagskanäle nicht exakt rekonstruiert werden, da gerade bei Durchschlägen an den Rändern öfters beide parallelen Holzfurniere bis zur Querlage heraussprangen. Anhand der vorhandenen Brandspur ist es dennoch möglich festzustellen, dass beide Faserrichtungen beteiligt gewesen sind. Bei den Untersuchungen mit Stäben schräg im E-Feld zeigt sich öfters, dass offensichtlich beide Faserrichtungen an dem Durchschlagsverlauf beteiligt sind. Der Grund dafür könnte an der Feldstärkeüberhöhung zwischen den beiden unterschiedlichen Faserrichtungen liegen.

Durchschläge bei Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung treten, wie schon erwähnt, sehr selten auf und fallen deshalb in dieser Abbildung mit einer hohen Häufigkeit auf.

5.6 Weibull - Parameter

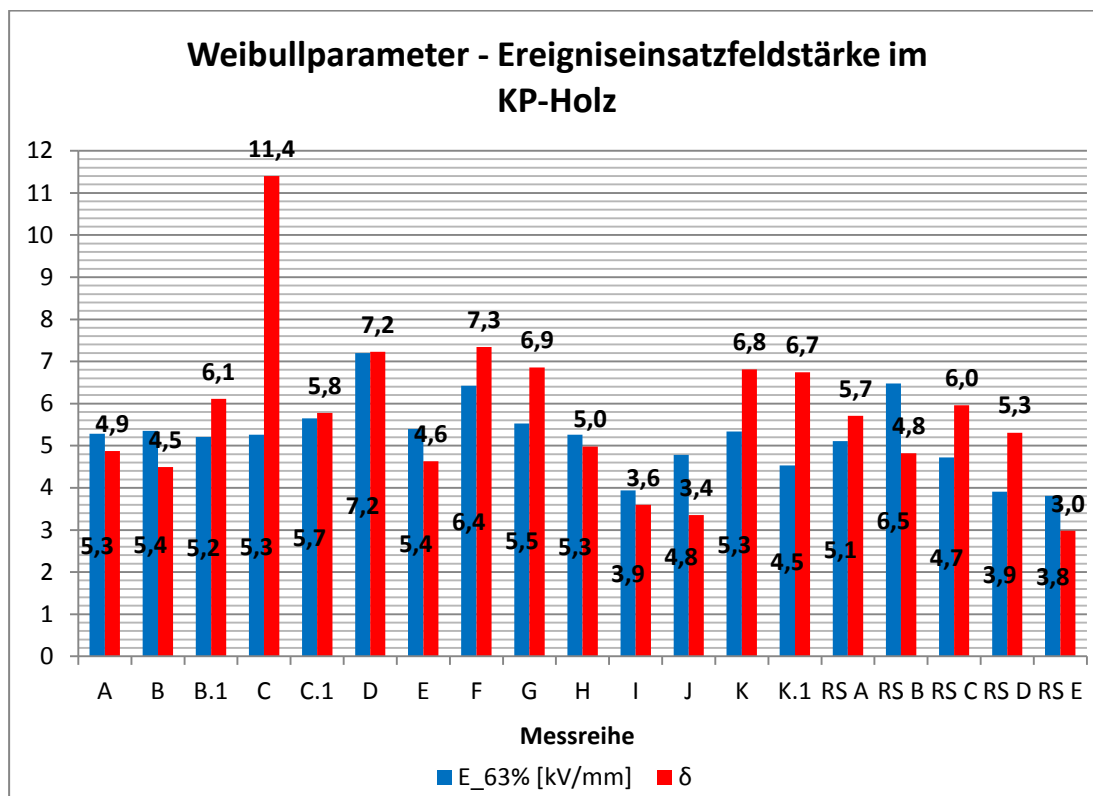


Abbildung 5-9 Weibull - Parameter der Ereigniseinsatzfeldstärke von KP-Holz

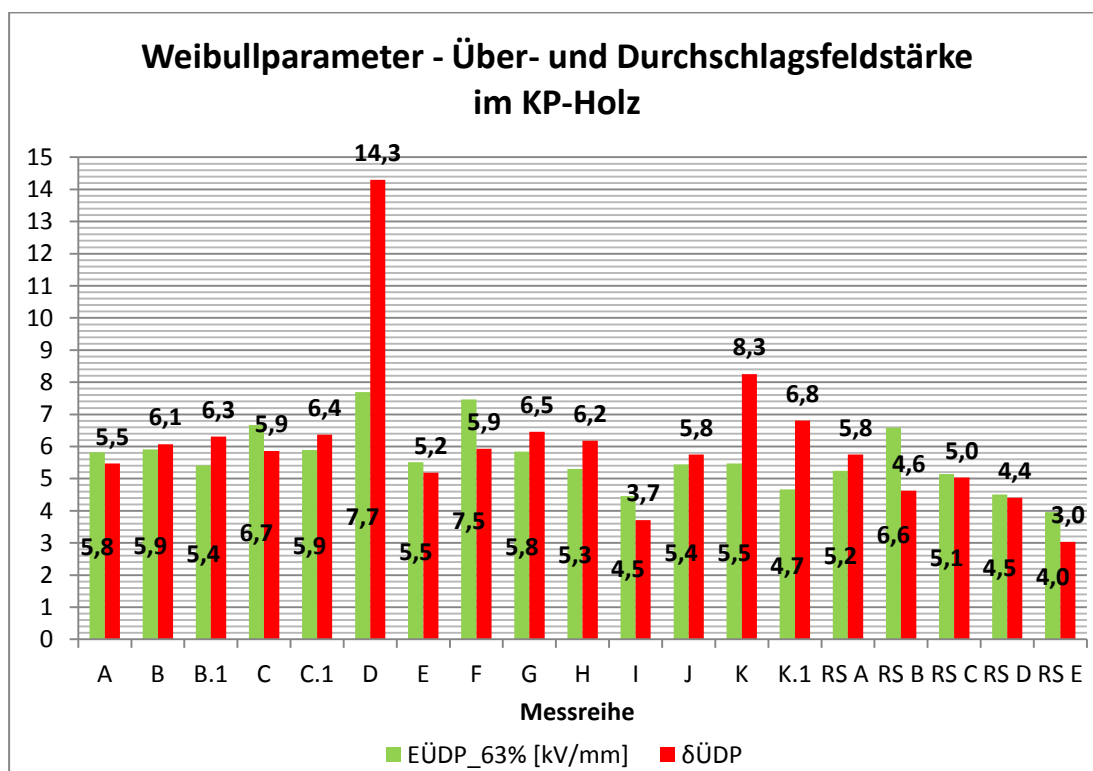


Abbildung 5-10 Weibull - Parameter der Überslag- und Durchschlagsfeldstärke von KP-Holz

Die beiden Abbildungen stellen den 63 % Ereigniseinsatz ($E_{63\%}$) bzw. Über- und Durchschlagsfeldstärke ($E_{\text{ÜDP}_{63\%}}$) im Material für jede Messreihe dar. Es ist ein ähnliches Bild wie bei den berechneten Mittelwerten der Ereignisse zu erkennen. Lediglich der Wert der elektrischen Feldstärke liegt etwas höher.

Betrachtet man den Weibull - Parameter δ (Ausfallwahrscheinlichkeit) fällt sofort die Messreihe C für die Ereigniseinsatzfeldstärke und die Messreihe D für die Übersschlag- und Durchschlagsfeldstärke ins Auge. Da es sich beim ersten Fall um scharfkantige Stäbe schräg im E-Feld gehandelt hat, war anzunehmen, dass bei der gleichen Versuchsanordnung ein ähnliches Verhalten an Messreihe C.1 zu beobachten sein wird. Das ist nicht aber nicht eingetroffen.

Bei der Messreihe D handelt es sich um Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung mit 1 mm Ölspalt. Vermutlich könnte die hohe Feldstärke im Öl von etwa 12 kV/mm den Übersschlag an der gepressten Seite einleiten.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird der Einfluss der Anisotropie der Dielektrizitätszahl von ölimprägniertem KP-Holz auf dessen Teilentladungs-, Gleitentladungs- und Durchschlagsverhalten im Zusammenhang mit unterschiedlichen Material- und Versuchsparametern untersucht. Die Auswirkung der Anisotropie werden experimentell und simulationstechnisch bestimmt.

Im Laufe der dielektrischen Untersuchung an ölimprägniertem KP-Holz zeigt sich eine starke dichteabhängige anisotrope Dielektrizitätszahl. Dabei kann der Unterschied zwischen parallelen und senkrechten Fasern zum E-Feld bis zu ca. 18 % in einer Verdichtungsstufe betragen und sorgt damit für Feldstärkesprünge an den Grenzschichten im Öl von ca. 7 %, sowie im KP-Holz von etwa 10 %. Diese Gegebenheit macht sich bei der Durchschlagsverteilung in den Messreihen bemerkbar. Etwa 50 % der Durchschläge verlaufen an der Grenzschicht von beiden Faserrichtungen.

Die Anordnung der Elektroden mit oder ohne einem Ölspalt zeigen bei einer Feldbeanspruchung parallel zur Schichtung keine elektrische Festigkeitsminderung. Hier hat der Kanteneffekt keinen Einfluss auf die elektrische Festigkeit. Tritt die elektrische Feldstärke mit einem Winkel von 45° in das Material mit abgerundeten Kanten ein, kann eine höhere elektrische Festigkeit erzielt werden als bei dem scharfkantigen Material.

Mit Vergrößerung der Ölspaltweite von 1 mm auf 2 mm kommt es generell zu einer frühzeitigen Entladung und damit zur Zerstörung des Materials. Dabei reduziert sich die Einsatzfeldstärke im Öl um etwa 10 %.

Der Einfluss der Rohdichte unter Ölspalt bewirkt, dass mit zunehmender Materialdichte die elektrische Festigkeit abnimmt.

Oberflächenbehandlungen an KP-Holz mit Papier und Phenolharz haben eine negative Auswirkung auf die elektrische Festigkeit.

Schließlich zeigt die Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit, dass sich die mikroskopischen Faserhärchen an der Grenzfläche von Öl und KP-Holz auf die elektrische Festigkeit bemerkbar macht. Glatte Oberflächen erzielen einen positiven Einfluss.

7 Weiterarbeit und Ausblick

Um weitere genauere Aussagen über das TE- und Durchschlagsverhalten von ölimprägniertem KP-Holz machen zu können, müssen in näherer Zukunft einige Punkte bedacht werden.

Probenzahl:

Für weitere TE- und Durchschlagsversuche mit dem ölimprägnierten Material KP-Holz wäre es sinnvoll, die Probenzahl der Messreihen zu erhöhen um der Streuung der Messergebnisse entgegenzuwirken und damit aussagekräftigere Ergebnisse zu liefern.

Eingangsdatenkontrolle:

Weiterhin ist es von großer Wichtigkeit die Versuchsproben vor der Untersuchung genau zu inspizieren. Das bedeutet, dass jede einzelne Probe auf die

- Materialdichte
- Anordnung und Anzahl einzelner Furniere
- Oberflächenbeschaffenheit

überprüft werden muss.

Ölqualität:

Für die Untersuchungen mit Ölspalt spielt die Ölqualität eine große Rolle. Es würde sich anbieten, die Luftfeuchtigkeit während der Ruhephase des Öls im Prüfbehälter und an jedem Versuchstag zu messen. Zusätzlich wäre es interessant, in welchem Bereich die elektrische Festigkeit von Öl streut. Dazu würden sich Messreihen mit 20 Ölschüssen und unterschiedlichen Spaltweiten eignen. Dabei wäre zu beachten, dass die Versuche immer am selben Tag und nach der Ölaufbereitungsphase erfolgen.

Interpretationen der TE-Streams:

Während jeder TE- und Durchschlagsuntersuchung wird die Intensität und die Polarität der Teilentladungen aufgezeichnet. Es ergeben sich zum Teil wiederholende und signifikante TE-Muster, die den Fehlstellen der Proben zugeordnet werden könnten.

Dielektrische Untersuchung:

Um genaue Werte für die anisotrope dichteabhängige relative Dielektrizitätszahl zu erhalten, wäre es sinnvoll, weitere KP-Holzplatten mit unterschiedlichen Schnittrichtungen zu prüfen, damit gerade bei Materialdichteunterschieden in einer Materialcharge jede entnommene Versuchsprobe individuell ausgewertet werden kann.

Messreihen für TE- und Durchschlagsuntersuchung:

Es ist noch zu klären, ob die nicht vorhandene Klebeschicht bei einer Feldbeanspruchung senkrecht zur Schichtung Ursache für die hohe elektrische Festigkeit ist. Dafür könnten die KP-Holzplatten mit ihren unterschiedlichen Schnittrichtungen in Frage kommen. Des Weiteren wäre es von Interesse, Stäbe mit einer anderen Schnittrichtung unter Ölspalt zu untersuchen, so dass mehr Furniere mit senkrecht stehenden Fasern zum E-Feld beansprucht werden.

Ein positiver Einfluss von einer Beschichtung der KP-Holzstäbe auf die elektrische Festigkeit konnte noch nicht gezeigt werden. Das Auftragen der Beschichtung kann optimiert werden. Deshalb würde es sich hier lohnen, weiterhin mit solchen Stäben zu arbeiten und neben Papier ebenso Pressspan als Beschichtungsmaterial zu untersuchen.

Um den Effekt der Anisotropie zu verdeutlichen, könnte in Zukunft KP-Holz mit einer beliebigen Elektrodenanordnung auf TE, Über- und Durchschlag untersucht werden, weil die z-Komponente (Kapitel 4.2) der anisotropen relativen Dielektrizitätszahl einen Einfluss auf die elektrische Feldverteilung hat.

8 Literaturverzeichnis

- [1] M. Kleine-König: Bachelorarbeit, „Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten von ölimprägniertem Kunstharzpressholz“, HS Osnabrück, 2010
- [2] C. Brinkmann: „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1975
- [3] D. Klötter: Diplomarbeit, „Einfluss der geometrischen Form und Abmessung auf das Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten ölimprägnierter Isolierstoffe“, HS Osnabrück 2009
- [4] E. Buckow: „Hochspannungstechnik - Vorlesungsskriptum“, HS Osnabrück, WS 10/11
- [5] M. Bittner: Projektbericht, „Die Bedeutung der anisotropen Dielektrizitätszahl für das Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten von ölimprägniertem Kunstharzpressholz“, HS Osnabrück, 2011
- [6] Glinski, Hansen, Heidsieck, Koblitz, Ludolph, Parey, Rolfes: „Grundstufe Holztechnik - Technologie“, Handwerk und Technik, Hamburg, 1993
- [7] DIN EN 61061-1: „Nicht-imprägniertes Kunstharzpressholz für elektrotechnische Zwecke“, April 2002
- [8] ETG-Fachbericht: „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen - Beanspruchung, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer“, VDE-Verlag GmbH, Berlin-Offenbach, 2005
- [9] A. Küchler: „Hochspannungstechnik“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [10] E. Buckow: „Grundlagen der Elektrotechnik 1 - Vorlesungsskriptum“, HS Osnabrück, WS 08/09
- [11] E. Buckow, M. Havekost, M. Kröger: Forschungsbericht, „Einfluss der Normal- und Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen KP-Holz/Öl und Nomex/Öl“, HS Osnabrück, 2005
- [12] E. Buckow, M. Havekost, M. Kröger: Technischer Bericht, „Einfluss des Materials und der Oberflächenbeschaffenheit auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen mit Transformatorenöl“, HS Osnabrück, 2004
- [13] Omicron mtronix technology: Handbuch, „Universal Current Measuring System MI 600“, Berlin, 2008

9 Anhang

9.1 Inhalt der DVD

In der beigefügten DVD sind folgende Ordner und Dateien enthalten.

Ordnerverzeichnis	Beschreibung
\Bachelorarbeit	Bachelorarbeit als PDF-Format
\TE- und Durchschlagsuntersuchung	Messergebnis von jeder Messreihe A – RS E als EXCEL-Tabelle
\Probenfotos	Probenfotos von den Messreihen als JPG-Format
\Simulation	COMSOL Model File von einem 10-schichtigen Modell mit und ohne Beschichtung als MPH-Format
\Simulation\Ergebnisse	Ergebnisse der Simulation mit der Ereigniseinsatzspannung für jede Messreihe als JPG-Format.
\MI540 and MI600	Handbuch der Firma Omicron vom Messsystem für die Messung von Verlustfaktor und Prüflingskapazität als PDF-Format

Tabelle 9-1 Inhalt der DVD

9.2 Röchling Datenblatt Kunstharzpressholz - Lignostone®

Lignostone®

		1) Qualität Grade Qualité	2) L 1/2 E3	3) M 1/2 E3	4) M 1/2/30 E3	5) H 1/2/30 E3	H 1/2 H 1/1	H 1/2/30 H 1/1/30	
		DIN 7707	KP: 20 212	20 214	20 215	20 218	20 216	20 217	
		Prüfmethode Test method Méthode de contrôle	Einheit Unit Unité		*Schnittrichtung laggeschichtet Lamination parallel Le montage des feuilles parallèle				
Dichte Specific gravity Masse volumique		DIN 53 479	g/cm³	0,80–0,90	1,20–1,30	1,25–1,35	> 1,35	> 1,35	
Mechanische Eigenschaften Mechanical properties Caractéristiques mécaniques	Biegefestigkeit Flexural strength Résistance à la flexion	⊥ und and et	DIN EN ISO 178 ¹⁾	N/mm²	140	200	200	220	
	E-Modul aus Biegeversuch Modulus of elasticity in flexure Module d'élasticité à l'essai de flexion		DIN EN ISO 178 ¹⁾	N/mm²	11000	16000	16000	18000	
	Druckfestigkeit Compressive strength Résistance à la compression	⊥	DIN EN ISO 604	N/mm²	100	120	170	190	120
		/	DIN EN ISO 604	N/mm²	45	100	160	170	120
	Zugfestigkeit Tensile strength Résistance à la traction		DIN EN ISO 527 ¹⁾	N/mm²	110	190	160	190	220
		⊥	DIN EN ISO 179 ¹⁾	kJ/m²	35	50	40	40	55
Schlagzähigkeit Impact strength Résilience au choc	⊥	DIN EN ISO 179 ¹⁾	kJ/m²	30	45	30	35	45	
		DIN EN ISO 179 ¹⁾	kJ/m²	30	45	30	35	45	
Kugelhärte 60 Sekunden Ball-thrust hardness 60 secs. Dureté à bille 60 sec.	⊥	DIN ISO 2039-1	N/mm²	20	50	60	120	80	
Physikalische Eigenschaften Physical properties Caractéristiques physiques	Wasseraufnahme Water absorption Absorption d'eau	DIN EN ISO 62	%	–	–	2,0	0,5	6,0	
	Ölaufnahme Oil absorption Absorption d'huile	DIN 7 707	%	ca. 35	ca. 7	< 3	–	–	
	Lin. Ausdehnungskoeffiz. zwischen 20 und 100 °C Coeff. of linear expans. between 20 and 100 °C Coeff. d'allongement linéaire entre 20 et 100 °C	–	mm x 10 ⁻⁶ mm °C	–	–	7	8	8	
	Wärmeleitfähigkeit bei RT 20 °C Thermal conductivity at RT 20 °C Conductivité thermique pour RT 20 °C	DIN 52 612	$\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	ca. 0,22	ca. 0,25	ca. 0,30	ca. 0,30	–	
	Temperaturgrenze beim Einsatz Operating temperatures continuous ²⁾ Températures (limite de service) ²⁾	DIN 7 707	°C	105	100	90	80	–	
	Temperaturgrenze bei Trocknung und Ölprägnierung Temperature limit when drying and oil impregnating ³⁾ Limite de température lors de séchage et imprégnation d'huile ³⁾	DIN 7 707	°C	140	130	90	80	–	
Elektrische Eigenschaften Electrical properties Caractéristiques électriques	Durchschlagfestigkeit Electric strength Résistance disruptive (rigidité diélectrique)	20 °C	IEC 243-2/ VDE 0303T.2.1	kV/ 25 mm	70	70	50	45	
		90 °C	IEC 243-2/ VDE 0303T.2.1	kV/ 25 mm	70	70	35	30	
	Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz Dielectric loss factor at 50 Hz Facteur de pertes diélectriques pour 50 Hz	20 °C	DIN 53 483	tan δ	0,02	0,02	0,02	0,02	
	Elektr. Durchgangswiderstand Volum resistivity Résistance intérieure	Vorbehandlung treatment conditionnement préalable	IEC 93/ VDE 0303T.3.0	Ω x cm	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹¹	10 ¹⁰	
	Kriechstromfestigkeit ⁴⁾ Track resistance Cheminement		IEC 112/ VDE 0303L.1	Stufe Stage Degré	CTI 225	CTI 225	CTI 175	CTI 175	

Abbildung 9-1 Röchling Datenblatt Kunstharzpressholz - Lignostone®

9.3 Gesamtübersicht der Messreihen unter Berücksichtigung der Materialvorbehandlung

Messreihe	Versuchsanordnung	Winkelstellung / Kanteneffekt	Ölspaltabhängigkeit	Rohdichte	Oberflächenbehandlung oder Beschichtung
A	1				
B	1	3.1			
B.1		3.2 3			10
C		3.1			
C.1		3.2 4			
D			6		
E	2				
F			6		
G					10
H					10
I					9
J					9
K				7.1	
K.1				7 7.1	
RS A	2	3 4.1	5	7	
RS B		4 4.1			
RS C			5		
RS D					8
RS E					8

Tabelle 9-2 Gesamtübersicht der Messreihen

Messreihe	Kante		Ölspalt [mm]			Winkel			Oberflächenprofil - Körnung				Papier		Rakoll		Dichte nach 24h [g/cm³]		
	S	A	0	1	2	0°	45°	90°	50	60	120	150	1	2	1	2	0,83	0,9	1,28
A	x		x			x			x								x		
B	x			x		x			x								x		
B.1	x			x		x					x								x
C	x			x			x		x								x		
C.1	x			x			x				x								x
D		x		x				x			x								x
E		x	x			x					x								x
F		x			x			x			x								x
G	x			x		x						x							x
H	x			x		x				x									x
I		x		x		x					x		x						x
J		x		x		x					x			x					x
K		x		x		x													x
K.1		x		x		x					x								x
RS A		x		x		x					x								x
RS B		x		x			x				x								x
RS C		x			x	x					x								x
RS D		x		x		x					x				x				x
RS E		x		x		x					x					x			x

Legende: Genaue Angabe nicht möglich

Tabelle 9-3 Vergleich der Messreihen mit deren Gegebenheiten

9.4 Messergebnisse der Dichte

Probennummer	a1 [cm]	a2 [cm]	b1 [cm]	b2 [cm]	c1 [cm]	c2 [cm]	Volumen [cm ³]	Nach Anlieferung				Nach 24 h Trocknung			
								Gewicht [g]	Dichte [g/cm ³]	Mittelwert Dichte [g/cm ³]	Stabw. Dichte [g/cm ³]	Gewicht [g]	Dichte [g/cm ³]	Mittelwert Dichte [g/cm ³]	Stabw. Dichte [g/cm ³]
A.2.P	5	0,51	0,51	12,08	12,11	12,14	12,14	74,885	60,05	0,802	0,80	0,008	0,76	0,010	
A.2.P	6	0,51	0,51	12,09	12,08	12,09	12,12	74,607	60,41	0,810					
A.2.P	7	0,5	0,51	12,08	12,08	12,21	12,12	74,211	58,6	0,790					
A.2.P	8	0,5	0,505	12,08	12,08	12,15	12,19	73,874	58,49	0,792					
A.2.P	9	0,51	0,51	12,1	12,09	12,18	12,21	75,224	59,81	0,795					
A.2.P	10	0,51	0,51	12,14	12,14	12,36	12,33	76,433	61,53	0,805					
A.2.P.S	5	0,51	0,52	12,01	12,01	12,09	12,09	74,778	59,48	0,795					
A.2.P.S	6	0,51	0,52	12	12,1	12,06	12,09	74,934	59,67	0,796					
A.2.P.S	7	0,5	0,51	12,01	12,02	12,09	12,09	73,357	59,31	0,809					
A.2.P.S	8	0,51	0,52	11,9	11,93	12,08	12,02	73,942	59,19	0,800					
A.2.P.S	9	0,51	0,52	12,02	11,94	12,24	12,27	75,610	60,43	0,799					
A.2.P.S	10	0,52	0,52	12,01	12,02	12,33	12,27	76,848	61,46	0,800					
A.2.S	5	0,505	0,51	12,01	12	12,07	12,03	73,415	66,35	0,904					
A.2.S	6	0,51	0,52	12	12,01	12,07	12,04	74,531	68,04	0,913					
A.2.S	7	0,5	0,51	12,01	12,02	12,05	12,06	73,145	66,12	0,904					
A.2.S	8	0,5	0,51	12,01	12	12,05	12,06	73,084	66,64	0,912					
A.2.S	9	0,52	0,52	12,02	12,02	12,14	12,15	75,911	69,98	0,922					
A.2.S	10	0,52	0,53	12,02	12,02	12,08	12,1	76,294	66,08	0,866					
A.1.S	5	0,53	0,54	11,32	11,33	11,34	11,32	68,647	69	1,005					
A.1.S	6	0,51	0,52	11,31	11,32	11,34	11,33	66,052	68,15	1,032					
A.1.S	7	0,53	0,54	11,24	11,31	11,3	11,32	68,223	67,68	0,992					
A.1.S	8	0,51	0,52	11,3	11,31	11,28	11,32	65,789	66,96	1,018					
A.1.S	9	0,52	0,53	11,33	11,33	11,31	11,32	67,304	67,48	1,003					
A.1.S	10	0,5	0,52	11,32	11,33	11,32	11,32	65,381	66,3	1,014					
A.1.K	5	0,49	0,52	11,94	11,92	11,96	11,97	72,085	67,5	0,936					
A.1.K	6	0,49	0,5	11,92	11,93	11,95	11,96	70,569	65,83	0,933					
A.1.K	7	0,5	0,53	11,94	11,92	11,95	11,98	73,512	68,13	0,927					
A.1.K	8	0,49	0,52	11,87	11,92	11,97	12	71,994	66,49	0,924					
A.1.K	9	0,49	0,54	11,91	11,94	11,97	12	73,604	68,51	0,931					
A.1.K	10	0,49	0,52	11,92	11,94	12,02	12,03	72,446	67,37	0,930					
B.1.S	5	0,5	0,51	11,31	11,32	11,29	11,31	64,569	72,32	1,120					
B.1.S	6	0,51	0,52	11,28	11,31	11,29	11,3	65,702	70,95	1,080					
B.1.S	7	0,5	0,51	11,32	11,32	11,31	11,32	64,683	71,8	1,110					
B.1.S	8	0,5	0,51	11,31	11,32	11,31	11,31	64,626	72,73	1,125					
B.1.S	9	0,5	0,51	11,3	11,32	11,31	11,33	64,655	72,75	1,125					
B.1.S	10	0,51	0,52	11,31	11,29	11,3	11,31	65,789	73,15	1,112					
B.1.K	5	0,5	0,51	11,91	11,89	11,89	11,89	71,453	88,72	1,242					
B.1.K	6	0,51	0,52	11,89	11,91	11,91	11,89	72,929	91,55	1,255					
B.1.K	7	0,5	0,51	11,88	11,91	11,89	11,9	71,453	89,57	1,254					
B.1.K	8	0,51	0,51	11,9	11,91	11,9	11,89	72,221	89,67	1,242					
B.1.K	9	0,5	0,51	11,89	11,92	11,87	11,89	71,423	89,94	1,259					
B.1.K	10	0,5	0,52	11,9	11,91	11,96	11,96	72,616	89,93	1,238					
C.1.S	5	0,53	0,53	11,39	11,41	11,41	11,42	68,969	88,62	1,285					
C.1.S	6	0,52	0,54	11,31	11,33	11,31	11,32	67,885	86,84	1,279					
C.1.S	7	0,53	0,55	11,32	11,32	11,32	11,28	69,075	89,16	1,291					
C.1.S	8	0,51	0,53	11,41	11,39	11,41	11,39	67,579	87,08	1,289					
C.1.S	9	0,52	0,53	11,41	11,42	11,41	11,43	68,439	88,25	1,289					
C.1.S	10	0,52	0,53	11,38	11,42	11,4	11,42	68,289	88,65	1,298					
C.1.K	5	0,5	0,51	11,87	11,94	11,85	11,91	71,423	92,25	1,292					
C.1.K	6	0,52	0,54	11,94	11,93	11,92	11,95	75,495	97,98	1,298					
C.1.K	7	0,51	0,53	11,94	11,92	11,87	11,89	73,699	97,07	1,317					
C.1.K	8	0,53	0,54	11,91	11,92	11,83	11,9	75,634	99,07	1,310					
C.1.K	9	0,5	0,51	11,88	11,95	11,89	11,85	71,423	92,72	1,298					
C.1.K	10	0,51	0,52	11,93	11,93	11,91	11,86	73,021	96,51	1,322					
A	11	5,2	5,3	119,8	119,7	120,2	120,1	75,543	53,43	0,707					
A	12	5,2	5,3	119,7	119,9	120,1	119,9	75,455	53,9	0,714					
A	13	5,2	5,6	119,6	119,9	120,1	120,1	77,682	53,98	0,695					
B	11	5,2	5,4	119,4	119,3	120	120	75,929	54,68	0,720					
B	12	5,2	5,3	119,5	119,3	120,1	120,1	75,272	54,09	0,719					
B	13	5,2	5,4	119,2	119,2	120,2	120,2	75,890	54,09	0,713					
C	11	5,32	5,12	119,8	119,7	119,2	119,4	74,555	51,63	0,693					
C	12	5,2	5,1	119,7	119,8	118,9	118,9	73,330	50,85	0,693					
C	13	5,1	5,6	119,8	119,7	119,2	118,7	76,175	51,77	0,680					

Tabelle 9-4 Messergebnisse der Dichte von KP-Holzplatten

Charge	Probennummer	a1 [cm]	a2 [cm]	b1 [cm]	b2 [cm]	c1 [cm]	c2 [cm]	Volumen [cm ³]	Nach Anlieferung				Nach 24 h Trocknung				Nach 48 h Trocknung	
									Gewicht [g]	Dichte [g/cm ³]	Mittelwert Dichte [g/cm ³]	Stabh. Dichte [g/cm ³]	Gewicht [g]	Dichte [g/cm ³]	Mittelwert Dichte [g/cm ³]	Stabh. Dichte [g/cm ³]	Gewicht [g]	Dichte [g/cm ³]
Neu, leichtverdichtet	B 1	18,07	18,27	18,26	18,3	400	400	132,859	117,22	0,882			110,58	0,832				
	B 2	18,05	18,22	18,25	18,27	400	400	132,458	117,07	0,884			110,48	0,834				
	B 3	18,01	18,07	18,16	18,3	399	399	131,219	114,02	0,869	0,88	0,007	107,45	0,819	0,83	0,007		
	B 4	18,26	18,21	18,3	18,16	399	399,5	132,720	115,42	0,870			109,2	0,823				
	B 5	18,03	18,15	18,15	18,17	399,5	399,5	131,242	115,34	0,879			109,25	0,832				
Alt, leichtverdichtet	C 1	18,06	18,22	18,05	18,1	399	399	130,824	123,9	0,947			117,53	0,898			117,56	0,899
	C 2	18,14	18,12	17,93	18,04	398,5	399	130,020	120,23	0,925			113,96	0,876			113,93	0,876
	C 3	18,14	18,09	18,14	18,19	399	399	131,295	123,98	0,944	0,94	0,012	117,55	0,895	0,9	0,011	117,49	0,895
	C 4	18,11	18,07	18,11	18,15	398,5	399	130,779	123,19	0,942			116,74	0,893			116,61	0,892
	C 5	18,08	18,08	18,09	18,11	399	398	130,408	124,77	0,957			118,39	0,908			118,15	0,906
Neu, mittelverdichtet	D 1	16,24	16,36	18,01	18,17	399	399	117,652	159,34	1,354			150,47	1,279				
	D 2	16,25	16,4	18,13	18,17	399	399	118,223	161,98	1,370			153,01	1,294				
	D 3	16,18	16,1	18	18,01	400	400	116,240	158,43	1,363	1,39	0,015	149,92	1,290	1,28	0,016		
	D 4	18,14	18,25	18,1	18,15	399	399	131,584	175,5	1,334			165,49	1,258				
	D 5	18	18	18	18	399	399	129,276	177,16	1,370			167,46	1,295				

Abbildung 9-2 Messergebnisse der Dichte von KP-Holzstäben

9.5 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
A.2.P	1	5,02	5,05	5	5,03	5,025	1,38389E-11	5,87E-11	4,24	5,43E-03
A.2.P	2	5	5,02	5,04	5,05	5,028	1,3832E-11	5,95E-11	4,30	5,40E-03
A.2.P	3	5,03	5,06	5,09	5	5,045	1,37841E-11	5,87E-11	4,26	5,34E-03
A.2.P	4	5,02	5,09	5,06	5,01	5,045	1,37841E-11	5,90E-11	4,28	5,17E-03
A.2.P	5	5,07	5,05	5,03	5,03	5,045	1,37841E-11	5,94E-11	4,31	5,89E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	4,28
Standardabw.	0,03
Minimal	4,24
Maximal	4,31

Verlustfaktor	
Mittelwert	5,44E-03
Standardabw	2,68E-04
Minimal	5,17E-03
Maximal	5,89E-03

Tabelle 9-5 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe A.2.P

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
A.2.P.S	1	5,13	5,14	5,13	5,14	5,135	1,3542E-11	4,65E-11	3,43	3,37E-03
A.2.P.S	2	5,1	5,11	5,11	5,06	5,095	1,3649E-11	4,66E-11	3,41	3,16E-03
A.2.P.S	3	5,07	5,08	5,12	5,1	5,093	1,3655E-11	4,71E-11	3,45	3,96E-03
A.2.P.S	4	5,17	5,17	5,15	5,05	5,135	1,3542E-11	4,63E-11	3,42	3,24E-03
A.2.P.S	5	5,2	5,13	5,1	5,13	5,140	1,3529E-11	4,65E-11	3,44	3,27E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	3,43
Standardabw.	0,016
Minimal	3,41
Maximal	3,45

Verlustfaktor	
Mittelwert	3,40E-03
Standardabw	3,23E-04
Minimal	3,16E-03
Maximal	3,96E-03

Tabelle 9-6 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe A.2.P.S

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
A.2.S	1	5,1	5,11	5,12	5,05	5,095	1,365E-11	5,02E-11	3,68	4,77E-03
A.2.S	2	5,12	5,03	5,08	5,13	5,090	1,366E-11	5,04E-11	3,69	5,17E-03
A.2.S	3	5,1	5,12	5,1	5,07	5,098	1,364E-11	5,04E-11	3,69	4,78E-03
A.2.S	4	5,05	5,05	5,05	5,05	5,050	1,377E-11	5,01E-11	3,64	5,07E-03
A.2.S	5	5,11	5,09	5,07	5,05	5,080	1,369E-11	5,02E-11	3,67	5,30E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	3,67
Standardabw.	0,021
Minimal	3,64
Maximal	3,69

Verlustfaktor	
Mittelwert	5,02E-03
Standardabw	2,38E-04
Minimal	4,77E-03
Maximal	5,30E-03

Tabelle 9-7 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe A.2.S

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
A.1.S	1	5,22	5,18	5,15	5,14	5,173	1,344E-11	5,059E-11	3,76	9,21E-03
A.1.S	2	5,11	5,16	5,22	5,11	5,150	1,350E-11	5,187E-11	3,84	5,01E-03
A.1.S	3	5,2	5,18	5,17	5,17	5,180	1,342E-11	5,110E-11	3,81	9,22E-03
A.1.S	4	5,13	5,2	5,18	5,1	5,153	1,350E-11	4,994E-11	3,70	5,00E-03
A.1.S	5	5,28	5,24	5,3	5,37	5,298	1,313E-11	5,027E-11	3,83	0,007852
Relative Dielektrizitätszahl						Verlustfaktor				
Mittelwert		3,79				Mittelwert		7,26E-03		
Standardabw.		0,058				Standardabw		2,13E-03		
Minimal		3,70				Minimal		5,00E-03		
Maximal		3,84				Maximal		9,22E-03		

Tabelle 9-8 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe A.1.S

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
A.1.K	1	5,22	5,05	5,05	5,2	5,130	1,36E-11	5,60E-11	4,13	5,45E-03
A.1.K	2	5,42	5,26	5,43	5,13	5,310	1,31E-11	5,29E-11	4,04	5,15E-03
A.1.K	3	5,05	4,86	4,83	5,09	4,958	1,40E-11	5,58E-11	3,98	5,26E-03
A.1.K	4	5,45	5,31	5,04	5,36	5,290	1,31E-11	5,39E-11	4,10	5,64E-03
A.1.K	5	4,97	4,88	5,04	5,2	5,023	1,38E-11	5,65E-11	4,08	5,33E-03
Relative Dielektrizitätszahl						Verlustfaktor				
Mittelwert		4,06				Mittelwert		5,37E-03		
Standardabw.		0,059				Standardabw		1,86E-04		
Minimal		3,98				Minimal		5,15E-03		
Maximal		4,13				Maximal		5,64E-03		

Tabelle 9-9 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe A.1.K

Probenbezeichnung	Probennummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	$\tan \delta$
B.1.S	1	5,12	5,19	5,23	5,03	5,143	1,35E-11	5,42E-11	4,00	8,63E-03
B.1.S	2	5,19	5,14	5,14	5,18	5,163	1,35E-11	5,32E-11	3,95	1,09E-02
B.1.S	3	5,07	5,12	5,13	5,14	5,115	1,36E-11	5,37E-11	3,95	9,17E-03
B.1.S	4	5,12	5,13	5,14	5,13	5,130	1,36E-11	5,22E-11	3,85	7,55E-03
B.1.S	5	5,15	5,14	5,07	5,22	5,145	1,35E-11	5,42E-11	4,01	9,14E-03
Relative Dielektrizitätszahl						Verlustfaktor				
Mittelwert		3,95				Mittelwert		9,07E-03		
Standardabw.		0,063				Standardabw		1,19E-03		
Minimal		3,85				Minimal		7,55E-03		
Maximal		4,01				Maximal		1,09E-02		

Tabelle 9-10 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe B.1.S

Proben-bezeichnung	Proben-nummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	d mittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	tan δ
B.1.K	1	5,11	5,15	5,16	5,06	5,120	1,36E-11	6,53E-11	4,80	7,03E-03
B.1.K	2	5,16	5,15	5,23	5,2	5,185	1,34E-11	6,33E-11	4,72	6,93E-03
B.1.K	3	5,22	5,11	5,14	5,21	5,170	1,35E-11	6,42E-11	4,77	6,84E-03
B.1.K	4	5,15	5,01	5,16	5,18	5,125	1,36E-11	6,40E-11	4,72	6,97E-03
B.1.K	5	5,16	5,07	5,1	5,07	5,100	1,36E-11	6,44E-11	4,72	6,80E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	4,75
Standardabw.	0,039
Minimal	4,72
Maximal	4,80

Verlustfaktor	
Mittelwert	6,91E-03
Standardabw	9,51E-05
Minimal	6,80E-03
Maximal	7,03E-03

Tabelle 9-11 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe B.1.K

Proben-bezeichnung	Proben-nummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	tan δ
C.1.S	1	5,27	5,23	5,22	5,35	5,268	1,32E-11	5,95E-11	4,50	9,64E-03
C.1.S	2	5,41	5,55	5,26	5,27	5,373	1,29E-11	5,80E-11	4,48	8,71E-03
C.1.S	3	5,25	5,22	5,19	5,19	5,213	1,33E-11	5,82E-11	4,36	8,41E-03
C.1.S	4	5,19	5,18	5,27	5,2	5,210	1,33E-11	6,07E-11	4,55	8,60E-03
C.1.S	5	5,15	5,19	5,2	5,18	5,180	1,34E-11	5,68E-11	4,23	8,14E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	4,43
Standardabw.	0,128
Minimal	4,23
Maximal	4,55

Verlustfaktor	
Mittelwert	8,70E-03
Standardabw	5,70E-04
Minimal	8,14E-03
Maximal	9,64E-03

Tabelle 9-12 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe C.1.S

Proben-bezeichnung	Proben-nummer	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	dmittel [cm]	Co [F]	Cx [F]	ϵ_r	tan δ
C.1.K	1	5,19	5,12	5,13	5,21	5,163	1,35E-11	6,74E-11	5,00	6,96E-03
C.1.K	2	5,07	5,07	5,06	5,1	5,075	1,37E-11	6,90E-11	5,03	6,85E-03
C.1.K	3	5,05	5,06	5,12	5,08	5,078	1,37E-11	6,90E-11	5,04	7,84E-03
C.1.K	4	5,16	5,1	5,19	5,23	5,170	1,35E-11	6,76E-11	5,02	7,14E-03
C.1.K	5	5,09	5,05	5,04	5,07	5,063	1,37E-11	6,81E-11	4,96	7,19E-03

Relative Dielektrizitätszahl	
Mittelwert	5,01
Standardabw.	0,033
Minimal	4,96
Maximal	5,04

Verlustfaktor	
Mittelwert	7,20E-03
Standardabw	3,87E-04
Minimal	6,85E-03
Maximal	7,84E-03

Tabelle 9-13 Messergebnisse der dielektrischen Untersuchung an Messreihe C.1.K

9.6 Messergebnisse der TE- und Durchschlagsuntersuchung

9.6.1 Messreihe A

Einbau der Proben:	Anliegend
Elektrodenabstand:	-
Winkelstellung:	0°
Abrundung der Kanten:	-
Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]:	93,1 kV
Mittelwert U [kV]:	87,7
Stabw. [kV]:	18,7
Min. U [kV]:	55,8
Dicke [mm]:	18...18,2

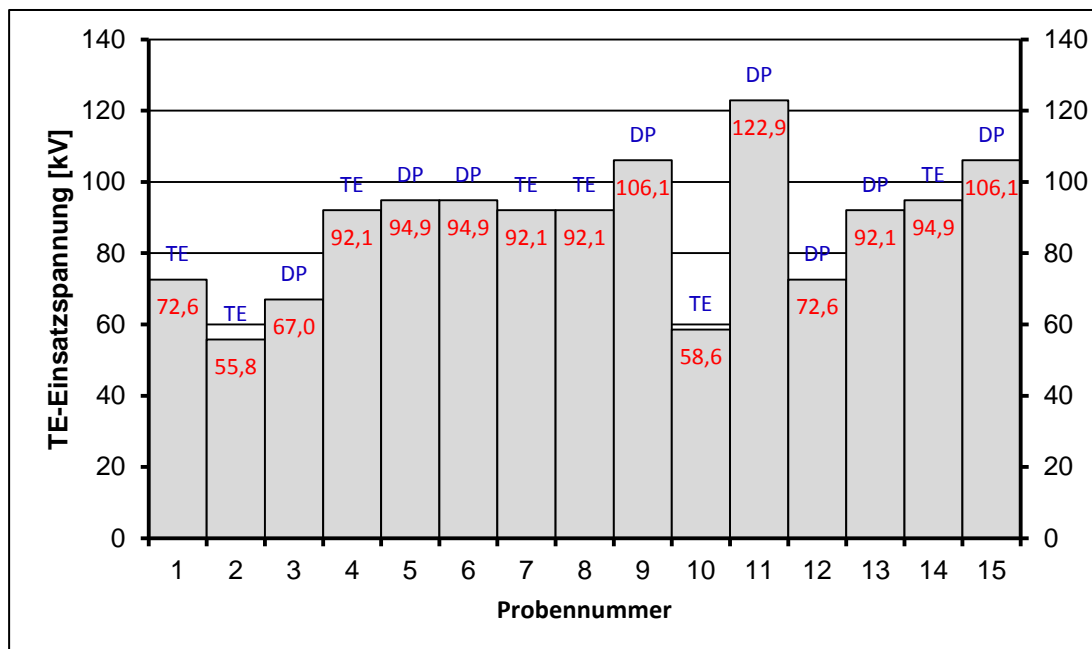


Abbildung 9-3 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe A

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,8	-	5,4	-
Stabw. E [kV/mm]	1,03	-	0,96	-
Min. E [kV/mm]	3,1	-	3,4	-

Tabelle 9-14 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe A

9.6.2 Messreihe B

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **117,7**
 Mittelwert U [kV]: **106,4**
 Stabw. [kV]: **25,9**
 Min. U [kV]: **70,6**
 Dicke [mm]: **18...18,3**

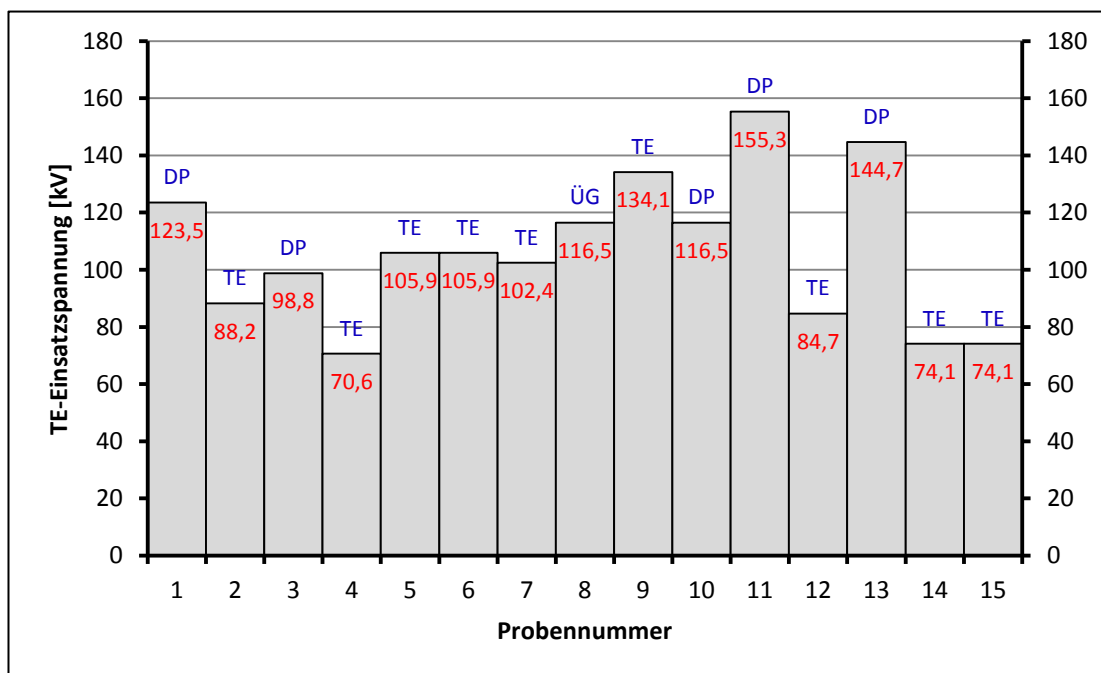


Abbildung 9-4 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe B

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,9	8,9	5,5	10,0
Stabw. E [kV/mm]	1,19	2,16	1,0	1,81
Min. E [kV/mm]	3,2	5,9	4,2	7,7

Tabelle 9-15 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe B

9.6.3 Messreihe B.1

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **118,3**
 Mittelwert U [kV]: **106,5**
 Stabw. [kV]: **19,0**
 Min. U [kV]: **74,5**
 Dicke [mm]: **18...18,2**

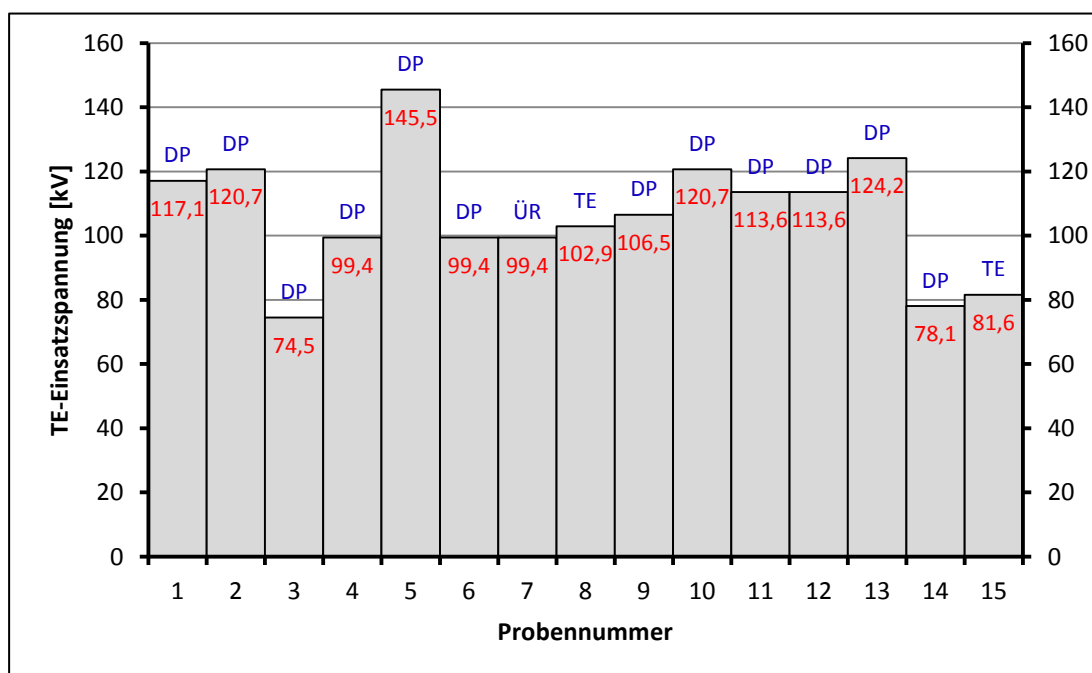


Abbildung 9-5 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe B.1

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,9	9,2	5,1	9,6
Stabw. E [kV/mm]	0,87	1,64	0,85	1,61
Min. E [kV/mm]	3,4	6,5	3,4	6,5

Tabelle 9-16 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe B.1

9.6.4 Messreihe C

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **28 mm**
 Winkelstellung: **45°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **166,7**
 Mittelwert U [kV]: **148,0**
 Stabw. [kV]: **13,7**
 Min. U [kV]: **130,0**
 Dicke [mm]: **25...25,6**

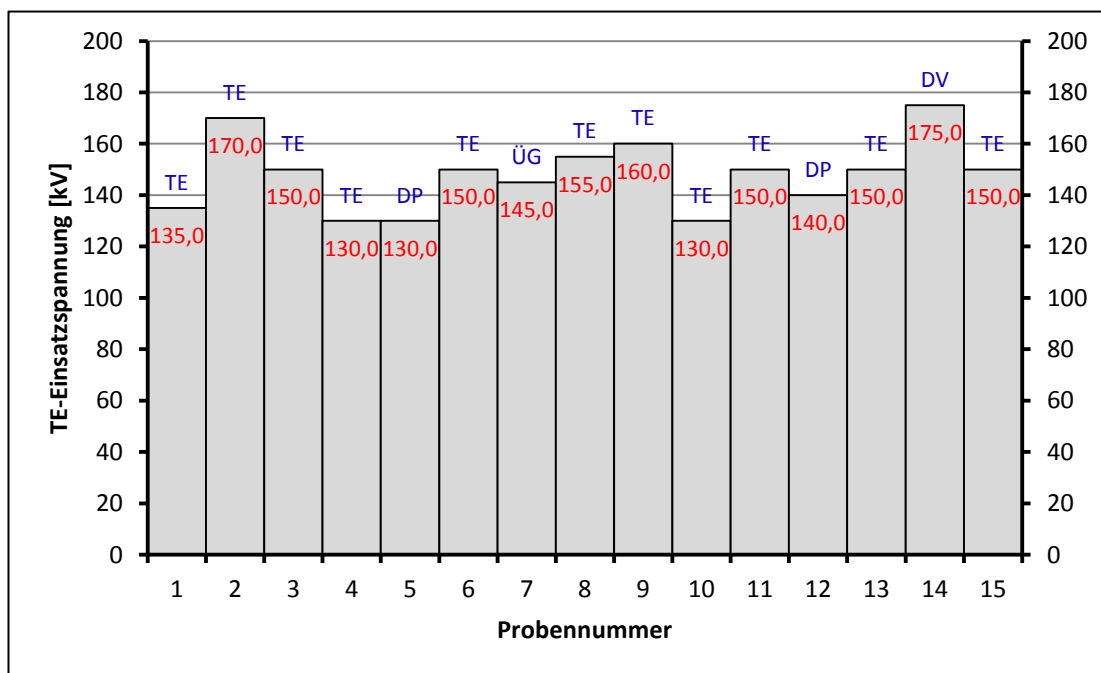


Abbildung 9-6 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe C

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,0	9,3	6,2	11,2
Stabw. E [kV/mm]	0,47	0,87	1,13	2,05
Min. E [kV/mm]	4,4	8,1	4,4	8,0

Tabelle 9-17 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe C

9.6.5 Messreihe C.1

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **28 mm**
 Winkelstellung: **45°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **142,2**
 Mittelwert U [kV]: **156,0**
 Stabw. [kV]: **27,6**
 Min. U [kV]: **94,0**
 Dicke [mm]: **24,7...25,2**

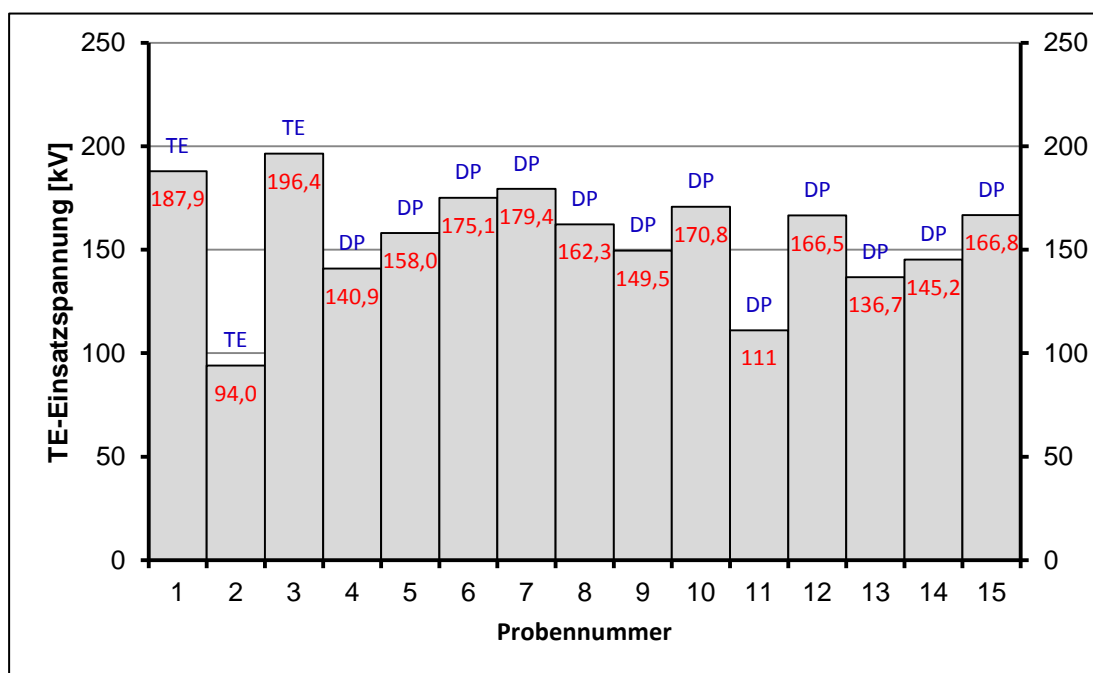


Abbildung 9-7 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe C.1

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,2	10,0	5,5	10,5
Stabw. E [kV/mm]	0,93	1,76	0,94	1,79
Min. E [kV/mm]	3,2	6,0	3,7	7,1

Tabelle 9-18 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe C.1

9.6.6 Messreihe D

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **21 mm**
 Winkelstellung: **90°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **165,8**
 Mittelwert U [kV]: **154,5**
 Stabw. [kV]: **22,7**
 Min. U [kV]: **104,5**
 Dicke [mm]: **17,7...18,1**

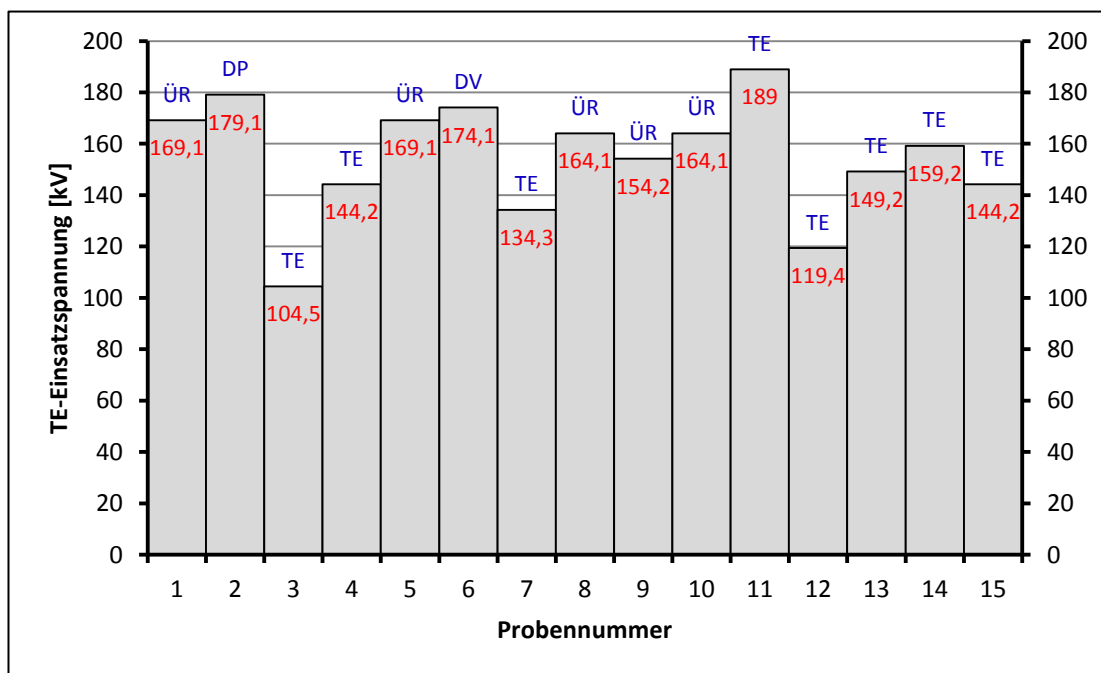


Abbildung 9-8 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe D

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	6,8	10,8	7,4	11,9
Stabw. E [kV/mm]	0,99	1,59	0,55	0,89
Min. E [kV/mm]	4,6	7,3	6,7	10,8

Tabelle 9-19 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe D

9.6.7 Messreihe E

Einbau der Proben:	Anliegend
Elektrodenabstand:	-
Winkelstellung:	0
Abrundung der Kanten:	2 mm
Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]:	100,6
Mittelwert U [kV]:	89,7
Stabw. [kV]:	21,4
Min. U [kV]:	60,4
Dicke [mm]:	17,7...18,2

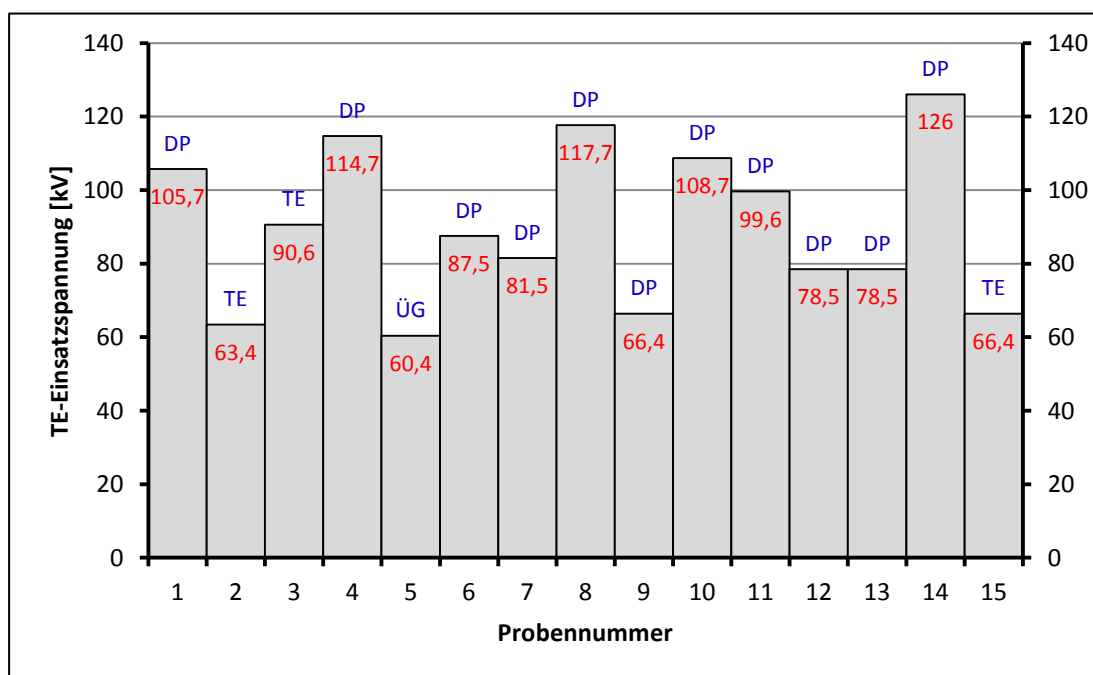


Abbildung 9-9 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe E

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,0	-	5,1	-
Stabw. E [kV/mm]	1,17	-	1,09	-
Min. E [kV/mm]	3,3	-	3,3	-

Tabelle 9-20 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe E

9.6.8 Messreihe F

Einbau der Proben: **2 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **23 mm**
 Winkelstellung: **90°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **174,6**
 Mittelwert U [kV]: **157,0**
 Stabw. [kV]: **23,1**
 Min. U [kV]: **105,8**
 Dicke [mm]: **17,8...18,1**

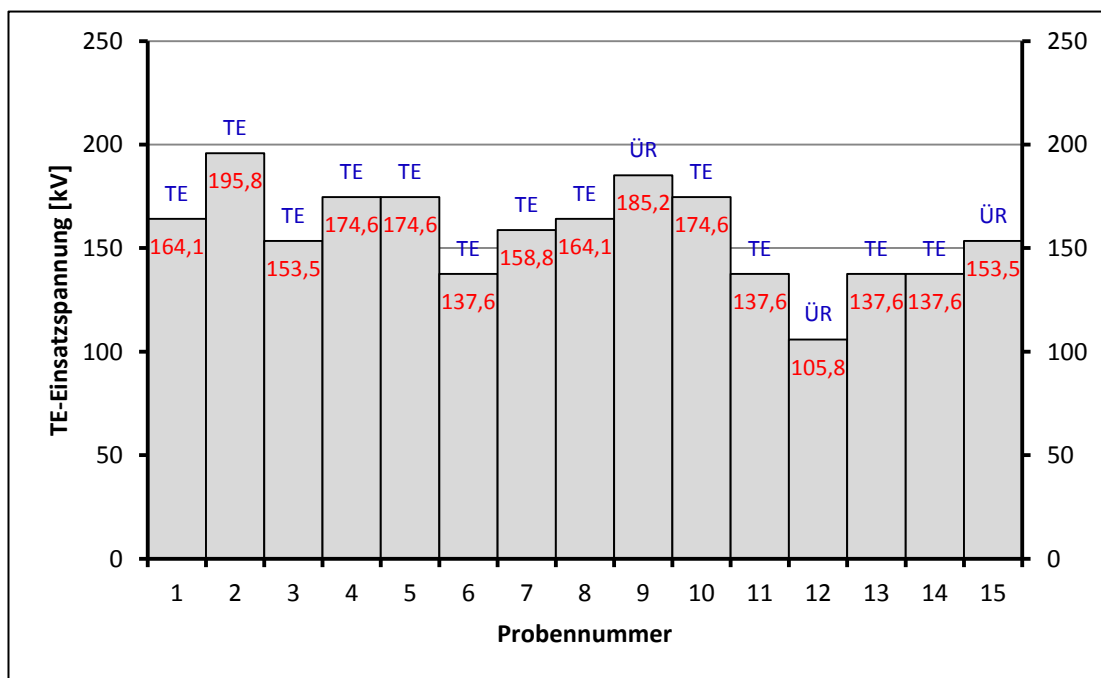


Abbildung 9-10 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe F

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	6,0	9,7	6,9	11,2
Stabw. E [kV/mm]	0,89	1,43	1,09	1,76
Min. E [kV/mm]	4,1	6,5	4,1	6,5

Tabelle 9-21 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe F

9.6.9 Messreihe G

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **111,4**
 Mittelwert U [kV]: **113,9**
 Stabw. [kV]: **18,2**
 Min. U [kV]: **83,6**
 Dicke [mm]: **17,8...18,1**

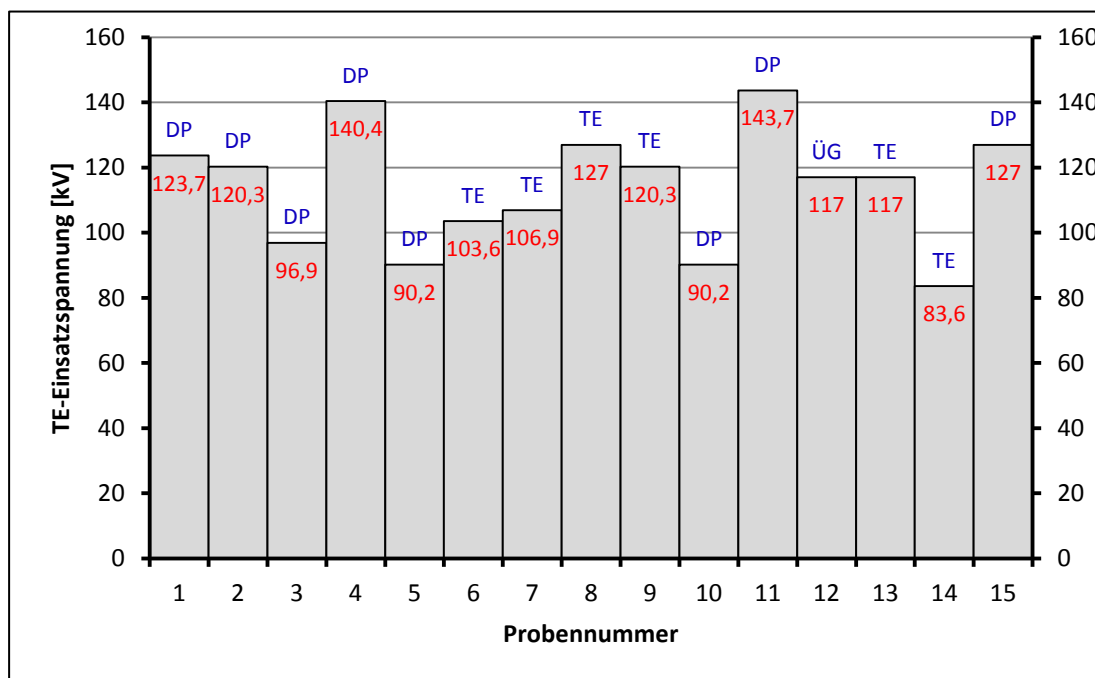


Abbildung 9-11 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe G

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,2	9,8	5,4	10,3
Stabw. E [kV/mm]	0,83	1,56	0,90	1,70
Min. E [kV/mm]	3,8	7,2	4,1	7,7

Tabelle 9-22 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe G

9.6.10 Messreihe H

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **-**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **108,8**
 Mittelwert U [kV]: **106,5**
 Stabw. [kV]: **22,2**
 Min. U [kV]: **62,9**
 Dicke [mm]: **17,8...18**

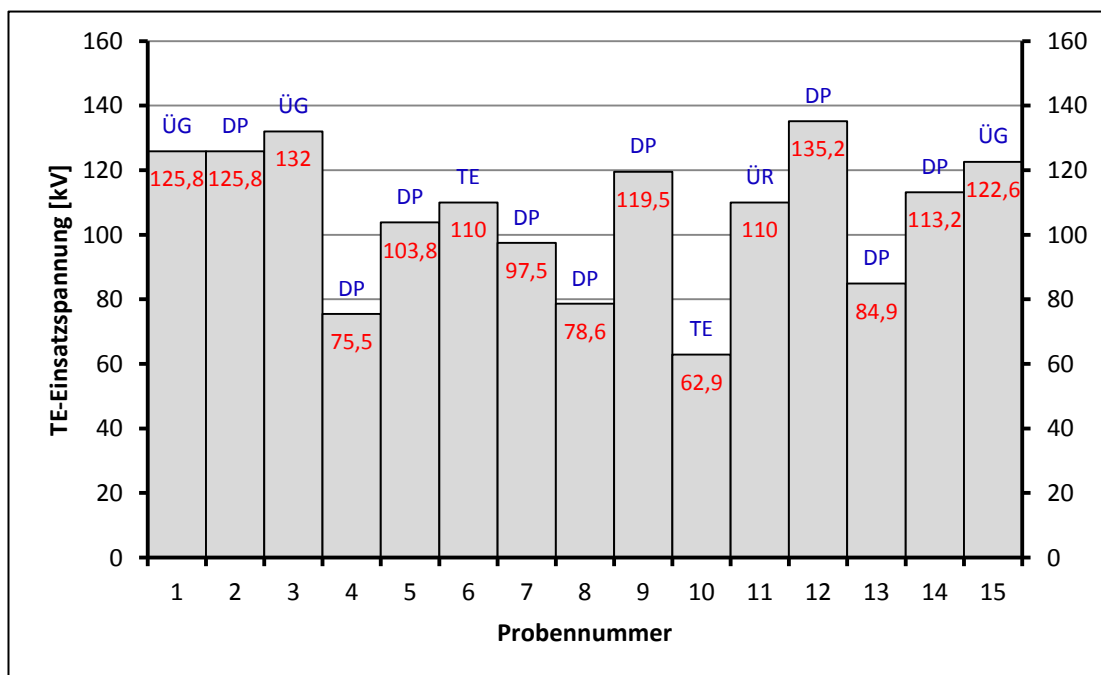


Abbildung 9-12 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe H

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,8	9,1	4,9	9,4
Stabw. E [kV/mm]	1,0	1,89	0,84	1,59
Min. E [kV/mm]	2,9	5,4	3,4	6,5

Tabelle 9-23 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe H

9.6.11 Messreihe I

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **77,9 (frei gewählt)**
 Mittelwert U [kV]: **75,0**
 Stabw. [kV]: **27,4**
 Min. U [kV]: **49,1**
 Dicke [mm]: **18...18,4**

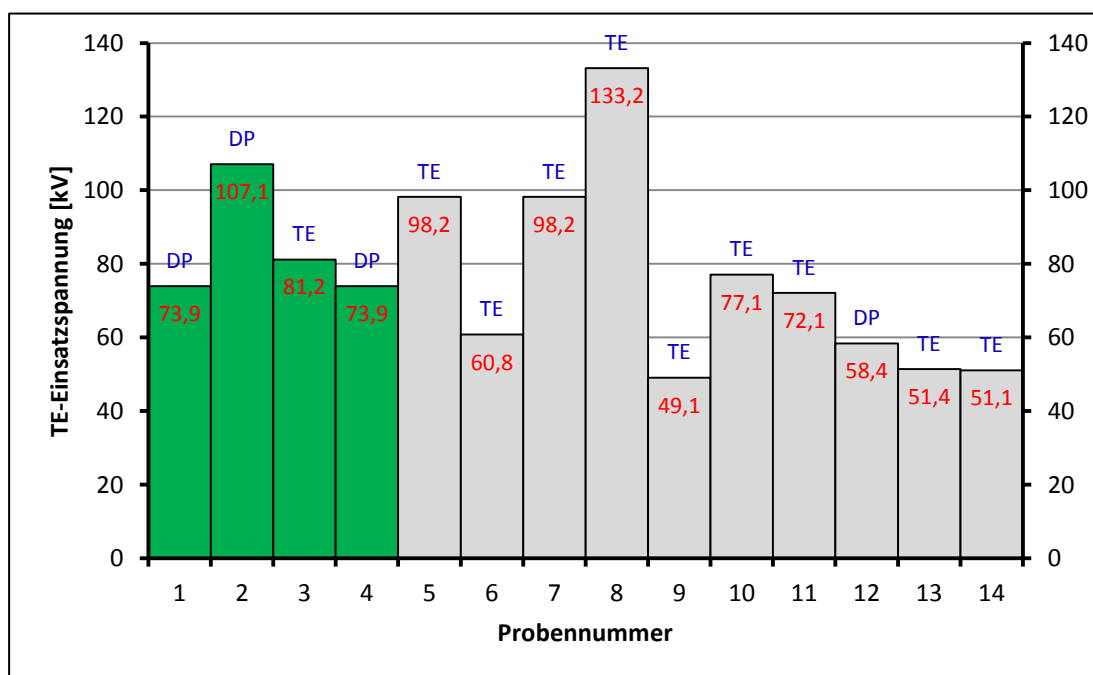


Abbildung 9-13 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 14 aus Messreihe I (Die Proben 1-4 wurden mit einem höheren Startwert von 123,1 kV gestartet)

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	3,6	6,7	4,0	7,6
Stabw. E [kV/mm]	1,12	2,12	1,25	2,36
Min. E [kV/mm]	2,2	4,3	2,6	4,9

Tabelle 9-24 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe I

9.6.12 Messreihe J

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **77,9 (frei gewählt)**
 Mittelwert U [kV]: **97,2**
 Stabw. [kV]: **32,4**
 Min. U [kV]: **51,4**
 Dicke [mm]: **17,9...18,5**

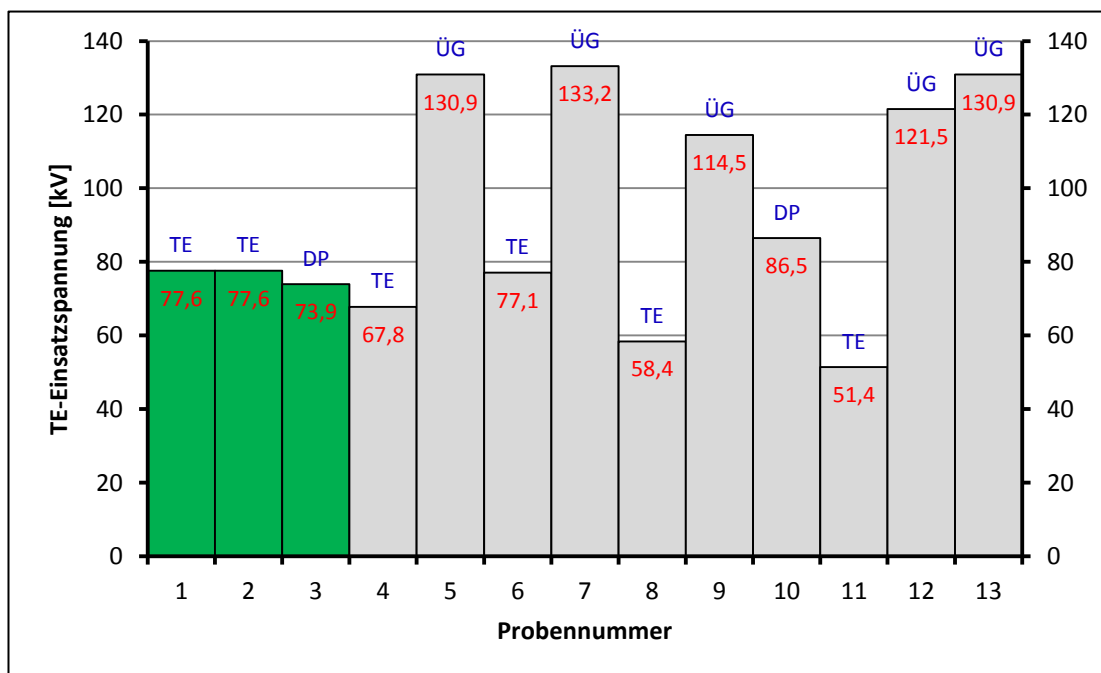


Abbildung 9-14 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe J (Proben 1-3 wurden mit einem höheren Startwert von 123,1 kV geprüft)

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,3	8,1	5,0	9,6
Stabw. E [kV/mm]	1,37	2,61	0,92	1,76
Min. E [kV/mm]	2,4	4,5	3,4	6,5

Tabelle 9-25 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe J

9.6.13 Messreihe K

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **114,0**
 Mittelwert U [kV]: **114,4**
 Stabw. [kV]: **18,1**
 Min. U [kV]: **82,0**
 Dicke [mm]: **17,9...18,2**

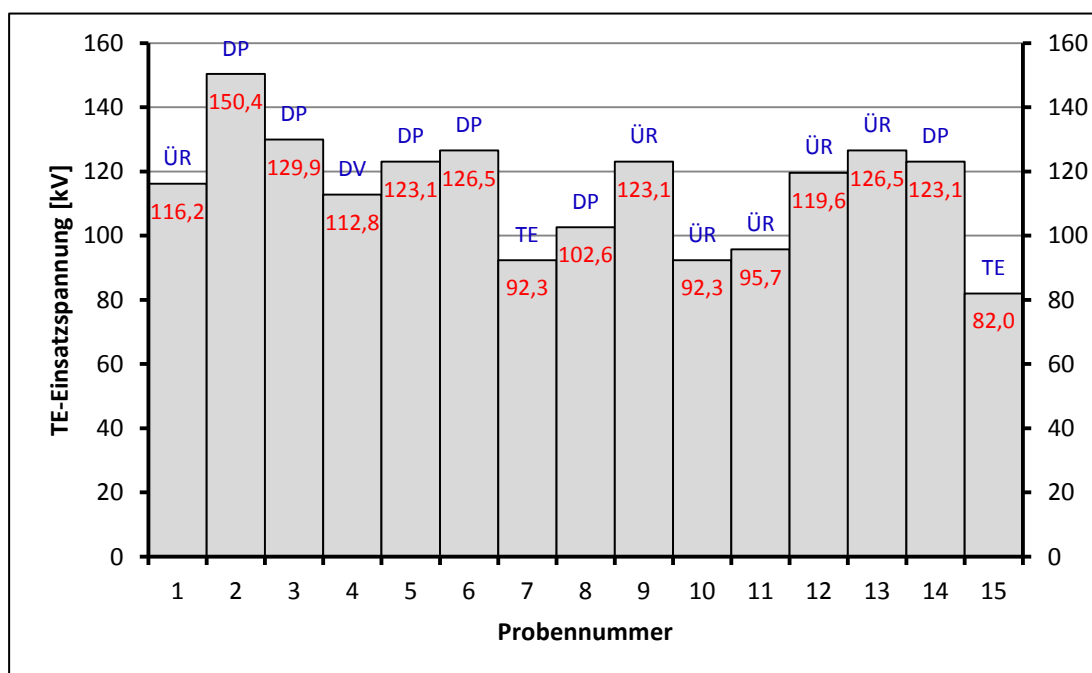


Abbildung 9-15 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe K

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,0	11,6	5,2	12,0
Stabw. E [kV/mm]	0,80	1,84	0,68	1,56
Min. E [kV/mm]	3,6	8,3	4,0	9,3

Tabelle 9-26 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe K

9.6.14 Messreihe K.1

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **116,4**
 Mittelwert U [kV]: **97,1**
 Stabw. [kV]: **16,1**
 Min. U [kV]: **69,9**
 Dicke [mm]: **17,9...18,2**

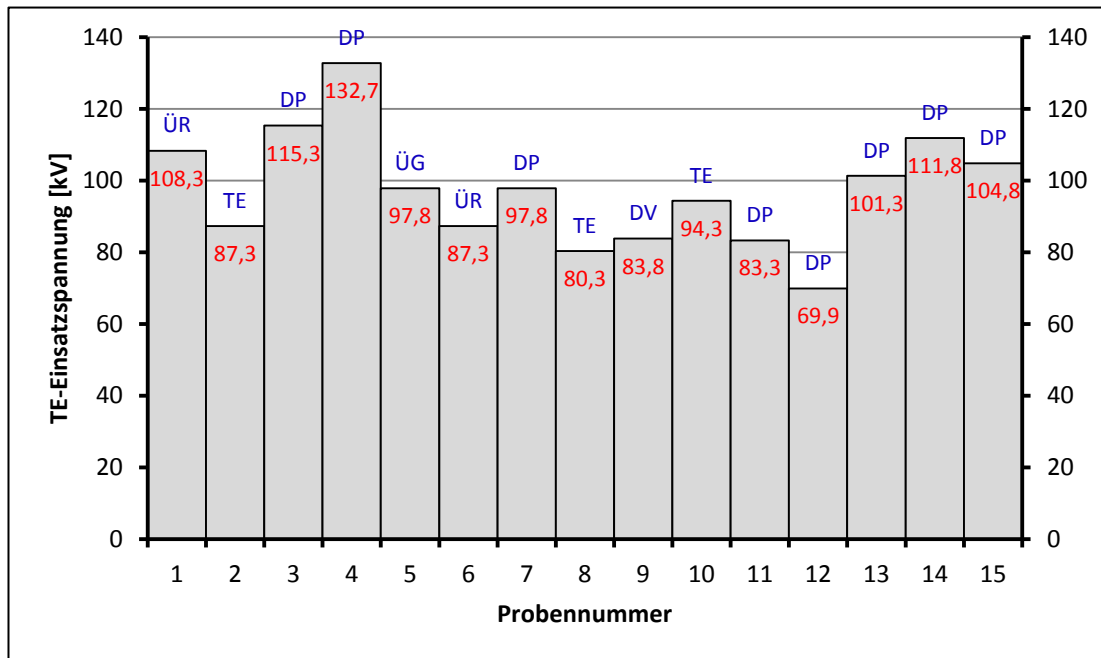


Abbildung 9-16 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe K.1

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,2	9,8	4,4	10,1
Stabw. E [kV/mm]	0,71	1,65	0,70	1,62
Min. E [kV/mm]	3,0	7,0	3,1	7,0

Tabelle 9-27 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe K.1

9.6.15 Messreihe RS A

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **123,1**
 Mittelwert U [kV]: **103,1**
 Stabw. [kV]: **20,1**
 Min. U [kV]: **80,1**
 Dicke [mm]: **17,9...18,2**

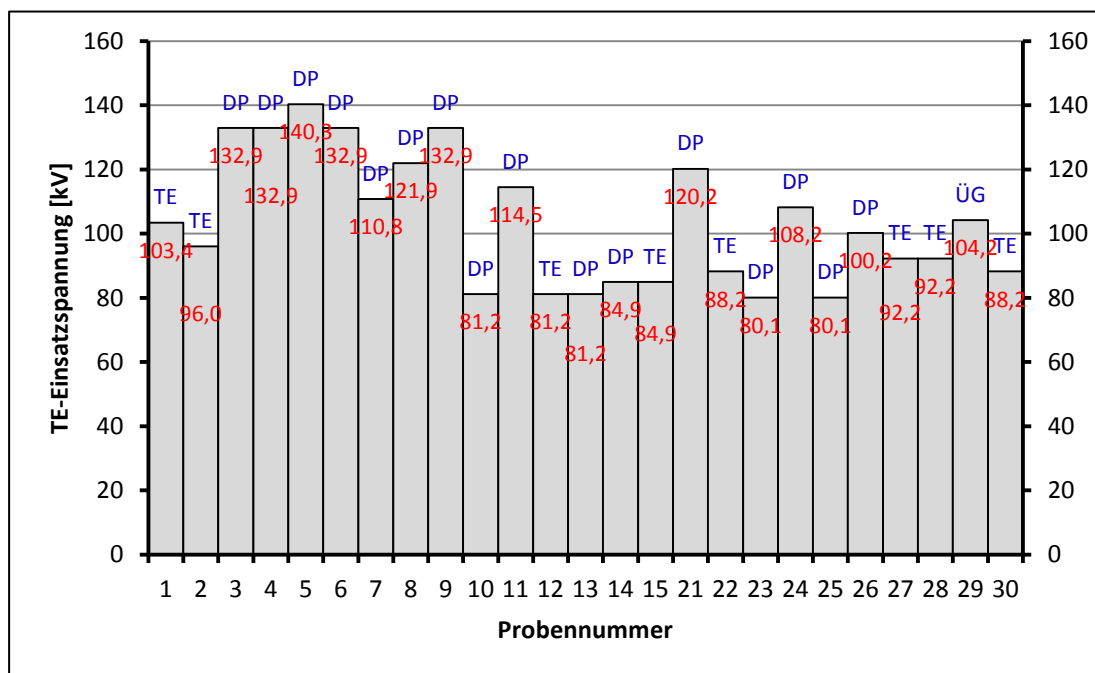


Abbildung 9-17 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 30 aus Messreihe RS A

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,7	8,9	4,8	9,2
Stabw. E [kV/mm]	0,92	1,74	0,94	1,77
Min. E [kV/mm]	3,7	6,9	3,7	6,9

Tabelle 9-28 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe RS A

9.6.16 Messreihe RS B

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **26,5 mm**
 Winkelstellung: **45°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **161,6**
 Mittelwert U [kV]: **165,3**
 Stabw. [kV]: **36,9**
 Min. U [kV]: **96,9**
 Dicke [mm]: **23,8...24,2**

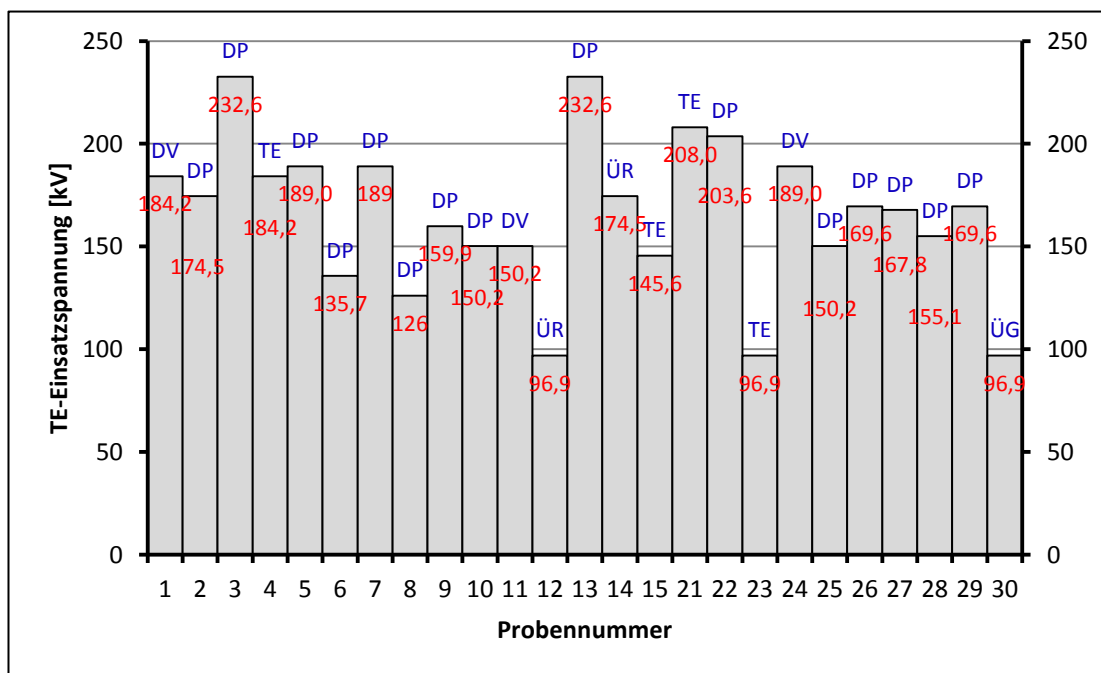


Abbildung 9-18 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 30 aus Messreihe RS B

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	5,9	10,9	6,0	11,5
Stabw. E [kV/mm]	1,32	2,43	1,45	2,75
Min. E [kV/mm]	3,5	6,4	3,5	6,7

Tabelle 9-29 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe RS B

9.6.17 Messreihe RS C

Einbau der Proben: **2 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **23 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **126,2**
 Mittelwert U [kV]: **113,6**
 Stabw. [kV]: **20,1**
 Min. U [kV]: **83,8**
 Dicke [mm]: **17,9...18,2**

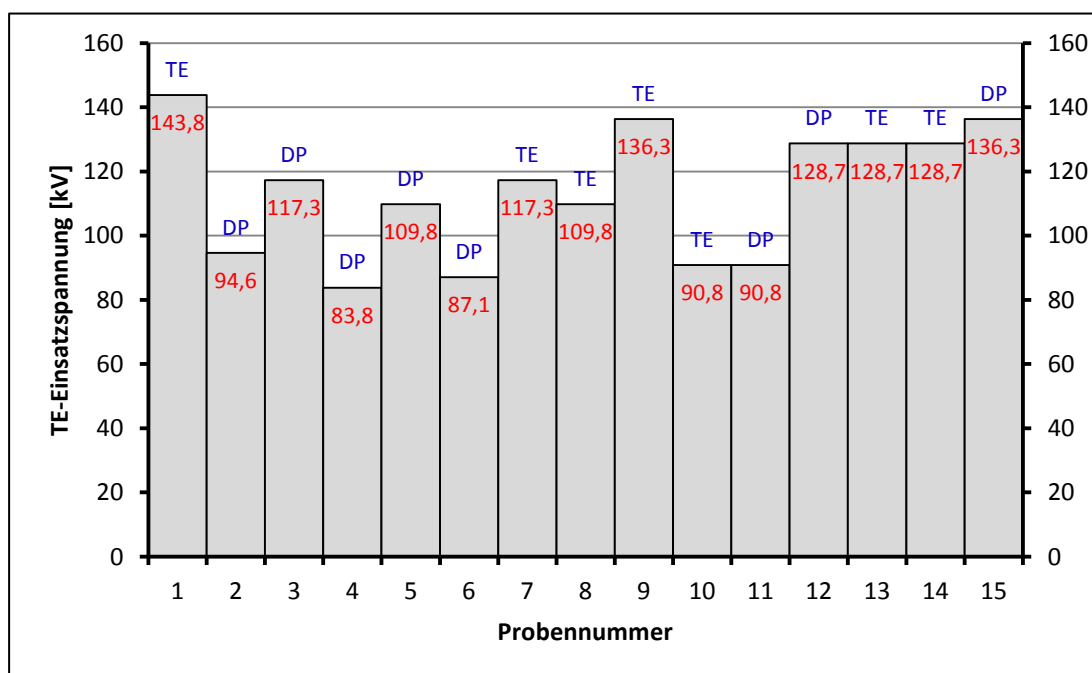


Abbildung 9-19 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 30 aus Messreihe RS C

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	4,4	8,1	4,7	8,7
Stabw. E [kV/mm]	0,78	1,43	1,03	1,90
Min. E [kV/mm]	3,2	5,9	3,2	5,9

Tabelle 9-30 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe RS C

9.6.18 Messreihe RS D

Einbau der Proben: **1 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **90,6**
 Mittelwert U [kV]: **78,2**
 Stabw. [kV]: **15,7**
 Min. U [kV]: **54,4**
 Dicke [mm]: **18,2...18,5**

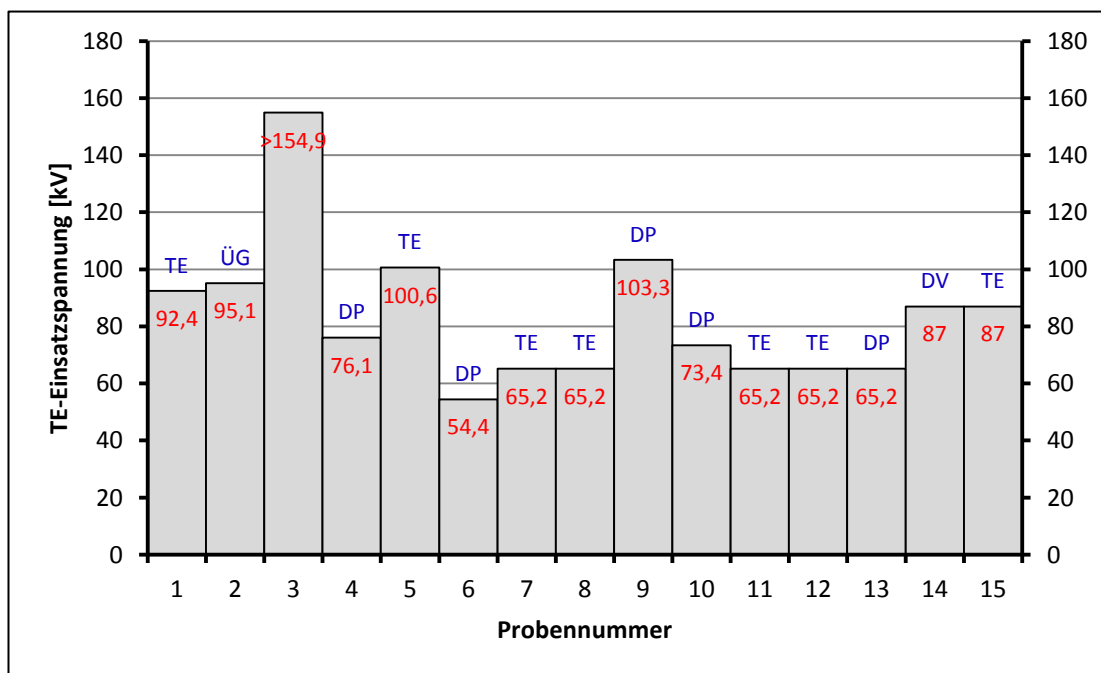


Abbildung 9-20 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe RS D (Keine Aussage über Probe 3 – wegen doppelter Spannungsstufe wurde abgebrochen)

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	3,6	6,6	4,1	7,8
Stabw. E [kV/mm]	0,72	1,32	0,99	1,88
Min. E [kV/mm]	2,5	4,5	2,5	4,7

Tabelle 9-31 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe RS D

9.6.19 Messreihe RS E

Einbau der Proben: **2 mm Ölspalt**
 Elektrodenabstand: **20,5 mm**
 Winkelstellung: **0°**
 Abrundung der Kanten: **2 mm**
 Erwartete Ereigniseinsatzspannung [kV]: **85,7**
 Mittelwert U [kV]: **75,2**
 Stabw. [kV]: **25,8**
 Min. U [kV]: **51,4**
 Dicke [mm]: **18,2...18,5**

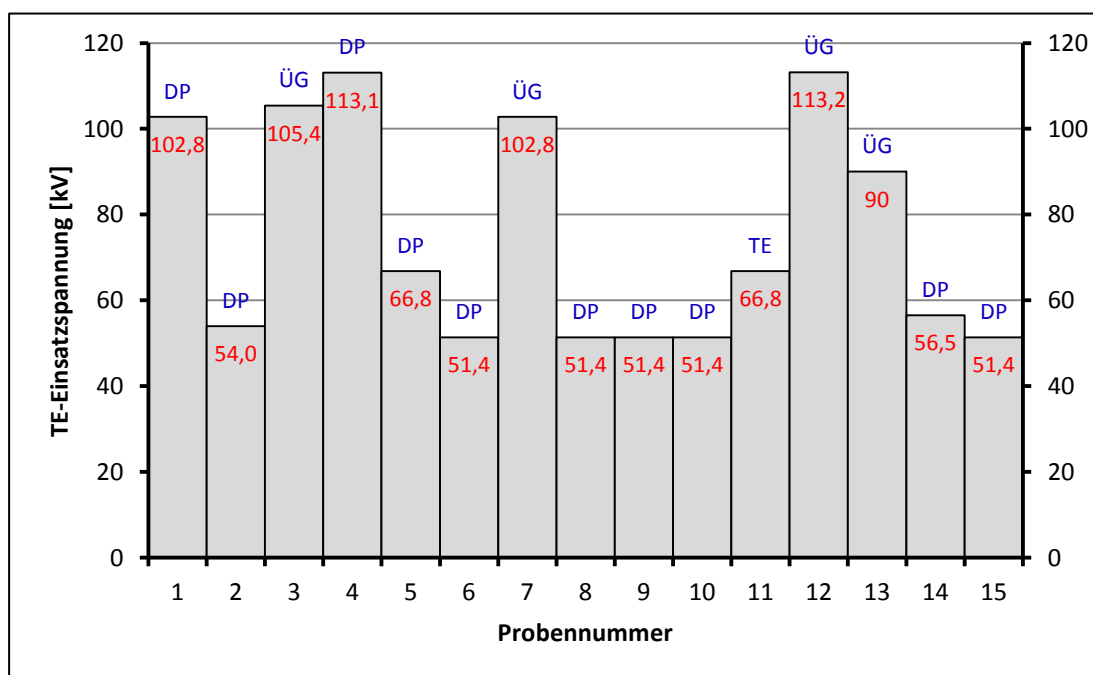


Abbildung 9-21 Ereigniseinsatzspannung der Proben 1 bis 15 aus Messreihe RS E

	Ereigniseinsatz		Über- und Durchschlag	
	KP-Holz	Öl	KP-Holz	Öl
Mittelwert E [kV/mm]	3,3	6,3	3,5	6,6
Stabw. E [kV/mm]	1,15	2,17	1,18	2,26
Min. E [kV/mm]	2,3	4,3	2,4	4,5

Tabelle 9-32 Ereigniseinsatz-, Über- und Durchschlagsfeldstärke im Öl und im KP-Holz Messreihe RS E

9.7 Formel - Dielektrizitätszahl von parallelen zur Fasern zum E-Feld

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich, auf die relative Dielektrizitätszahl von parallel laufenden Fasern zum E-Feldvektor zu schließen. Dabei muss die relative Dielektrizitätszahl von kreuzgeschichtetem Material und die relative Dielektrizitätszahl von senkrecht laufenden Fasern zum E-Feld für jede Verdichtungsstufe bekannt sein. Außerdem muss die gleiche Anzahl von senkrecht und parallel laufenden Fasern zum E-Feldvektor beim kreuzgeschichteten Material während der dielektrischen Untersuchung gegeben sein. Damit liegt idealerweise die Hälfte der Messfläche von der geschützten Elektrode an senkrecht stehenden Fasern und die andere an parallel laufenden Fasern zum E-Feldvektor (**Abbildung 9-22**).

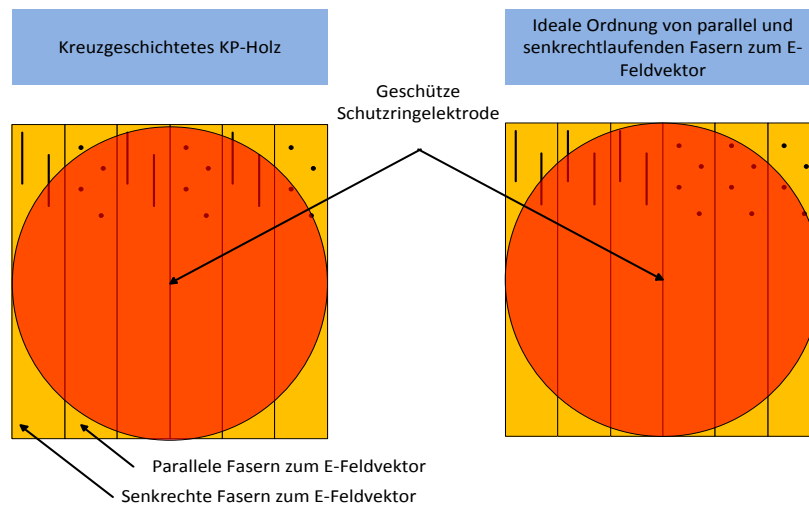


Abbildung 9-22 Kreuzgeschichtetes Material (links) mit einer anderen Ordnung von senkrechten und parallelen Fasern zum E-Feld (rechts) bei der dielektrischen Untersuchung

Aus diesen Bedingungen heraus kann ein ideales Ersatzschaltbild aus zwei Kondensatoren für senkrechte Fasern C_s und parallele Fasern C_p und derer Gesamtkapazität C_K erstellt werden (**Abbildung 9-23**).

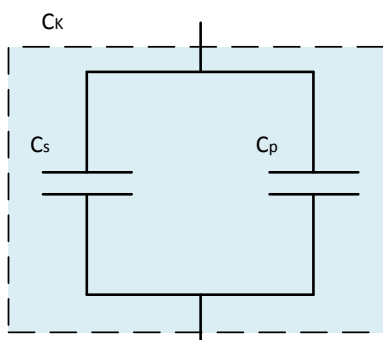


Abbildung 9-23 Ideales Ersatzschaltbild mit der Gesamtkapazität C_K aus kreuzgeschichtetem KP-Holz und C_s für senkrechte Fasern und C_p für parallele Fasern zum E-Feldvektor

Aus der allgemeinen Formel für die Berechnung der Kapazität eines Plattenkondensators

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

Formel 9-1 Berechnung der Kapazität eines Plattenkondensators

und der Formel für die Berechnung der Gesamtkapazität aus einer Parallelschaltung von Kondensatoren, kann auf die dichteabhängige relative Dielektrizitätszahl von parallelen Fasern zum E-Feldvektor umgerechnet werden.

Bezeichnung	Beschreibung
$C_K(\rho)$	Gesamtkapazität von kreuzgeschichtetem KP-Holz in Abhängigkeit von der Dichte
$C_S(\rho)$	Gesamtkapazität von KP-Holz mit senkrechten Fasern zum E-Feld in Abhängigkeit von der Dichte
$C_P(\rho)$	Gesamtkapazität von KP-Holz mit parallelen Fasern zum E-Feld in Abhängigkeit von der Dichte
$\varepsilon_K(\rho)$	Relative Dielektrizitätszahl von kreuzgeschichtetem Material in Abhängigkeit von der Dichte
$\varepsilon_S(\rho)$	Relative Dielektrizitätszahl von senkrechten Fasern zum E-Feld in Abhängigkeit von der Dichte
$\varepsilon_P(\rho)$	Relative Dielektrizitätszahl von parallelen Fasern zum E-Feld in Abhängigkeit von der Dichte
A	Messfläche der geschützten Schirmelektrode
d	Abstand von beiden Elektroden
ε_0	Dielektrizitätskonstante

$$C_K(\rho) = C_S(\rho) \cdot C_P(\rho)$$

$$\varepsilon_K(\rho) \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \varepsilon_S(\rho) \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{2 \cdot d} + \varepsilon_P(\rho) \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{2 \cdot d}$$

$$\varepsilon_K(\rho) = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_S(\rho) + \varepsilon_P(\rho))$$

Nach der Umstellung der Formel nach $\varepsilon_P(\delta)$ wurde die vollständige Herleitung gezeigt.

$$\varepsilon_P(\rho) = 2 \cdot \varepsilon_K(\rho) - \varepsilon_S(\rho)$$

Formel 9-2 Formel für die Berechnung der relativen Dielektrizitätszahl von parallelen Fasern zum E-Feldvektor in Abhängigkeit von der Dichte

9.8 Messergebnisse der Dielektrizitätszahlen in Abhängigkeit von der „Dichte trocken“

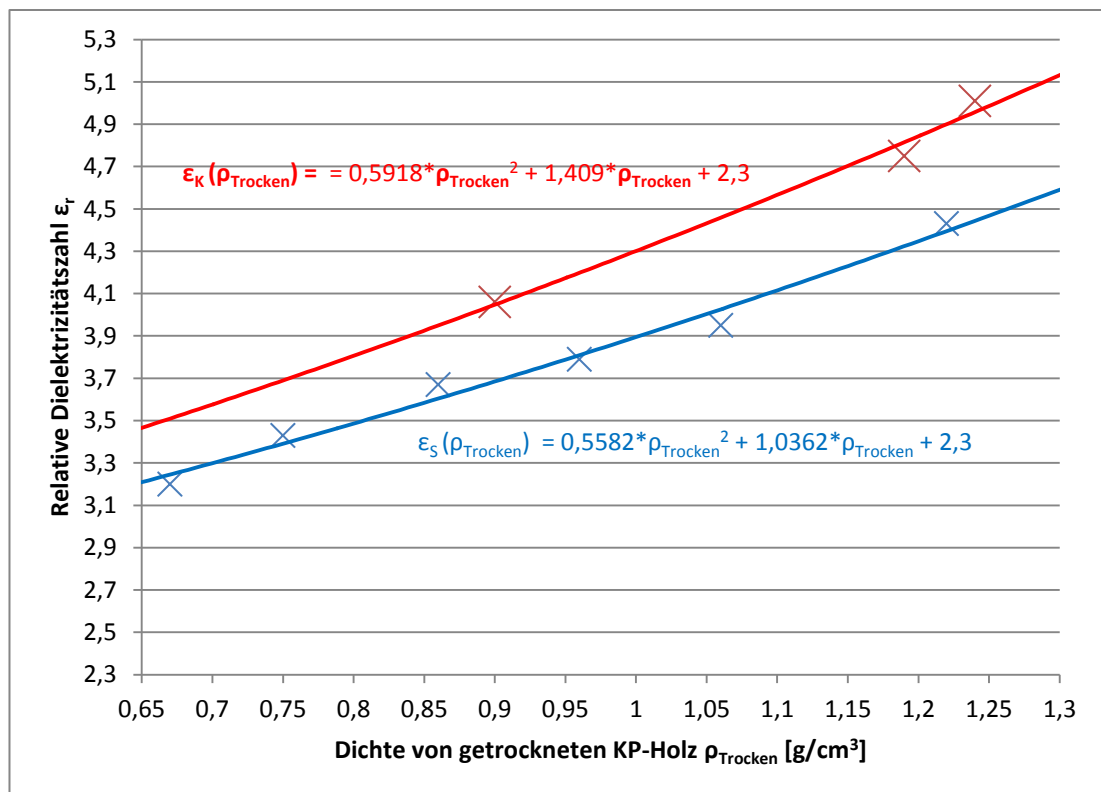


Abbildung 9-24 Die relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der getrockneten Dichte von kreuzgeschichtetem KP-Holz (roter Kurvenverlauf) und KP-Holz mit einer Feldbeanspruchung senkrecht zur Faser (blauer Kurvenverlauf)

9.9 Diagramme - Weibullverteilung

Messreihe A

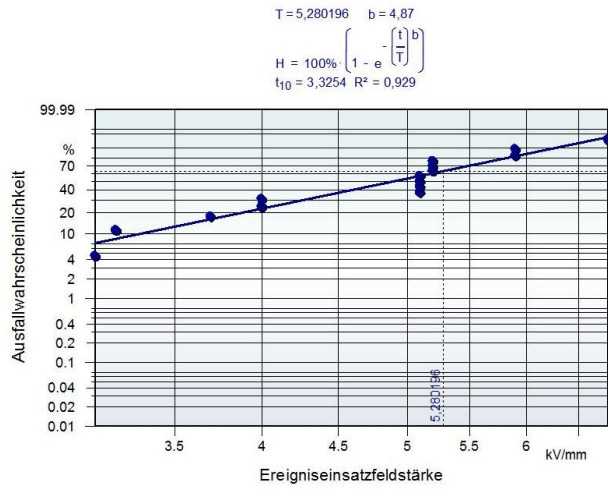


Abbildung 9-25 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe A

Messreihe A

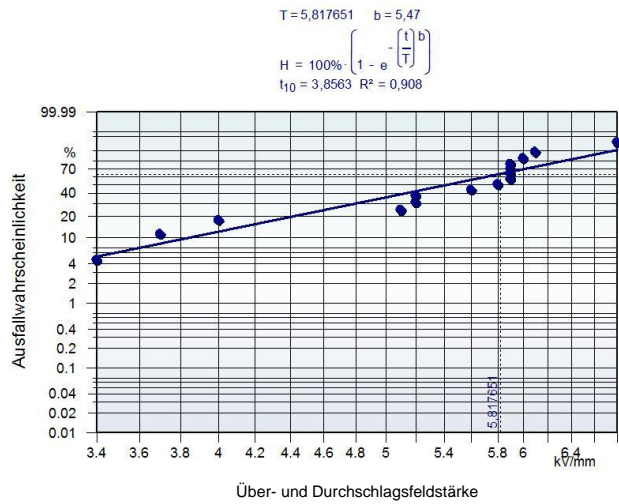
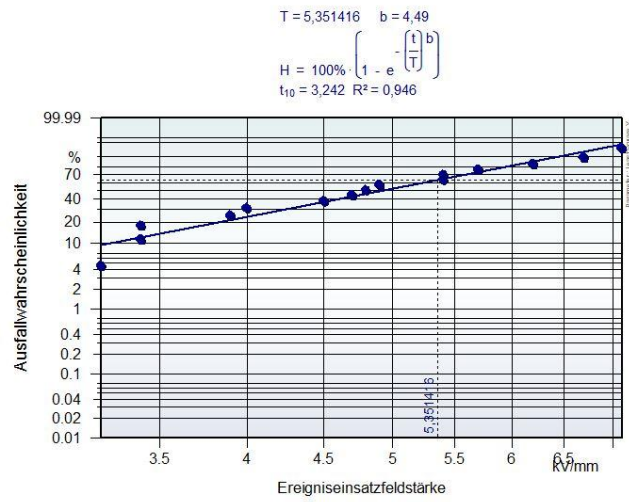


Abbildung 9-26 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe A

Messreihe B



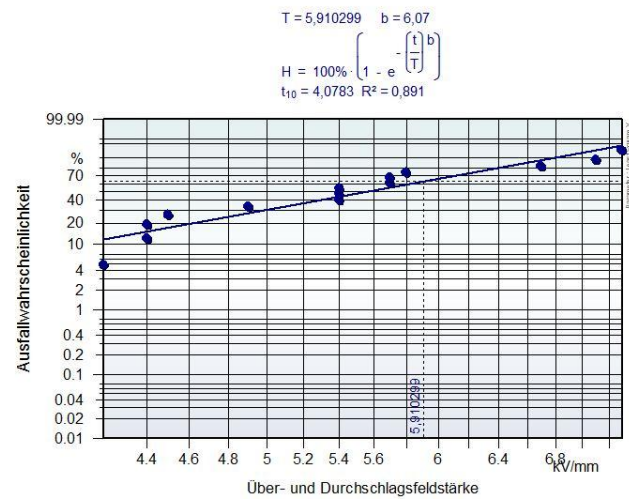
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.0093

Abbildung 9-27 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe B

Messreihe B



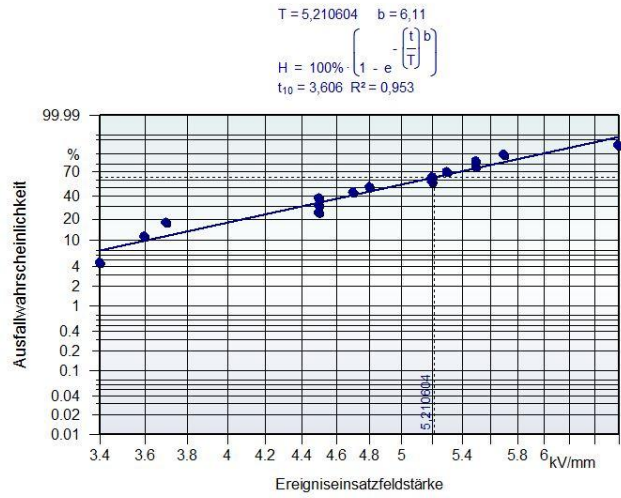
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.0093

Abbildung 9-28 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe B

Messreihe B.1



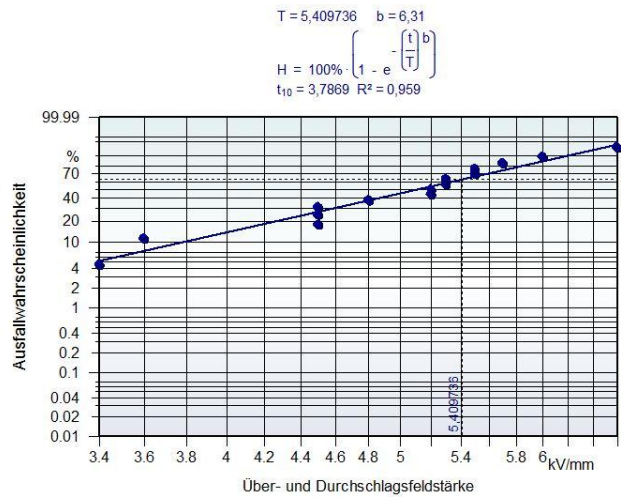
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.009

Abbildung 9-29 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe B.1

Messreihe B.1



Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.009

Abbildung 9-30 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe B.1

Messreihe C

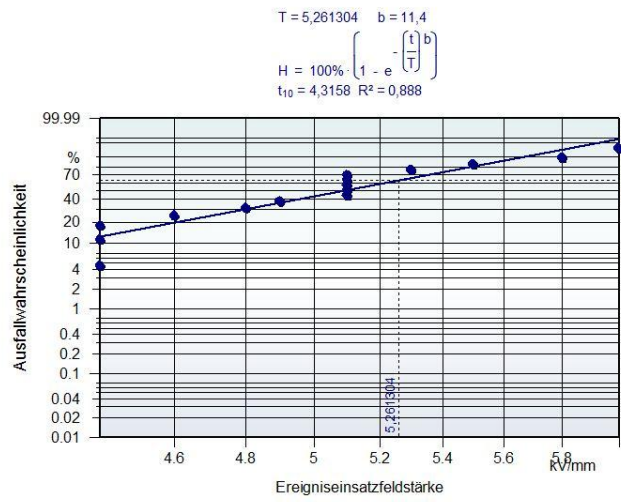


Abbildung 9-31 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe C

Messreihe C

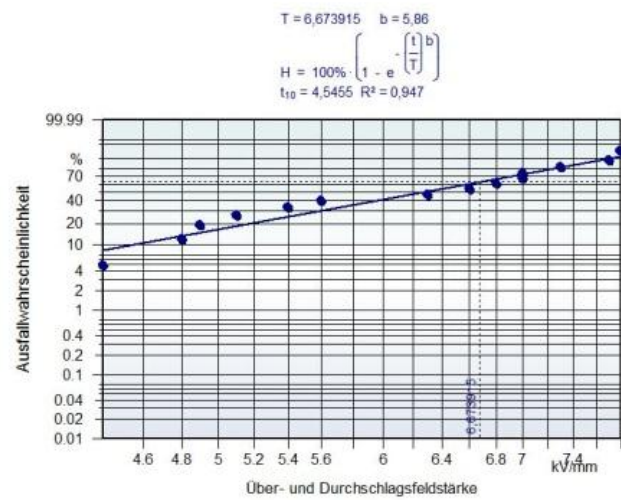
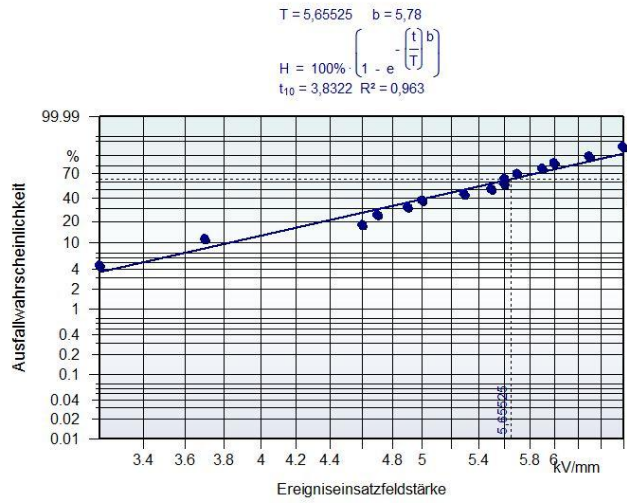


Abbildung 9-32 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe C

Messreihe C.1



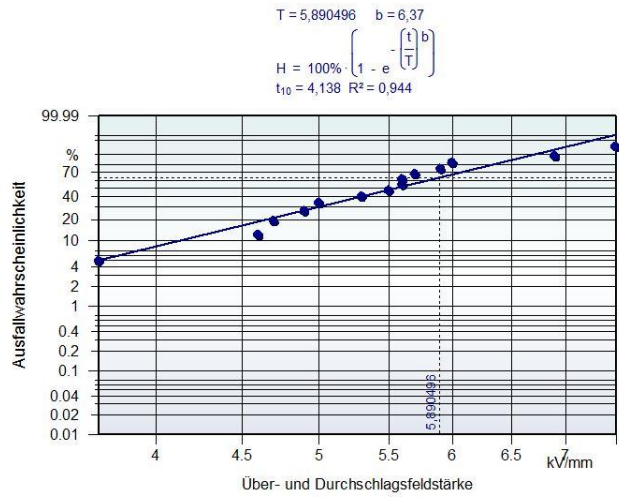
Markus Bittner Weibullverteilung.vcxg

Seite 1

VisualDoc 11.009

Abbildung 9-33 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe C.1

Messreihe C.1



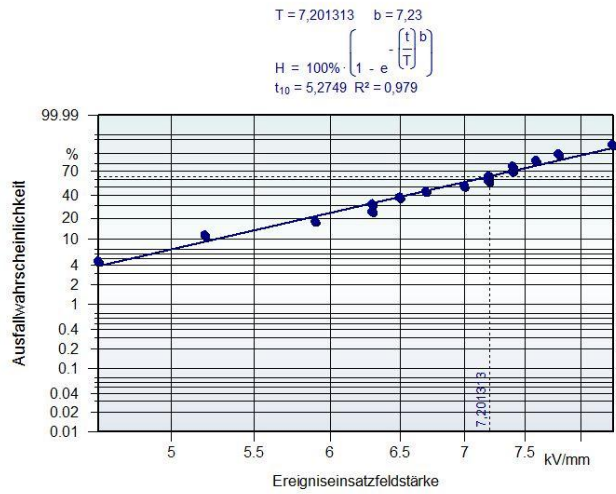
Markus Bittner Weibullverteilung.vcxg

Seite 1

VisualDoc 11.009

Abbildung 9-34 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe C.1

Messreihe D



Markus Bittner

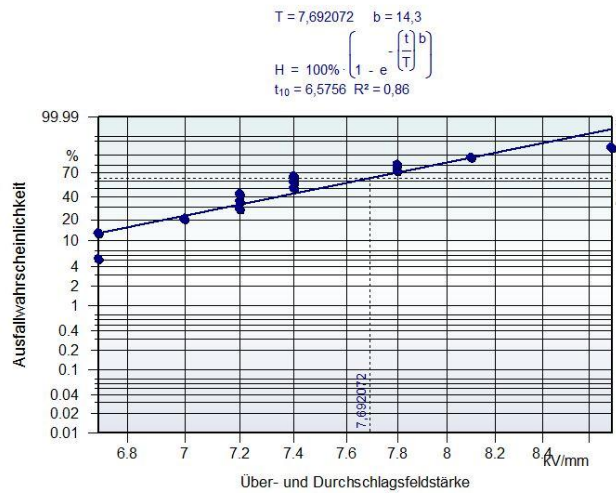
Weibullverteilung.vvxg

Seite 1

Visualizer 11.0093

Abbildung 9-35 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe D

Messreihe D



Markus Bittner

Weibullverteilung.vvxg

Seite 1

Visualizer 11.0093

Abbildung 9-36 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe D

Messreihe E

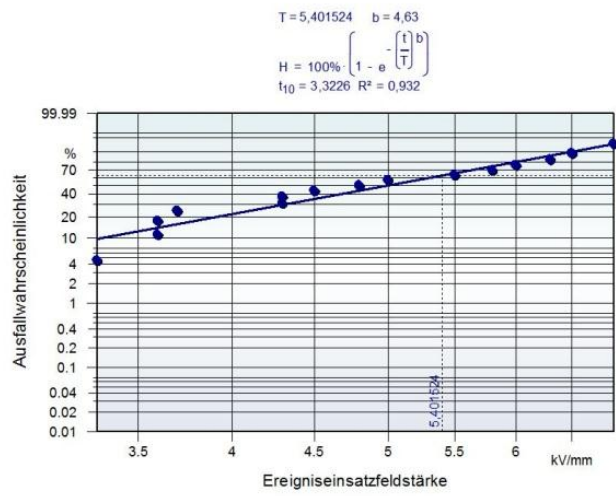


Abbildung 9-37 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe E

Messreihe E

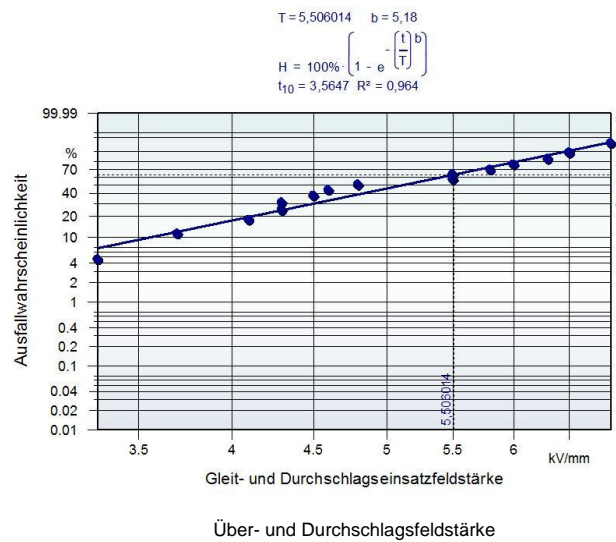
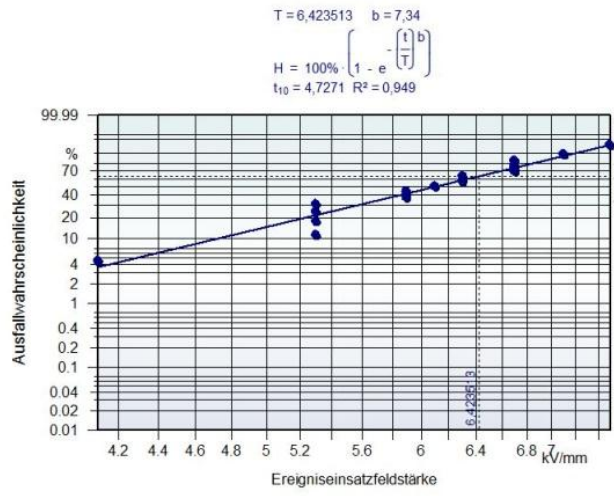


Abbildung 9-38 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe E

Messreihe F



Markus Bittner

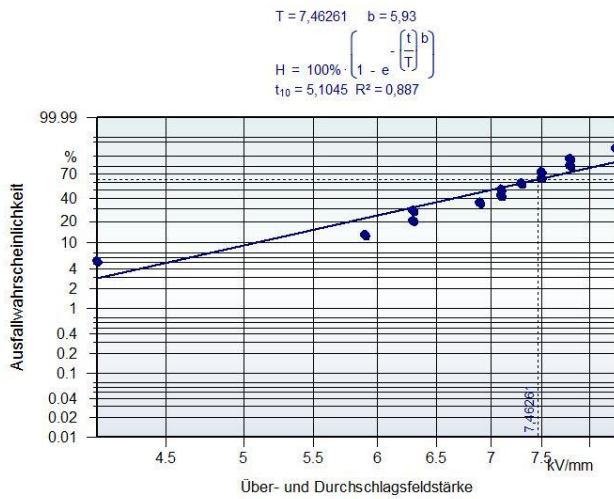
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

VisuWeb11.009

Abbildung 9-39 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe E

Messreihe F



Markus Bittner

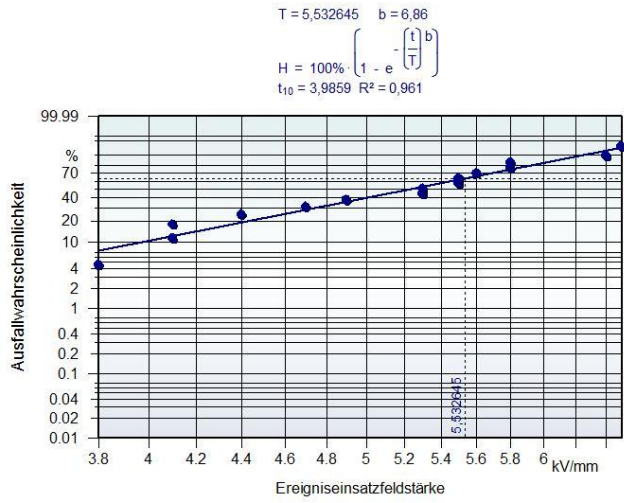
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

VisuWeb11.009

Abbildung 9-40 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe F

Messreihe G



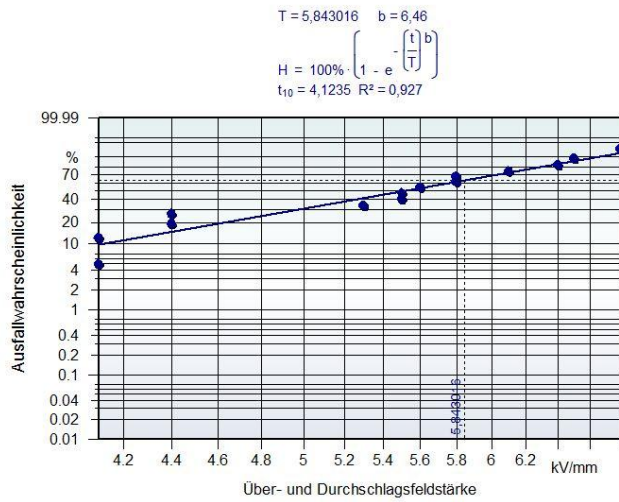
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

VisualDoc: 11.0093

Abbildung 9-41 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe G

Messreihe G



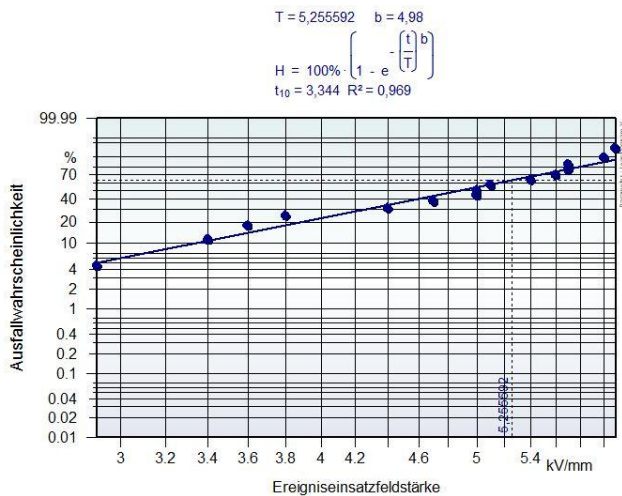
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

VisualDoc: 11.00

Abbildung 9-42 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe G

Messreihe H



Markus Bittner

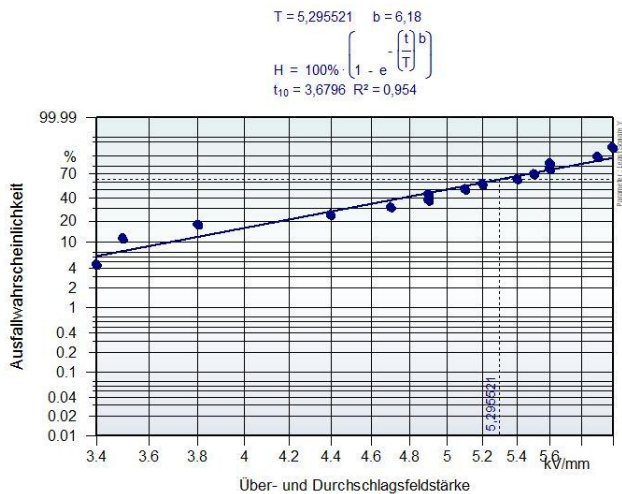
Weibullverteilung.vwxg

Seite 1

Visualizer 11.029

Abbildung 9-43 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe H

Messreihe H



Markus Bittner

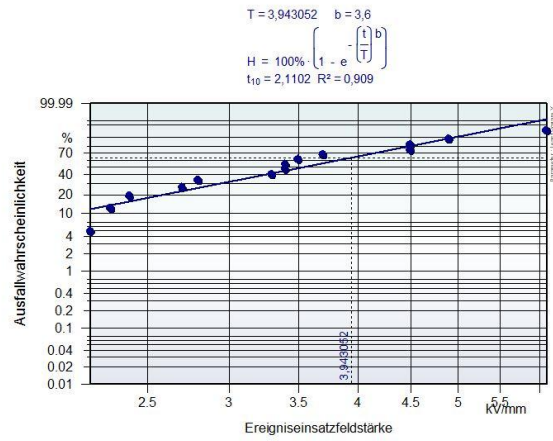
Weibullverteilung.vwxg

Seite 1

Visualizer 11.029

Abbildung 9-44 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe H

Messreihe I



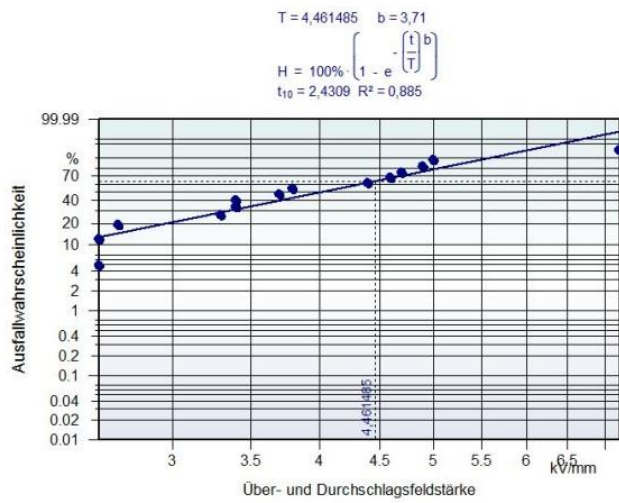
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.00

Abbildung 9-45 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe I

Messreihe I



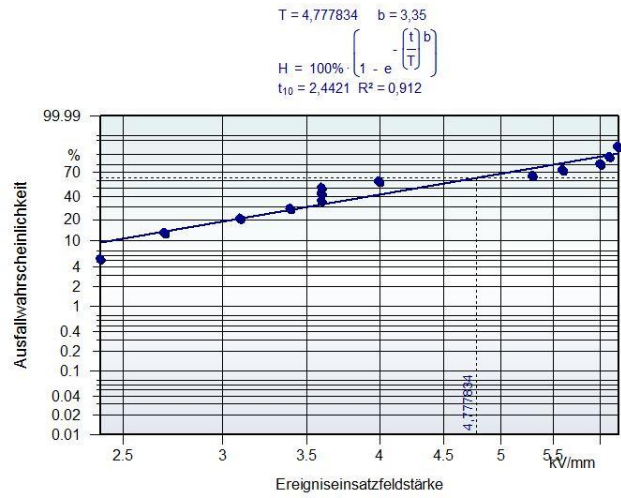
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.00

Abbildung 9-46 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe I

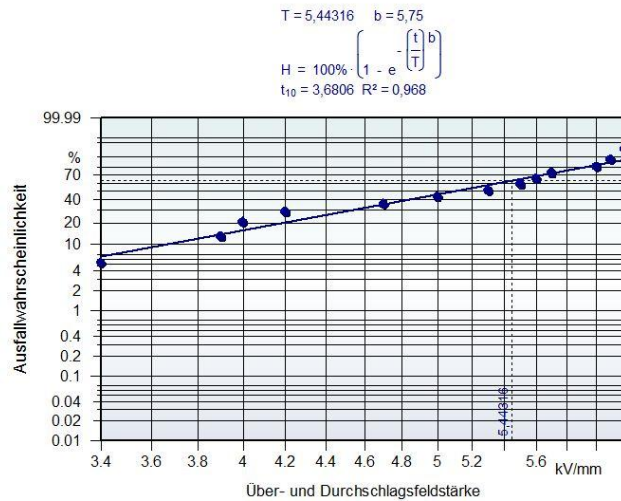
Messreihe J



Markus Bittner Weibullverteilung.vxd Seite 1 Visualizer 11.0293

Abbildung 9-47 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe J

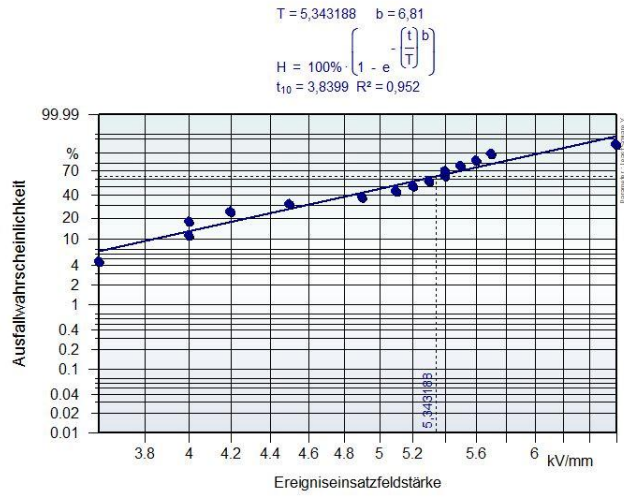
Messreihe J



Markus Bittner Weibullverteilung.vxd Seite 1 Visualizer 11.0293

Abbildung 9-48 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe J

Messreihe K



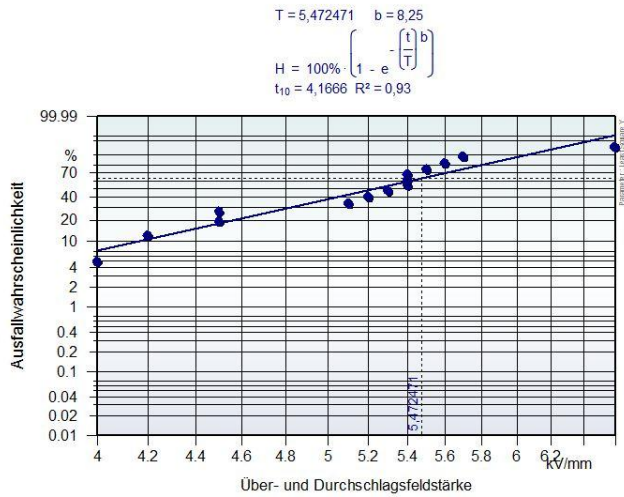
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.029

Abbildung 9-49 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe K

Messreihe K



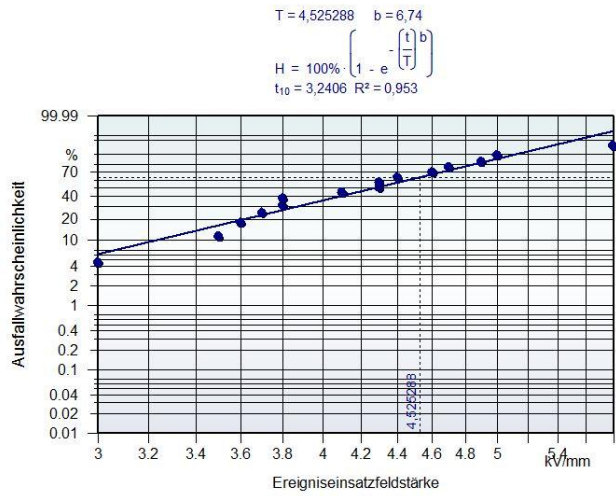
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visualizer 11.029

Abbildung 9-50 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe K

Messreihe K.1



Markus Bittner

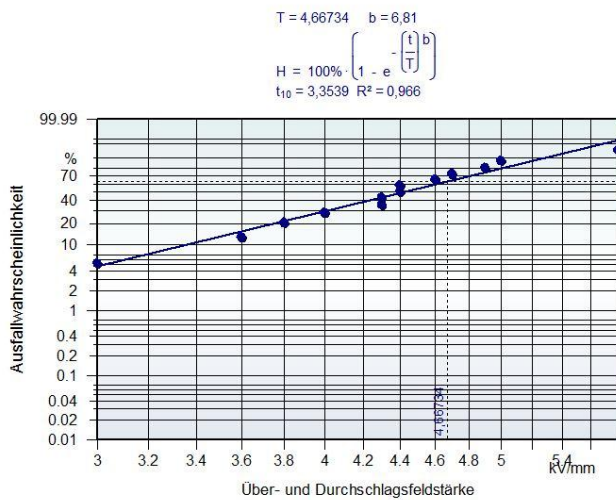
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

Vision/Date: 11.02.02

Abbildung 9-51 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe K.1

Messreihe K.1



Markus Bittner

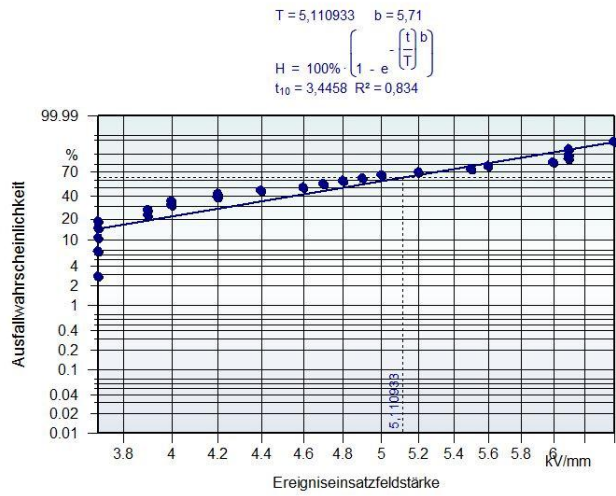
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

Vision/Date: 11.02.02

Abbildung 9-52 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe K.1

Messreihe RS A



Markus Bittner

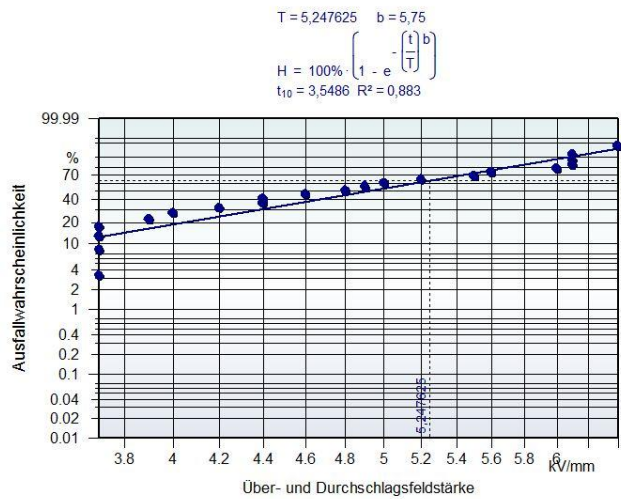
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

Visualizer 11.0206

Abbildung 9-53 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe RS A

Messreihe RS A



Markus Bittner

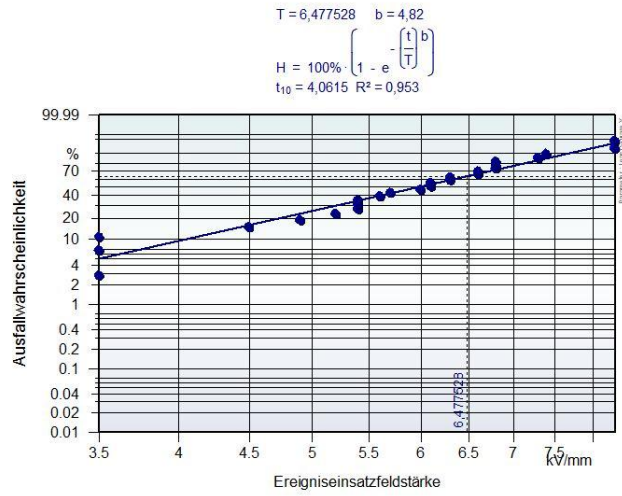
Weibullverteilung.vxdg

Seite 1

Visualizer 11.0206

Abbildung 9-54 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe RS A

Messreihe RS B



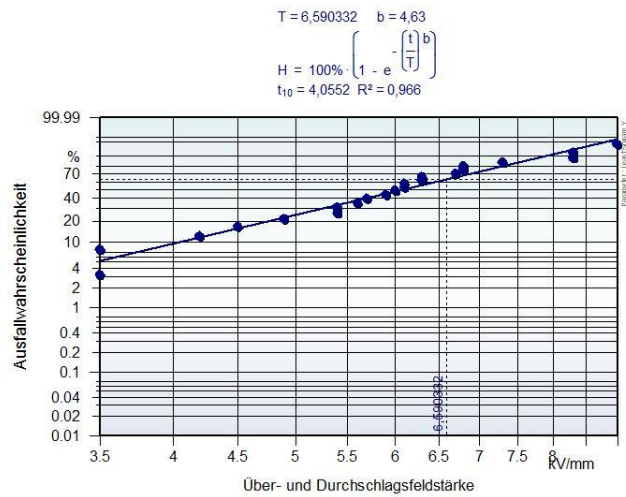
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

View: 0361: 11.028

Abbildung 9-55 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe RS B

Messreihe RS B



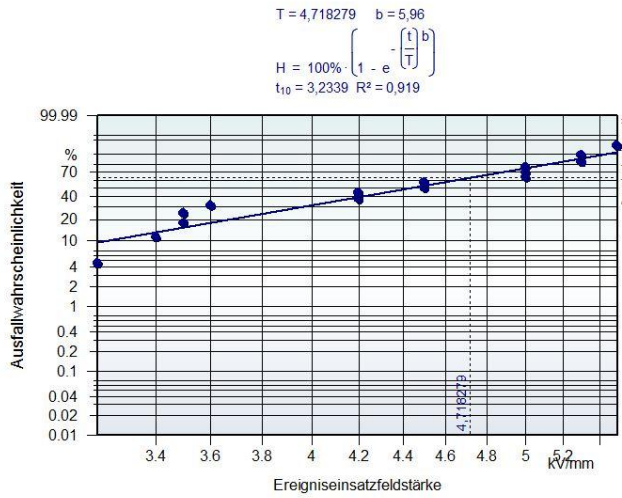
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

View: 0361: 11.028

Abbildung 9-56 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe RS B

Messreihe RS C



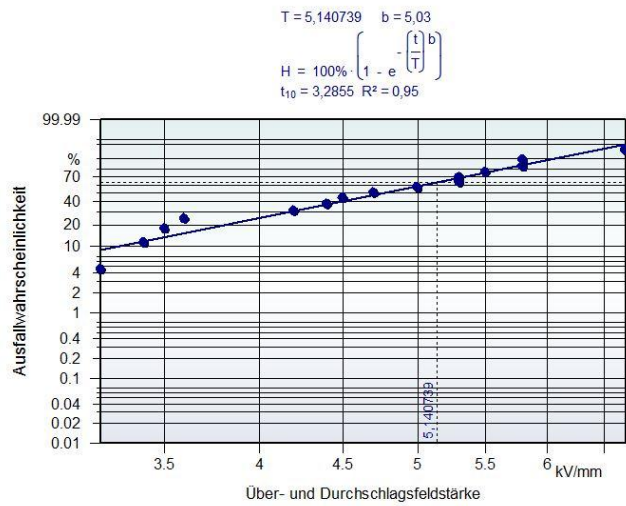
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

VisualSer:11.028

Abbildung 9-57 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe RS C

Messreihe RS C



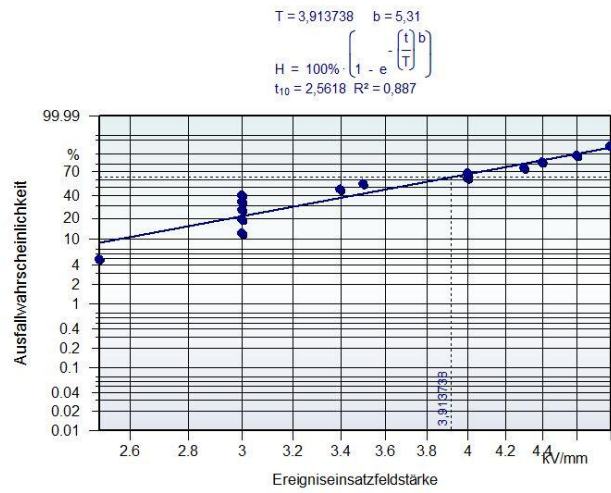
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

VisualSer:11.028

Abbildung 9-58 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe RS C

Messreihe RS D



Markus Bittner

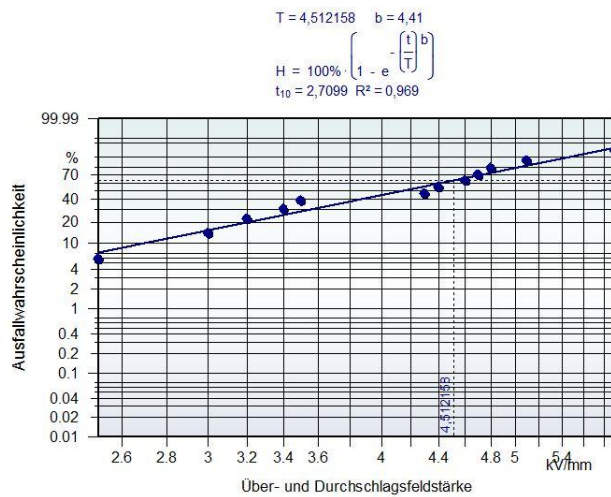
Weibullverteilung.vwg

Seite 1

VisionEditor 11.0292

Abbildung 9-59 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe RS D

Messreihe RS D



Markus Bittner

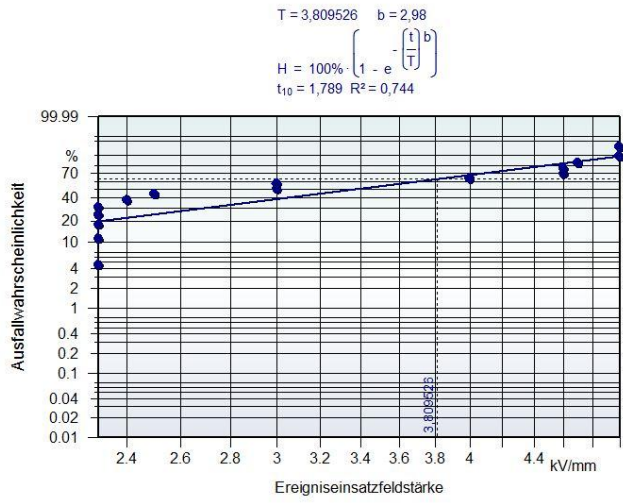
Weibullverteilung.vwg

Seite 1

VisionEditor 11.0292

Abbildung 9-60 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe RS D

Messreihe RS E



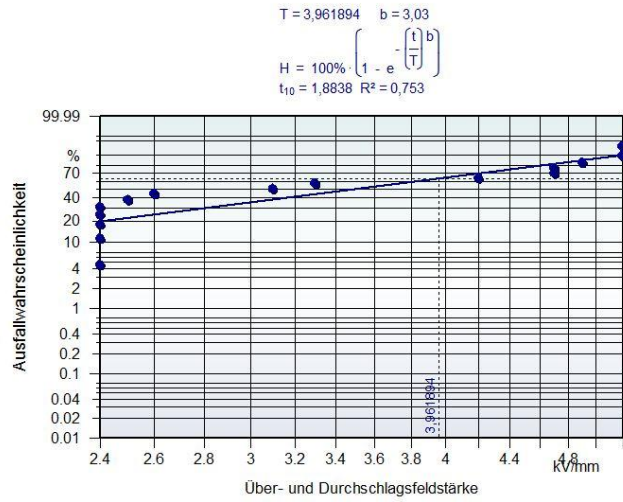
Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visual-DBE 11.0093

Abbildung 9-61 Weibullverteilung – Ereigniseinsatzfeldstärke Messreihe E

Messreihe RS E



Markus Bittner Weibullverteilung.vxd

Seite 1

Visual-DBE 11.0093

Abbildung 9-62 Weibullverteilung – Über- und Durchschlagsfeldstärke Messreihe RS E

9.10 Typenschilder

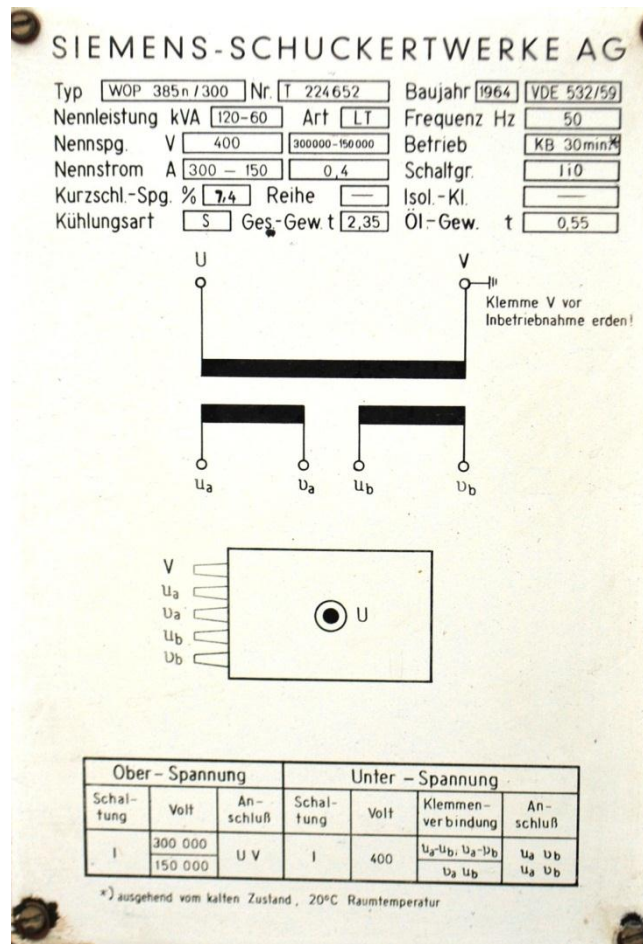


Abbildung 9-63 Typenschild vom Siemens 300 kV Prüftransformator

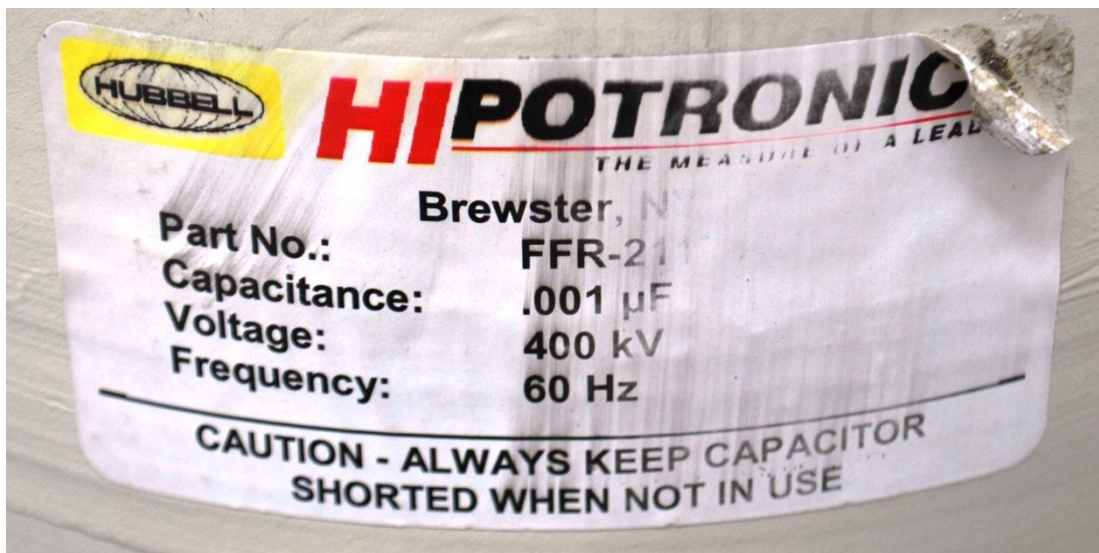


Abbildung 9-64 Typenschild vom Koppelkondensator der Firma Hipotronics

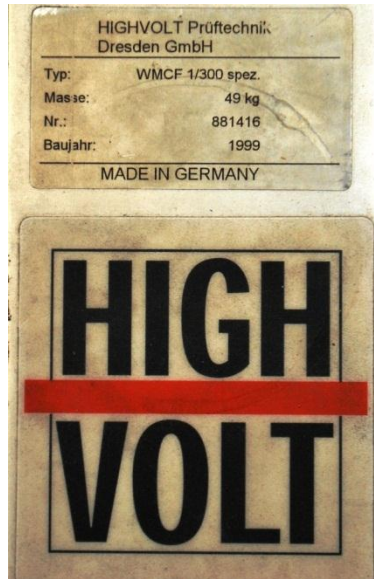


Abbildung 9-65 Typenschild vom Filterkondensator der Firma High Volt

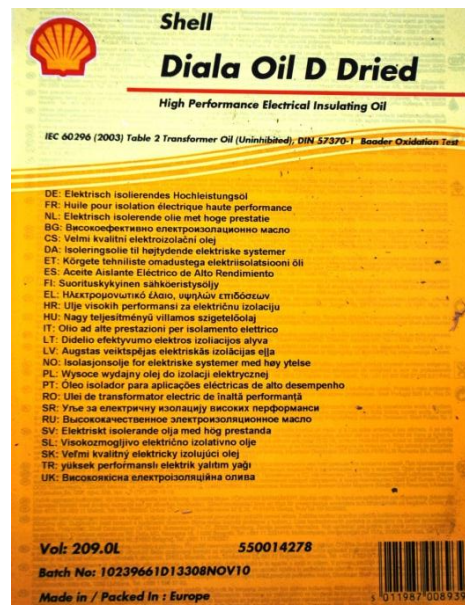


Abbildung 9-66 Typenschild vom Transformatoren-Öl Shell Diala Öl getrocknet

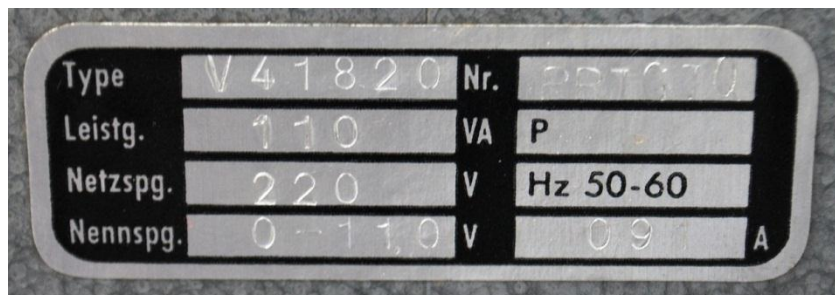


Abbildung 9-67 Typenschild vom Netz-Trenntransformator für dielektrische Untersuchung

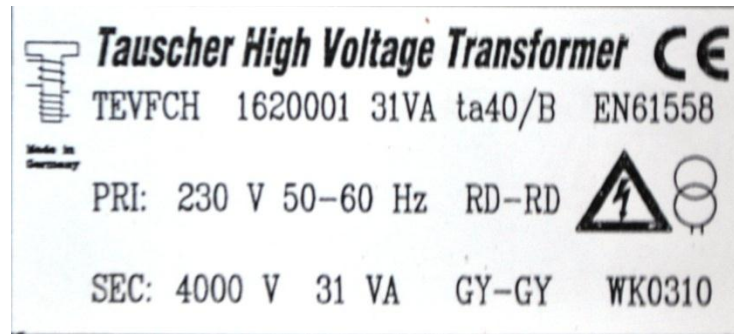


Abbildung 9-68 Typenschild vom Hochspannungstransformator der Firma Tauscher High Voltage Transformer für die dielektrische Untersuchung

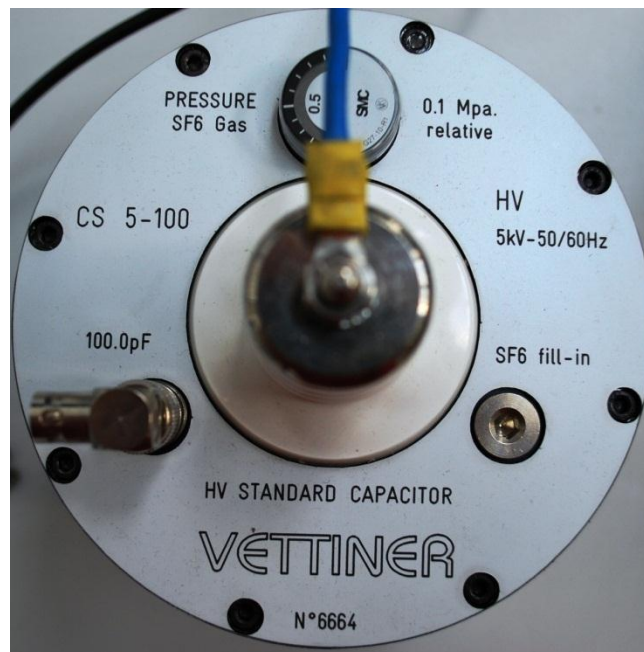


Abbildung 9-69 Typenschild vom Referenzkondensator der Firma VETTINER für die dielektrische Untersuchung

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Datum:

.....

(Unterschrift)