

Einfluss von Stützisolatoren auf die elektrische Festigkeit supraleitender flüssigstickstoffisolierter Hochspannungskabelsysteme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

André Schmid, M. Sc.

geboren in: Konstanz

Tag der mündlichen Prüfung: 13.04.2026
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christof Humpert



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0 DE):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde die elektrische Durch- und Überschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff (LN_2) in einphasigen und dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen experimentell sowie numerisch untersucht. Ziel war es, die dominierenden Einflussgrößen auf die elektrische Festigkeit zu identifizieren, empirische Vergrößerungsgesetze zu bewerten und daraus belastbare Designkriterien für dreiphasige supraleitende LN_2 -isolierte Hochspannungskabelsysteme und feldstärkeoptimierte Stützisolatoren abzuleiten.

Untersuchungen an einphasigen parallel-zylindrischen Leiteranordnungen unter Wechselspannungsbeanspruchung zeigen, dass der Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke bei kleinen Abständen stark vom Leiterelektroden-Durchmesser abhängt. Bei einem Abstand von 5 mm werden maximale Feldstärken von bis zu 26 kV/mm (8 mm Leiterelektrode) erreicht, während sich ab Abständen von 15 mm ein Festigkeitsplateau bei etwa 16 kV/mm einstellt. Der Einfluss des Durchmessers ist dabei ab Abständen von 10 mm vernachlässigbar. Die Auswertung über den Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor zeigt einen Anstieg der elektrischen Festigkeit bei zunehmender Feldhomogenität von ca. 0,65 bis 0,95, wobei größere Leiterelektroden-Durchmesser (bis 30 mm) höhere Ausnutzungsfaktoren und geringere Spannweiten aufweisen.

Die Auswertung der Ergebnisse nach dem Volumeneffekt ergibt Spitzendurchschlagfeldstärken von 16 bis 27 kV/mm bei einer 50 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit mit entscheidend belasteten Volumen von 600 bis 1.000 mm³. Unter Betrachtung des Flächeneffektes ergeben sich Spitzendurchschlagfeldstärken von 16 bis 28 kV/mm bei einer 63,2 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit mit entscheidend belasteter Fläche von 800 bis 3.300 mm². Im Vergleich zu den empirischen Formalismen fällt die elektrische Festigkeit im Mittel um ca. 33 % (Volumeneffekt) bzw. 35 % (Flächeneffekt) niedriger aus. Diese Abweichungen werden auf Messungen in offenen Behältnissen mit erhöhter Gasblasenbildung zurückgeführt.

Unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung werden in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen deutlich höhere elektrische Festigkeiten gemessen. Die maximale Blitzstoßdurchschlagfeldstärke liegt im Abstandsbereich von 5 bis 15 mm nahezu konstant zwischen 30 und 40 kV/mm und erreicht bei einem Abstand von 2,5 mm Werte von etwa 40 kV/mm für alle untersuchten Durchmesser. Das Verhältnis von positiver Blitzstoß- zu AC-Spitzendurchschlagfeldstärke beträgt dabei etwa das 1,5- bis 3-fache und ist auf den Zündverzug in Flüssigstickstoff zurückzuführen.

In zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen zeigt sich unter Wechselspannungsbeanspruchung ein ähnliches Verhalten, wie bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung. Bei einem Abstand von 5 mm erreicht die 8 mm Leiterelektrode maximale Spitzendurchschlagfeldstärken von bis zu 40 kV/mm, während größere Durchmesser bei etwa 25 kV/mm liegen. Ab einem Abstand von 15 mm verlaufen die Festigkeiten auf ein Plateau von rund 19 kV/mm. Insgesamt ist die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung inhomogener, was der größere Wertebereich des Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktors von 0,32 bis 0,88 zeigt. Die Auswertung nach Volumen- und Flächeneffekt zeigt eine bessere Übereinstimmung mit deren empirischen Formalismen mit einer jeweiligen mittleren Abweichung von nur noch etwa -20 %.

Die Blitzstoßfestigkeit zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen weist eine ausgeprägte Polari-tätsabhängigkeit auf. Unter positiver Stoßpolarität sinkt die elektrische Festigkeit von etwa 35 bis 50 kV/mm bei 5 mm Abstand auf ca. 22 bis 30 kV/mm bei 25 mm. Unter negativer Stoßpolarität

verbleibt die Festigkeit bis 15 mm nahezu konstant bei ca. 40 kV/mm und nimmt erst bei größeren Abständen auf etwa 22 kV/mm ab.

Untersuchungen von dünnen Isolierfolien und -papieren (Polyimid, Polypropylen laminiertes Papier, Kraftisolierpapier) zeigen bei einem Abstand von 5 mm maximale Spitzendurchschlagfeldstärken zwischen 20 und 39 kV/mm. Signifikante Verbesserungen gegenüber LN₂ mit ca. 24 kV/mm treten ausschließlich bei Kraftisolierpapier auf. Aufgrund hoher Standardabweichungen von bis zu $\pm 50\%$ kann jedoch keine systematische Material-Lagen-Abstands-Konfiguration identifiziert werden.

Überschlaguntersuchungen mit festen Isolierstoffen zeigen, dass Polyethylen (PE-HD) mit 9,40 kV/mm die höchste Überschlagfestigkeit aufweist, während glasfaserverstärkte Kunststoffe wie G11 eine Reduktion um bis zu 26 % auf 6,48 kV/mm zeigen. Kleine Spalte am Tripel-Punkt reduzieren die Überschlagfestigkeit um bis zu 18 % auf 7,69 kV/mm, Taillierungen um bis zu 16 % auf 7,83 kV/mm.

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurde eine feldstärkeoptimierte dreiphasige zylindrische Leiteranordnung numerisch ausgelegt. Bei einer Spitzenspannung von 176 kV ergeben sich maximale Spitzenfeldstärken von 23,0 kV/mm zwischen den Leiterelektroden und 26,5 kV/mm zur Rohrelektrode. Ein darauf abgestimmter dreiphasiger Stützisolator aus PE-HD reduziert diese Feldstärke auf 12,9 kV/mm bzw. 15,8 kV/mm bei einer Querschnittsflächenbedeckung von 33 %. Abschließende Hochspannungsversuche in einem LN₂-Badkryostaten mit bis zu 4 bar Überdruck zeigen, dass die mittlere effektive Durchschlagspannung unter Leiter-Erd-Beanspruchung bei etwa 110 bis 125 kV liegt und durch weitere Druckerhöhung nicht gesteigert werden kann. Damit wird bestätigt, dass der Flächeneffekt das dominante Vergrößerungsgesetz für LN₂ in zylindrischen Leiteranordnungen ist. Die Blitzstoßfestigkeiten erreichen +300 bis +420 kV sowie mehr als -600 kV.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass kompakte supraleitende Hochspannungskabelsysteme mit reinem Flüssigstickstoff als Isoliermedium für Anwendungen in der Mittelspannungsebene realisierbar sind. Durch feldstärkeoptimierte Leiteranordnungen und geometrisch angepasste Stützisolatoren kann die elektrische Festigkeit des Isoliersystems zuverlässig eingehalten werden.

Abstract

In this work, the electrical breakdown and flashover strength of liquid nitrogen (LN₂) in single-phase and three-phase cylindrical conductor arrangements was investigated experimentally and numerically. The objective was to identify the dominant parameters influencing electrical strength, to assess empirical enlargement laws, and to derive robust design criteria for three-phase superconducting LN₂-insulated high-voltage cable systems and field-optimized support insulators.

Investigations on single-phase parallel-cylindrical conductor arrangements under AC voltage stress show that the mean maximum peak breakdown field strength at small conductor distances strongly depends on the conductor electrode diameter. At a distance of 5 mm, maximum field strengths of up to 26 kV/mm are achieved for an 8 mm conductor electrode, whereas a breakdown strength plateau of approximately 16 kV/mm is reached at distances of 15 mm and above. The influence of the conductor diameter becomes negligible for distances exceeding 10 mm. Evaluation using the utilization factor indicates an increase in electrical strength with increasing field homogeneity from approximately 0.65 to 0.95, with larger conductor diameters (up to 30 mm) exhibiting higher utilization factors and smaller spreads.

Evaluation of the measured data according to the volume and area effects yields calculated peak breakdown field strengths between 16 and 27 kV/mm at a 50 %-breakdown probability within a decisive stressed volume of 600 to 1,000 mm³ for parallel cylindrical conductor arrangements. Compared to the empirical formalisms, the electrical strength is reduced on average by approximately 33 % for the volume effect and 35 % for the area effect. These deviations are attributed to measurements performed in open vessels, which promote increased gas bubble formation.

Under lightning impulse voltage stress, significantly higher electrical strengths are measured in parallel cylindrical conductor arrangements. The maximum lightning impulse breakdown field strength remains nearly constant between 30 and 40 kV/mm for distances from 5 to 15 mm and reaches approximately 40 kV/mm at a distance of 2.5 mm for all investigated conductor diameters. The ratio of positive lightning impulse to AC peak breakdown field strength ranges from approximately 1.5 to 3 and is attributed to the ignition delay in liquid nitrogen.

For centric-cylindrical conductor arrangements, a similar behavior under AC voltage stress is observed compared to the parallel-cylindrical arrangement. At a distance of 5 mm, the 8 mm conductor electrode reaches peak breakdown field strengths of up to 40 kV/mm, whereas larger diameters exhibit values of approximately 25 kV/mm. At distances of 15 mm and above, the breakdown strength converges to a plateau of about 19 kV/mm. Overall, the centric-cylindrical conductor arrangement is more inhomogeneous, as indicated by the broad range of the utilization factor from 0.32 to 0.88. Evaluation according to the volume and area effects shows a better agreement with the corresponding empirical formalisms, with mean deviations of only about -20 %.

The lightning impulse strength of centric-cylindrical conductor arrangements exhibits a pronounced polarity dependence. Under positive impulse polarity, the electrical strength decreases from approximately 35 to 50 kV/mm at a distance of 5 mm to about 22 to 30 kV/mm at 25 mm. Under negative impulse polarity, the electrical strength remains nearly constant at approximately 40 kV/mm up to a distance of 15 mm and decreases to about 22 kV/mm only at larger distances.

Investigations on thin insulating films and papers (PI, PPLP, KIP) show maximum peak breakdown field strengths between 20 and 39 kV/mm at a spacing of 5 mm. Significant improvements compared to LN₂ with approximately 24 kV/mm are observed mainly for kraft insulating paper. However, due to large standard deviations of up to $\pm 50\%$, no systematic material-layer-spacing configuration could be identified.

Flashover investigations with solid insulating materials reveal that polyethylene (PE-HD) exhibits the highest flashover strength with 9.40 kV/mm, whereas glass-fiber-reinforced materials such as G11 show a reduction of up to 26 % to 6.48 kV/mm. Small gaps at the triple point reduce the flashover strength by up to 18 % to 7.69 kV/mm, while waistings reduce it by up to 16 % to 7.83 kV/mm.

Based on the experimental results, a field-optimized three-phase cylindrical conductor arrangement was numerically designed. At a peak voltage of 176 kV, maximum peak electric field strengths of 23.0 kV/mm between the conductor electrodes and 26.5 kV/mm towards the surrounding tubular electrode are obtained. A corresponding three-phase PE-HD support insulator reduces these field strengths to 12.9 kV/mm and 15.8 kV/mm, respectively, at a cross-sectional area coverage of 33 %.

Final high-voltage tests conducted in an LN₂ bath cryostat at overpressures of up to 4 bar demonstrate that the mean effective breakdown voltage under conductor-to-ground stress lies between approximately 110 and 125 kV and cannot be further increased by higher pressure. This confirms that the area effect is the dominant enlargement law for LN₂ in cylindrical conductor arrangements. The lightning impulse strengths reach +300 to +420 kV under positive polarity and exceed -600 kV under negative polarity.

In summary, the results demonstrate that compact superconducting high-voltage cable systems using pure liquid nitrogen as the insulating medium are feasible for applications in the medium-voltage range. By employing field-optimized conductor arrangements and geometrically adapted support insulators, the electrical strength of the insulation system can be reliably maintained.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Supraleitende Hochspannungskabelsysteme.....	7
2.1.1 Hochtemperatursupraleiter-Kabelkonzepte.....	10
2.1.2 Historie supraleitender Hochspannungskabelsysteme	12
2.2 Elektrische Isolatoren	14
2.2.1 Zylinderisolatoren	15
2.2.2 Stützisolatoren	16
2.3 Elektrische Felder zylindrischer Leiteranordnungen	17
2.3.1 Analytische Berechnung zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen	18
2.3.2 Analytische Berechnung parallel-zylindrischer Leiteranordnungen	19
2.4 Elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff.....	20
2.5 Vergrößerungsgesetze	23
2.5.1 Volumeneffekt.....	24
2.5.2 Flächeneffekt.....	26
2.6 Elektrische Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff.....	27
3 Elektrische Festigkeit einphasiger Leiteranordnungen	36
3.1 Herleitung der Anordnungen zur Festigkeitsuntersuchung	36
3.2 Aufbau und Durchführung der Hochspannungsversuche.....	38
3.2.1 Versuchsplanung	38
3.2.2 Wechselspannungsmessung.....	40
3.2.3 Blitzstoßspannungsmessung	42
3.2.4 Leiterelektroden-Oberflächenkonditionierung.....	43
3.3 Festigkeit einphasiger parallel-zylindrischer Leiteranordnungen	47
3.3.1 AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff.....	49
3.3.2 AC-Durchschlagfestigkeit dünner Isolierfolien und -papiere.....	56
3.3.3 AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff	60
3.4 Festigkeit einphasiger zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen.....	70
3.4.1 AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff.....	73
3.4.2 AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben	79
4 Simulationen und Modellierung eines optimierten Stützisolators	83
4.1 Voraussetzungen und Randbedingungen des Simulationsmodells.....	83
4.2 Feldstärkeoptimierte Simulation der Leiteranordnung	85
4.3 Modellierung des optimierten Stützisolators mittels FEM-Simulationen.....	90
4.4 Designkriterien des optimierten Stützisolators.....	95

5 Elektrische Festigkeit dreiphasiger Leiteranordnungen	97
5.1 Konstruktion des Gesamtversuchsaufbaus	97
5.2 Versuchsdurchführung im Badkryostaten	99
5.3 Ergebnisse und Auswertung der Festigkeitsuntersuchung	102
5.3.1 Wechselspannungsfestigkeit der dreiphasigen Leiteranordnungen.....	102
5.3.2 Blitzstoßspannungsfestigkeit der dreiphasigen Leiteranordnungen	104
6 Zusammenfassung	107
Literaturverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis.....	xv
Anhang A	xviii
A.1 Bilder zur parallel-zylindrischen Leiteranordnung	xix
A.2 Bilder zur zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung	xxi
A.3 Bilder zu feststoffumwickelten Leiterelektroden	xxiii
A.4 Bilder zu den Überschlagproben	xxv
A.5 Fertigungsgenauigkeit der Überschlagproben	xxvi
A.6 Ablaufdiagramm zur Wechselspannungsmessung	xxviii
A.7 Ablaufdiagramm zur Blitzstoßspannungsmessung.....	xxix
Anhang B.....	xxx
B.1 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte PZL.....	xxxii
B.2 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte PZL	xxxiii
B.3 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte ZZL	xxxiii
B.4 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte ZZL	xxxiv
Anhang C.....	xxxv
C.1 Quellcode des Python-Programms	xxxvi
C.2 FEM-Berechnungen der elektrischen Feldverläufe	xliv
C.3 Stützisolatorbemaßung.....	xlvi
C.4 Bilder zum Stützisolator	xlvi
Anhang D	xlix
D.1 Fertigungsgenauigkeit der Leiteranordnungen 1 bis 3	l
D.2 Bilder zum Gesamtversuchsaufbau der Hauptuntersuchung	li
D.3 Bilder zum Einbau des Gesamtversuchsaufbaus	liii
D.4 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte der Hauptuntersuchungen.....	lv
D.5 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte der Hauptuntersuchungen	lvi

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die klassischen hierarchischen Netzstrukturen zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie sind in Deutschland in vier Ebenen unterteilt: Transportnetz, Übertragungsnetz, Mittelspannungsverteilnetz und Niederspannungsverteilnetz. Die höchste Übertragungswechselspannung U_m in den Transportnetzen beträgt 245 bis 420 kV und wird hauptsächlich mittels Freileitungen realisiert. Das Transportnetz (auch Höchstspannungsnetz genannt) umfasst ca. 35.000 km. Die darunter gelegene Netzebene nennt sich Übertragungs- und Verteilnetz (allg. auch Hochspannungsnetz) mit einer höchsten Übertragungswechselspannung U_m von 123 kV und einer Länge von ca. 96.000 km. Dem untergeordnet schließt sich das Mittelspannungsverteilnetz mit einer höchsten Übertragungswechselspannung U_m von bis zu 36 kV und einer Länge von ca. 500.000 km an. Die unterste Ebene stellt das Niederspannungsverteilnetz mit über 1.000.000 km und einer höchsten Übertragungswechselspannung U_m von bis zu 690 V dar. [1] [2] [3]

Elektrische Energieübertragung findet technologisch mittels Freileitungssystemen oder Kabelsystemen statt. Freileitungen kommen überall dort zum Einsatz, wo weite Übertragungsstrecken und hohe Übertragungsspannungen notwendig sind sowie baulicher Platzbedarf, sowohl in Höhe als auch Flurbreite, eine untergeordnete Rolle spielt. Freileitungen erreichen unter dem Einsatz von Wechselspannung Längen von ca. 400 km [4].

Kabelsysteme hingegen werden überall dort eingesetzt, wo möglichst kompakt elektrische Energie übertragen werden muss, da der Bauraum in der Höhe und Flurbreite stark begrenzt ist. Jedoch werden Kabelsysteme komplett unterirdisch verlegt, was zusätzliche Tiefbauarbeiten und -kosten bedingt. Energiekabel erreichen Längen von ca. 30 km bevor Kompensationseinrichtungen notwendig werden [4].

Wann welche Technologie zum Einsatz kommt, hängt von individuellen Umständen ab. Jedoch gilt grundsätzlich, dass – der hierarchischen Netzstruktur folgend – im Transportnetz hauptsächlich Freileitungen eingesetzt werden. Mit zunehmend niedrigerer Netzebene steigt jedoch der Anteil an Energiekabeln, bis im Niederspannungsverteilnetz fasst nur noch Energiekabel eingesetzt werden. Insgesamt beträgt der Anteil von Kabelsystemen im deutschen Stromnetz, über alle Spannungsebenen hinweg betrachtet, ca. 82 % [4] [5].

Die hier beschriebenen klassisch hierarchischen Netzstrukturen und Spannungsebenen haben in den letzten Jahrzehnten mehr Flexibilität erfahren. Das hat zum einen mit dem Fortschritt der Hochspannungsgleichstrom-Übertragungstechnik (kurz: HGÜ) zu tun, welche es bei geringerer Gleichspannung erlaubt, im Vergleich zu Wechselspannung, effizienter elektrische Energie über große Distanzen zu übertragen. Zum anderen zeichnet sich gesellschaftlich eine geringere Akzeptanz beim Ausbau des elektrischen Energienetzes mittels Freileitungen ab, sodass trotz wirtschaftlicher Vorteile von Freileitungen, Energiekabel mit einer bipolaren Übertragungsgleichspannung von bis zu ± 525 kV als Technologie im Transportnetz gesetzlich zu bevorzugen sind [6]. Eine Besonderheit bei der Aufteilung der vier Netzstruktur- und den zugehörigen Wechselspannungsebenen stellen die städtischen Verteilnetze dar. Diese werden von Verteilnetzbetreibern (kurz: VNB) betrieben und als 123 kV Hochspannungskabelsysteme ausgeführt. Mit steigendem Bedarf an elektrischer Energie in innerstädtischen Gebieten, insbesondere im Hinblick auf

die Wärme- und Mobilitätswende, müssen die bestehenden Stromnetze an die erforderliche Leistungserhöhung angepasst werden [7]. Die Installation neuer Kabelstrecken ist nicht ohne bauliche Eingriffe in die städtische Infrastruktur möglich. Gleichzeitig steigen die Erneuerungsbedarfe in den 123 kV Bestandsverteilnetzen aufgrund der Altersstruktur bestehender Kabelsysteme. Die Anpassung des innerstädtischen 123 kV Netzes auf erhöhte Leistungsbedarfe stellt eine besondere Herausforderung dar, da mit der heutigen Kabeltechnologie für einen höheren Leistungsbedarf Trassen mit einem deutlich größeren Platzbedarf notwendig sind.

Derzeit sind in vielen deutschen Großstädten zu einem großen Teil sog. 123 kV Gasdruckkabel im Einsatz, die bis in die 1990er Jahre installiert wurden. Bei diesen wird die erforderliche Spannungsfestigkeit durch die Imprägnierung der papierisolierten Phasenleiter mit einem synthetischen Öl hoher Viskosität erreicht. Die effektive elektrische Feldstärke (auch Designfeldstärke genannt) auf der Oberfläche der Phasenleiter beträgt, bei einer Leiter-Erd-Spannung von 64 kV, maximal 9,5 kV/mm. Diese variiert nach Typ und übertragener Scheinleistung (65 – 115 MVA) sowie Leiterquerschnitt (185 – 800 mm²) bzw. Übertragungsstrom (340 – 605 A) und kann bis auf 8,8 kV/mm abnehmen [8]. Im Betrieb befinden sich die drei Phasenleiter als Bündel in einem Stahlrohr, das mit Stickstoffgas mit einem Druck zwischen 15 und 16 bar gefüllt ist. Der Innenrohrdurchmesser variiert ebenfalls in Abhängigkeit der Übertragungsleistung von 125 bis 160 mm. Der Gasdruck sorgt dafür, dass beim Aufheizen und Abkühlen des Kabels keine Hohlräume in der Öl-Papier-Isolierung entstehen [8] [9]. Dieser Kabeltyp wird jedoch nicht mehr hergestellt und auch Ersatzteile sind praktisch nicht mehr erhältlich. Aus diesem Grund wird auch nach neuen Hochspannungskabeltechnologien gesucht.

Seit den 1990er Jahren wird auf die Technologie der Hochspannungskunststoffkabel aus vernetztem Polyethylen (kurz: VPE) umgestellt. Diese nutzen die vorhandenen Druckrohre der Gasdruckkabel. Damit sie in die Druckrohre passen, wurden spezielle VPE-Stadtkabel konstruiert, deren Isolierwandstärke gegenüber vergleichbaren konventionellen VPE-Kabeln reduziert wurde. Die geringere Isolierwandstärke führt bei gleicher Leiter-Erd-Spannung von 64 kV zu einer Erhöhung der effektiven Designfeldstärke auf 8 bis 9,8 kV/mm. Zum Vergleich fällt die effektive Designfeldstärke bei konventionellen VPE-isolierten Kabeltypen (bspw. Normtyp N(A)2XS(FL)2Y) mit 5,3 bis 7,3 kV/mm mitunter deutlich geringer aus. VPE-Stadtkabel sind insbesondere wegen der geringeren Verluste, der höheren möglichen Betriebstemperaturen und des geringeren Wartungsaufwands gut geeignet, Gasdruckkabel zu ersetzen. Sie haben aber bei gleicher geometrischer Abmessung keine signifikant höhere Übertragungskapazität im Vergleich zu Gasdruckkabeln und stellen somit keine leistungssteigernde Alternative dar [8]. Der Einsatz von Standard-VPE-Kabeln mit höherer Übertragungsleistung kann nur außerhalb der bestehenden Rohre erfolgen und ist innerstädtisch, aufgrund der schwierigen Platzsituation und den längeren Realisierungszeiten, schwierig bis gar nicht umsetzbar [10].

Da zukünftig ein höherer Bedarf an elektrischer Energie im städtischen Bereich erwartet wird, kann der Einsatz von supraleitenden Hochspannungskabelsystemen, die in die vorhandenen Stahlrohre eingezogen werden können, eine geeignete Alternative darstellen [7].

Die Systeme bestehen aus mehreren elektrisch feststoffisolierten und geschirmten einzelnen Phasenleitern, die sich zusammen in einem umgebenden geerdeten metallischen Rohrkryostaten befinden. Der Rohrkryostat hat die Hauptaufgabe die aus Supraleitern bestehenden Phasenleiter thermisch zu isolieren, damit der zu Kühlzwecken eingesetzte flüssige Stickstoff (kurz: LN₂) nicht verdampft.

Ein neuer Ansatz für geometrisch kompakte supraleitende Hochspannungskabelsysteme (Abb. 1.1) für innerstädtische Verteilnetze, der im BMWK-geförderten Forschungsprojekt *HighAmp* erforscht und entwickelt wird, ist die Verwendung von Flüssigstickstoff nicht nur zu Kühlzwecken, sondern auch als elektrisches Isoliermedium zu nutzen [11].

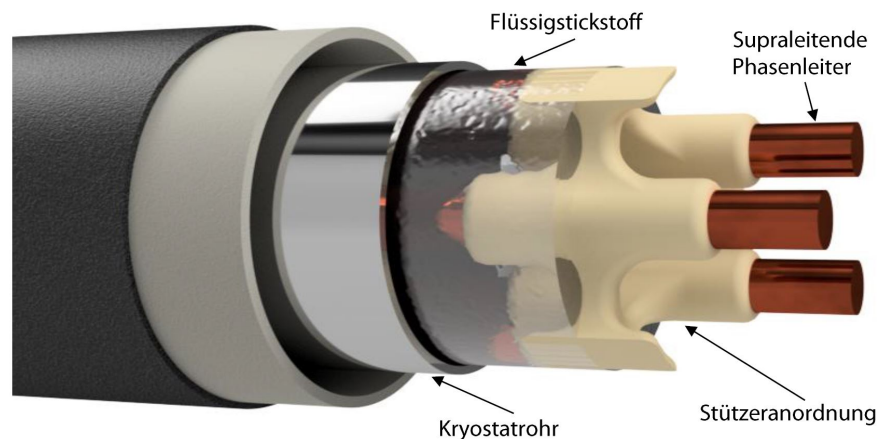


Abbildung 1.1: Modell eines möglichen LN₂-isolierten dreiphasigen supraleitenden Hochspannungskabelsystems. [11]

Das bedeutet, dass die Isolierung nicht oder nur partiell aus einem festen Isoliermaterial besteht sondern maßgeblich aus Flüssigstickstoff, der unter Druck durch das Kabelsystem fließt. Die Vorteile dieses Ansatzes wären Kosteneinsparungen durch den Wegfall eines wesentlichen Teils der Feststoffisolierung sowie die daraus resultierende Vereinfachung und ggfs. geometrische Komprimierung der Gesamtanordnung. Darüber hinaus ermöglicht der größere LN₂-Strömungsquerschnitt eine bessere Kühlung der supraleitenden Phasenleiter, da der Druckabfall geringer und das LN₂-Volumen größer ist.

Aufgrund des Wegfalls einer elektrischen Feststoffisolierung ist die Entwicklung eines dreiphasigen Stützisolators (Abb. 1.2) von substanzieller Bedeutung, da dieser einen konstanten Abstand der drei supraleitenden Phasenleiter gewährleisten muss. Zugleich darf das geometrische Design und die materiellen Eigenschaften eines Stützisolators keinen nennenswerten Einfluss auf die Strömungseigenschaften sowie die elektrische Festigkeit des umgebenden Flüssigstickstoff nehmen. Das supraleitende Hochspannungskabelsystem fällt somit geometrisch, für den Einsatz in innerstädtischen 123 kV Wechselspannungsverteilsystemen, so kompakt wie möglich aus.

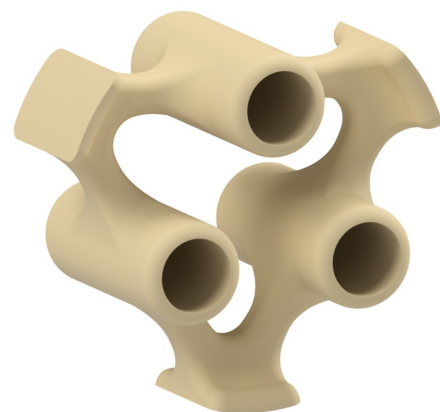


Abbildung 1.2: Modell einer möglichen feldstärkeoptimierten dreiphasigen Stützisolators. [11]

1.2 Ziel der Arbeit

Zur Entwicklung neuer kompakter supraleitender Hochspannungskabelsysteme für das Wechselspannungsverteilsystem, die nur mit Flüssigstickstoff isoliert werden, muss zuvor eine grundlegende experimentelle Forschung durchgeführt werden. Das gilt besonders für die elektrischen Festigkeitseigenschaften derartiger Phasenleiteranordnungen und Stützisolatoren in Flüssigstickstoff. Bei der Phasenleiteranordnung handelt es sich um eine Kombination aus parallel-zylindrischer und zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen, deren elektrische Festigkeit speziell in Isoliergasen bereits ausführlich untersucht wurde. Jedoch unterscheiden sich die elektrischen Festigkeitseigenschaften von Isoliergasen im Vergleich zu einer Isolierflüssigkeit wie Flüssigstickstoff. Dieser hat eine wesentlich höhere elektrische Festigkeit, die mit der elektrischen Festigkeit von Isolieröl vergleichbar ist. [12]

Bei der elektrischen Festigkeit muss zudem berücksichtigt werden, dass diese durch weitere Einflüsse reduziert wird. Elektrische Festigkeitswerte werden oft an herunterskalierten Prüfanordnungen in Laborumgebungen ermittelt. Werden daraufhin die elektrischen Isoliersysteme auf Anwendungsgröße skaliert, so fällt diese elektrische Festigkeit geringer aus. Diese Skalierungseffekte fallen unter die sogenannten Vergrößerungsgesetze und sind ebenfalls für flüssigen Stickstoff zu berücksichtigen.

Eine weitere Beeinträchtigung der elektrischen Festigkeit könnte durch den dreiphasigen Stützisolator erfolgen, welcher die Phasenleiter zueinander und diese zum umgebenden metallischen Rohrkryostaten auf konstanten Abstand hält. Durch den Stützisolator kann es über dessen Oberfläche zu elektrischen Entladungen kommen. Diese entstehen an Übergangsbereichen von Isoliermedien verschiedener relativer Permittivität an einem elektrischen Leiter. Der Ort des Zusammentreffens wird auch als *Tripel-Punkt* bezeichnet. In diesem kommt es zur Erhöhung der tangentialen elektrischen Feldstärkekomponente im Bereich der geringeren relativen Permittivität. Zudem führen mikroskopische Unebenheiten auf der Oberfläche des Stützisolators zu einer weiteren Erhöhung der tangentialen elektrischen Feldstärkekomponente.

Je nach Homogenitätsgrad der Leiter-Stützisolator-Anordnung führt die erhöhte tangentialen Feldstärkekomponente entweder direkt zum Überschlag entlang der Grenzfläche zwischen Stützisolator und Flüssigstickstoff oder zum Einsatz von oberflächlichen Vorentladungen, beginnend im Tripel-Punkt. Die durch die Vorentladungen entstehenden Ladungsträger führen zunächst zur Ladungsträgerproduktion am festen Isoliermaterial des Stützisolators sowie zur eventuellen Blasenbildung im flüssigen Isoliermedium und begünstigen damit die Entstehung eines zeitlich verzögerten Überschlags entlang der Grenzfläche. Demnach ist es für die elektrische Festigkeit der Gesamtanordnung von entscheidender Bedeutung, dass in einer derartigen Anordnung die tangentialen Feldstärkekomponente so gering wie möglich ausfällt. Dies kann einerseits durch eine gezielte Auswahl der geometrischen Eigenschaften der Leiteranordnung positiv beeinflusst werden. Andererseits kann auch die Auswahl des verwendeten festen Isoliermaterials des Stützisolators sowie dessen geometrische Eigenschaften entscheidenden Einfluss auf die elektrische Festigkeit nehmen, da die Belastung im Tripel-Punkt vom Verhältnis der gewählten Permittivitäten (Isolierstoff zu LN_2) abhängt. [13] [14] [15]

Allgemein liefert der aktuelle Stand der Forschung viele Lösungsansätze, um den geometrischen Einfluss von Stützisolatoren auf die elektrische Feldverteilung möglichst gering zu halten (Abschn. 2.2). Dies gilt jedoch nicht für dreiphasige zylindrische Leiter-Stützisolator-Anordnungen

in geerdeten Rohrkryostaten, bei denen sowohl die Leiter-Leiter- als auch Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung mittels Flüssigstickstoff isoliert und zudem noch ein genügend großer LN_2 -Massenstrom über die Querschnittsfläche zu Verfügung stehen soll. Um den hohen Anforderungen an einen dreiphasigen Stützisolator gerecht zu werden und die maximale elektrische Gesamtfestigkeit in Flüssigstickstoff zu erreichen, sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Diese sollen das elektrische Durch- und Überschlagverhalten von dreiphasigen zylindrischen Leiter-Stützisolator-Anordnungen in geerdeten Rohren, in Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften, untersuchen.

Folgende Ziele werden in dieser Dissertation definiert:

1. Die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in einphasigen parallel-zylindrischen und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen ist ermittelt.
2. Die Beeinflussung der elektrischen Durch- und Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff durch geometrische und materielle Eigenschaften von Stützisolatoren ist bekannt.
3. Designkriterien zur Auslegung dreiphasiger zylindrischer Leiteranordnungen und Stützisolatoren in Flüssigstickstoff sind definiert.
4. Eine feldstärkeoptimierte dreiphasige zylindrische Leiteranordnung samt Stützisolator ist numerisch entwickelt und experimentell untersucht.

Um Designkriterien für die Auslegung und den sicheren Betrieb neuartiger supraleitender Hochspannungskabelsysteme zu entwickeln, wird zu Beginn die grundlegende Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit vom Homogenitätsgrad parallel-zylindrischer und zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff untersucht. Dazu wird in offenen Behältnissen bei Umgebungsdruck und Siedetemperatur die elektrische Wechsel- und Blitzstoßspannungsfestigkeit (kurz: AC und LI) von Flüssigstickstoff in einphasigen parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen mit verschiedenen Leiterelektroden-Durchmessern und -abständen untersucht. Die Ergebnisse werden nach den bekannten empirischen Formalismen zu den festigkeitsbeeinflussenden Vergrößerungsgesetzen, wie Volumen- und Flächeneffekt, ausgewertet und eingeordnet, um eine Aussage über deren Gültigkeit für die elektrische Wechselspannungsfestigkeit von parallel-zylindrischen und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff zu erhalten. Das ermöglicht gleichzeitig die Anwendung der empirischen Formalismen zur späteren Auslegung ausgedehnter dreiphasiger LN_2 -isolierter zylindrischer Leiteranordnungen. Ferner wird untersucht, inwieweit zusätzlich aufgebrauchte dünne Feststoffisolierungen unterschiedlicher Materialien und Lagenanzahlen die elektrische Durchschlagfestigkeit unter Wechselspannungsbeanspruchung beeinflussen.

Um den Einfluss des Stützisolators auf die elektrische Wechselspannungsfestigkeit zu untersuchen, werden verschiedene Modellgeometrien – sogenannte Überschlagproben – entwickelt. Zum einen wird der materielle Einfluss untersucht, indem die selbe Überschlagprobe aus Materialien verschiedener relativer Permittivitäten von etwa 2 bis 5 hergestellt wird. Zum anderen werden verschiedene Überschlagproben aus einem Material gefertigt, um einflussnehmende geometrische Eigenschaften zu untersuchen. Diese werden dann in den zuvor beschriebenen Versuchsaufbauten eingebracht und wiederholt Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Dadurch wird die Erkenntnis gewonnen, wie materielle und geometrische Eigenschaften, in Relation

zu den Leiteranordnungen ohne Überschlagproben, einen Einfluss auf die elektrische Festigkeit nehmen. Darüber hinaus werden dadurch, für das weitere Vorgehen, die allgemeinen geometrischen Designkriterien zur feldstärkeoptimierten elektrischen Auslegung von dreiphasigen LN_2 -isolierten zylindrischen Leiteranordnungen mit Stützisolatoren in geerdeten Rohrkryostaten ermittelt.

Anhand der geometrischen Designkriterien und Erkenntnisse zur elektrischen Festigkeit wird mittels iterativer numerischer Berechnungen eine ausgedehnte feldstärkeoptimierte dreiphasige zylindrische Leiteranordnung mit Stützisolator in geerdeten Rohrkryostaten simuliert und abschließend hergestellt. Diese wird experimentell in einem geschlossenen LN_2 -Badkryostaten unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung auf die elektrische Gesamtfestigkeit, in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, untersucht. Somit erlaubt das abschließende Experiment eine finale Evaluierung der gewählten elektrischen Festigkeiten, der angewandten Vergrößerungsgesetze sowie der definierten geometrischen Designkriterien, die zur Auslegung der dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung mit Stützisolator in geerdeten Rohrkryostaten gewählt wurden.

Anhand der Ergebnisse aus den zuvor beschriebenen Zielen liefert diese Dissertation allgemeingültige Erkenntnisse über das elektrische Einflussverhalten von Leiter-Stützisolator-Anordnungen auf die elektrische Gesamtfestigkeit von Flüssigstickstoff in dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen, die sich in geerdeten Rohrkryostaten befinden. Zudem werden allgemeingültige Designkriterien zur feldstärkeoptimierten Auslegung von dreiphasigen Stützisolatoren für LN_2 -isolierte supraleitende Hochspannungskabelsysteme unter Wechselspannungsbeanspruchungen definiert.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden zunächst die technisch-konstruktiven Eigenschaften supraleitender Hochspannungskabelsysteme sowie eine Übersicht über bisherige Kabelprojekte dargestellt. Anschließend wird aufgezeigt, welche Arten von zylindrischen Isolatoren in energietechnischen Systemen eingesetzt werden. Des Weiteren werden dazu die mathematischen Grundlagen, zur Bestimmung der elektrischen Felder zylindrischer Anordnungen, dargestellt. Daraufhin folgt eine Erläuterung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff sowie dessen Beeinflussung durch die Vergrößerungsgesetze. Abschließend werden die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den Überschlageseigenschaften von Stützisolatoren in Flüssigstickstoff erörtert.

2.1 Supraleitende Hochspannungskabelsysteme

Die Vorteile supraleitender Hochspannungskabelsysteme sind, dass sie bereits bei gleicher Übertragungsspannung und höherer Übertragungsleistung geometrisch kompakter oder bei geringerer Übertragungsspannung und gleicher Übertragungsleistung wesentlich kleiner ausfallen. Eine reduzierte Übertragungsspannung hat zudem den Vorteil, dass die zugehörige Primärtechnik kleiner, weniger komplex und somit kostengünstiger werden kann. Weiterhin existiert durch die thermische Isolierung keine Wärmeentwicklung nach außen, sodass keine Austrocknung des umgebenden Erdreichs entsteht und Trassen mit mehreren Kabelsystemen wesentlich kompakter ausfallen. Durch eine wahlweise supraleitende Schirmung wird zudem jegliche elektromagnetische Belastung der Umwelt vermieden. [16]

Die wesentlichen Komponenten eines supraleitenden Hochspannungskabelsystems sind aus HTS-Bandleitern (HTS = High Temperature Superconductor; z. Dt.: Hochtemperatursupraleiter) aufgebaute HTS-Phasenleiter, das elektrische Isoliersystem, die elektromagnetische Schirmung und der umgebende Rohrkryostat zur Führung und thermischen Isolierung des flüssigen Stickstoffs [17].

Hochtemperatursupraleiter-Bandleiter

Bei Kabelsystemen wird der sogenannte HTS-Bandleiter als geläufigste Grundform supraleitender Materialien eingesetzt. Das HTS-Material besteht hierbei aus REBCO (engl.: Rare Earth Barium Copper Oxide).

Im Gegensatz zu Tieftemperatursupraleitern (engl.: LTS = Low Temperature Superconductor) sind die Sprungtemperaturen von HTS-Materialien höher und oberhalb der Siedetemperatur von Flüssigstickstoff (bei ca. 1 bar / 77 K). Dieser Umstand führt auch erst zu einer gewissen energietechnischen Wirtschaftlichkeit, da sowohl der allgemeine Kühlprozess als auch der flüssige Stickstoff verhältnismäßig kostengünstig ausfallen.

Ein HTS-Bandleiter aus REBCO besitzt eine Breite von bis zu 12 mm bei einer Dicke, je nach Stromtragfähigkeit, von 0,1 bis 0,2 mm. Er besteht dabei aus einer dünnen Schichtung mehrerer verschiedener Substrate (Abb. 2.1). Die HTS-Schicht alleine bemisst nur eine Dicke von ca. einem Mikrometer. Diese wird zu Stabilisierungszwecken mit einer dünnen Deckschicht, zumeist Silber, beschichtet, welche den Supraleiter thermisch und elektrisch stabilisiert. Sie kann zu weiteren Stabilisierungszwecken um eine zusätzliche Kupferlegierung ergänzt werden. Die dünne Pufferschicht unter dem Supraleiter dient dazu, eine möglichst homogene Textur der HTS-Schicht

zu erzielen und diese gegen chemische Wechselwirkungsprozesse mit der Substratschicht zu schützen. Die Trägerschicht, meist aus einer Nickel-Chrom-Molybdän-Legierung bestehend und unter dem Markennamen *Hastelloy* bekannt, dient als Basisschicht zur Herstellung des HTS-Bandleiters und schützt diese vor übermäßigen mechanischen Beanspruchungen. [18]

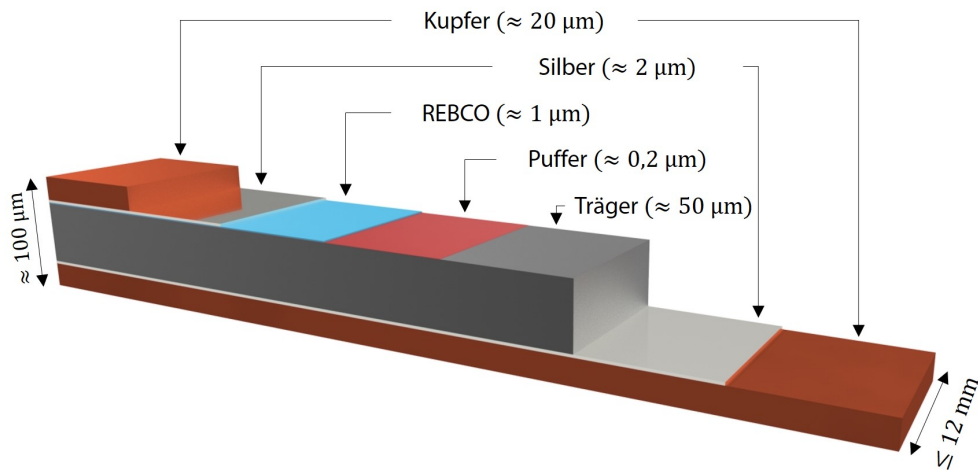


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines REBCO-Bandleiters. Maßstab X / Z-Achse: 1:1; Y-Achse: 100:1. (modifiziert nach [19])

Durch die Stapelung mehrerer Bandleiter neben- und übereinander wird die einfachste Art eines HTS-Phasenleiters, der sogenannte gestapelte Phasenleiter, realisiert.

Hochtemperatursupraleiter-Phasenleiter

Mit den Jahren haben sich, neben gestapelten HTS-Phasenleitern, weitere alternative Leiterkonzepte für energietechnische Anwendungen etabliert. Dabei wurden supraleitende Phasenleiteraufbauten basierend auf HTS-Bandleitern, wie bspw. der CORC / CORT-, Roebel- und CroCo-Phasenleiter entwickelt [20] [21].

Beim CORC / CORT-Leiter (engl.: Cable on Round Core / Tube) werden supraleitende Bandleiter mehrlagig auf ein Tragrohr aufgewickelt und zu einem sehr flexiblen und mechanisch robusten Leiteraufbau zusammengesetzt.

Der Roebel-Leiter aus Kupfer kommt seit Ende des 19. Jahrhunderts zum Einsatz und zeichnet sich als sehr kompakter Aufbau aus. Seine zueinander mäanderförmig ausgestanzten Leiterstäbe sorgen dafür, dass die wechselstrombedingten Verluste sehr gering ausfallen. Diese Vorteile werden ebenfalls in der Supraleitung genutzt, um aus supraleitenden Bandleitern verlustarme und kompakte Leiteraufbauten für hohe Stromdichten herzustellen [21].

Beim CroCo-Leiter (engl.: Cross Conductor) wird mittels der unterschiedlich breiten gestapelten HTS-Bandleiter der größtmögliche geometrische Füllfaktor einer beliebigen geometrischen Form (bspw. eines Kreises) ausgenutzt und in eine Zinnmatrix eingegossen. Dadurch können in einem einfachen Herstellungsprozess lange Leiterlängen beliebiger geometrischer Abmessungen eines HTS-Phasenleiters hergestellt werden. [20]

Elektrisches Isoliersystem

Das elektrische Isoliersystem supraleitender Hochspannungskabelsysteme besteht aus aufgewickelten dünnen Isolierstoffen (Abb. 2.2 links), wie bspw. einem einfachen Kraftisolierpapier oder Verbundmaterialien, wie mit Polypropylen laminiertes Papier (kurz: PPLP; Abb. 2.2 rechts).

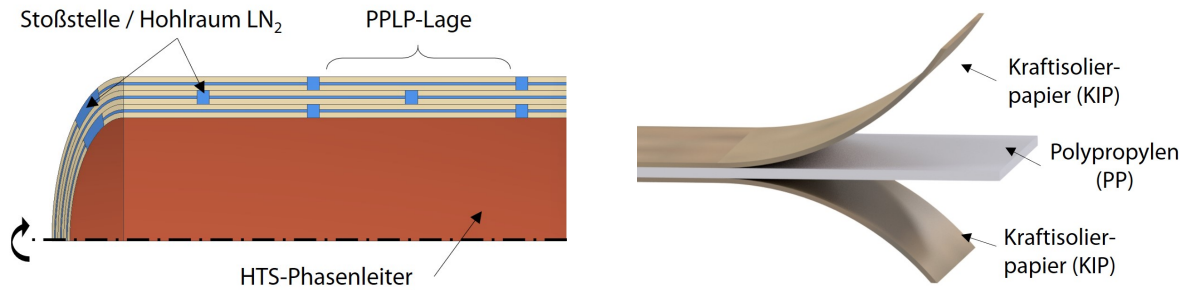


Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung von PPLP als idealisierte umwickelte Isolierung eines Phasenleiters (links) und vom Lagenaufbau von PPLP (rechts). (modifiziert nach [22])

Das PPLP besitzt im Inneren eine Schicht aus Polypropylen, die sich zwischen zwei äußeren Schichten Kraftisolierpapier befindet. Durch das Aufwickeln wird ermöglicht, dass Flüssigstickstoff die Isolierung durchdringen kann, was die Kühlung des supraleitenden Phasenleiters verbessert. Des Weiteren werden Hohlräume an Stoßstellen mit Flüssigstickstoff gefüllt. Die Tränkung des (porösen) Kraftisolierpapiers mit Flüssigstickstoff führt zu einer Imprägnierung und zusätzlichen elektrischen Festigkeitssteigerung. [23]

Ein weiteres Material, was bisher nur experimentell für den Einsatz in supraleitenden Hochspannungskabelsystemen für eine höchste Spannung U_m von 245 kV untersucht aber noch in keiner praktischen Anwendung eingesetzt wurde, nennt sich Tyvek®. Dabei handelt es sich um ein poröses und damit tränkbares Polyethylenvlies. Auch sind verschiedene Schichtungen in Kombination mit Polyethylen-Folien (Tyvek®/ PE und Tyvek®/ PE / Tyvek®) untersucht worden. Es besitzt ähnlich gute elektrische Festigkeitseigenschaften wie PPLP aber bessere dielektrische Eigenschaften. Die relative Permittivität ϵ_r von Tyvek®/ PE ist mit 1,73 (in LN₂ bei $f = 60$ Hz) ca. 10 % geringer und der Verlustfaktor $\tan \delta$ mit 0,00013 ca. 20 % geringer als bei PPLP. Besonders der geringe Verlustfaktor nimmt positiven Einfluss auf die dielektrischen Verluste, was bei zunehmender Systemspannung immer mehr von Bedeutung wird. [24] [25] [26]

Schirmung

Die Schirmung wird auf dem elektrischen Isoliersystem eines jeden Leiters aufgebracht. Im einfachsten Fall besteht der Schirm aus einem konventionellen Kupferleiter und dient als Rück- bzw. Neutralleiter zur Abführung der Lade-, Ableit- und Fehlerströme. Ist eine komplette elektromagnetische Abschirmung gewünscht, kann die Schirmung statt aus einem konventionellen Kupferleiter ebenfalls aus einem HTS-Bandleiter aufgebaut werden. Somit treten außerhalb des Kabelsystems keine elektromagnetischen Felder mehr auf.

Rohrkryostat

Ein Edelstahl-Rohrkryostat für supraleitende Hochspannungskabelsysteme besteht im Aufbau aus einem inneren Kryostatrohr, auf dem sich eine thermische Mehrlagenisolierung aus metallbedampften Kunststofffolien befindet, sowie einem äußeren Kryostatrohr. Der Zwischenraum wird

evakuiert, um die maßgebliche thermische Isolierung herzustellen. Der Rohrkryostat ist, je nach geforderter mechanischer Biegsamkeit, entsprechend dem Innenrohr glatt oder gewellt geformt. Das Innenrohr sowie der Rohrkryostat können zusammen ein Hin- und Rückleitersystem für den Flüssigstickstoffkreislauf bilden, um den Supraleiter zu kühlen. Alternative Anforderungen, wie beispielsweise eine erhöhte Kurzzeit-Kurzschlussstromtragfähigkeit führen dazu, dass der Kühlkreislauf auch aus einem separaten, parallel geführtem LN₂-Rücklaufrohr bestehen kann, da das innere Tragrohr dann durch einen Kupferleiter ersetzt werden muss [27]. Aufgrund der verlustbehafteten thermischen Isolierung des Rohrkryostaten sowie elektrischer Verluste muss der flüssige Stickstoff, damit er nicht siedet, bei erhöhtem Druck und reduzierter Temperatur betrieben werden. Der optimale Betriebsbereich von flüssigem Stickstoff liegt bei einem absoluten Druck p_{abs} von 3 bis 15 bar und einer Temperatur T von 68 bis 78 K (Siedetemperatur bei 3 bar ca. 87 K) [28].

2.1.1 Hochtemperatursupraleiter-Kabelkonzepte

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen relevanten Hauptbestandteile folgt im Weiteren die Erläuterung der konstruktiven Umsetzung als supraleitendes Hochspannungskabelsystem im konzentrischen sowie Drei- und Einleiter-Aufbau (Abb 2.3).

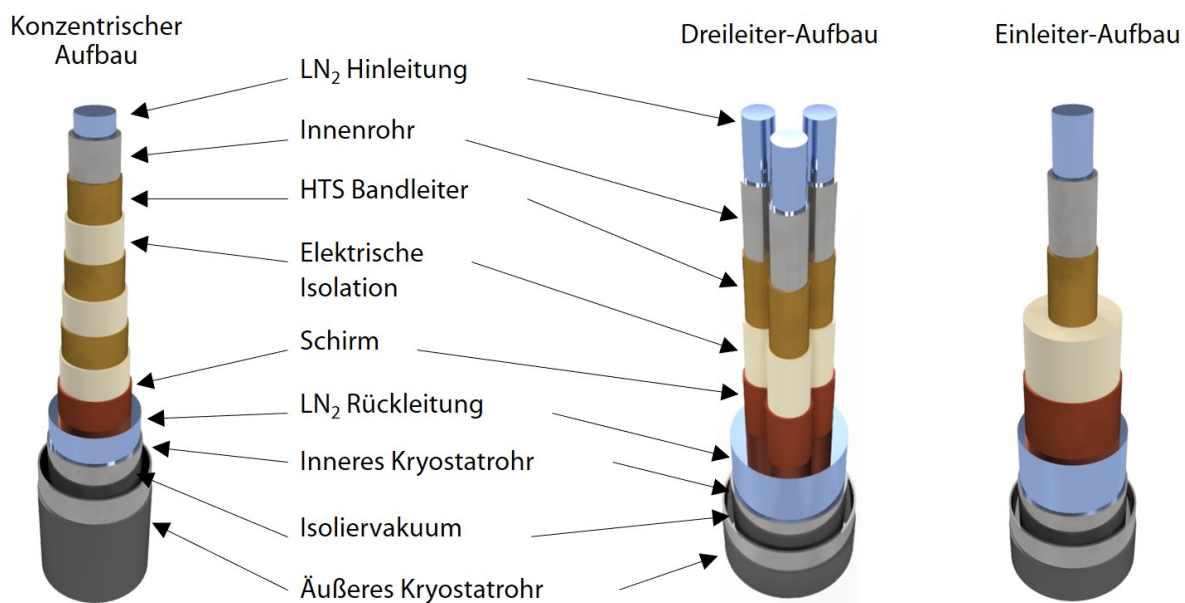


Abbildung 2.3: Exemplarische Darstellung der drei unterschiedlichen Kabelaufbauten. (modifiziert nach [29])

Konzentrischer Aufbau

Bis zu einer Nennspannung von 50 kV werden die drei supraleitenden Phasenleiter konzentrisch (auch triaxial genannt) übereinander angeordnet und von der elektrischen Isolierung mechanisch auf Abstand gehalten (Abb. 2.3 links). Aufgrund der triaxialen Anordnung der drei Phasenleiter wird, im Vergleich zum Dreileiterkabel, eine geringere Menge an HTS-Bandleitern benötigt [29]. Die erste HTS-Bandleiterschicht wird auf ein Innenrohr aus Edelstahl aufgebracht, welches, zwecks Biegsamkeit des gesamten Kabelsystems, statt glatt auch gewellt ausgeführt wird.

Der Nachteil der triaxialen Dreileiteranordnung ist, dass sich in Abhängigkeit der unterschiedlichen Innen- und Außenradien der einzelnen Phasenleiter verschiedene belastungsabhängige

Isolierschichtdicken ergeben müssen. Die verkettete Spannungsbeanspruchung zwischen den supraleitenden Phasenleitern führt zu einer erhöhten Feldstärkebelastung der Isolierschichten. Die triaxiale Phasenleiteranordnung führt zudem zu unterschiedlichen Kapazitätsbelägen, die durch externe kapazitive Kompensationsvorrichtungen auszugleichen sind. Als letzte konzentrische Schicht erfolgt im Aufbau der Neutralleiter. [30]

Dreileiter-Aufbau

Bis zu einer Nennspannung von 110 kV werden supraleitende Hochspannungskabel bisher mit parallelen Phasenleitern (Dreileiter) realisiert (Abb. 2.3 mitte). Hierbei wird der HTS-Bandleiter eines jeden supraleitenden Phasenleiters auf je ein separates Innenrohr aufgebracht und mit einer elektrischen Isolier- und halbleitenden Abschlusschicht sowie einem zusätzlichen Schirm aus Kupfer oder HTS-Bandleiter, als Neutralleiter, umwickelt. Durch die elektrische Schirmung eines jeden supraleitenden Phasenleiters erfolgt eine gleichmäßige Ausrichtung des elektrischen Felds in radialer Richtung, sodass im Vergleich zu nicht geschirmten Leitern, eine höhere Spannungsbeanspruchung ermöglicht wird (Aufbau H-Kabel bzw. Höchststädter-Kabel) [9]. Nach dem Zusammenführen der drei einzelnen supraleitenden Phasenleiter zu einem Verseilgebilde wird der Leiteraufbau in einen Rohrkryostaten eingezogen. Vorteil der parallelen Dreileiteranordnung ist, im Vergleich zum konzentrischen Dreileiteranordnung, dass aufgrund des identischen Aufbaus der einzelnen supraleitenden Phasenleiter keine unterschiedlichen elektrischen Spannungsbeanspruchungen, Kapazitätsbeläge sowie mögliche erhöhte elektrische Feldstärkebelastungen zustande kommen. [30]

Einleiter-Aufbau

Ab einer Nennspannung von 110 kV ist es sinnvoller, das supraleitende Hochspannungskabelsystem nur noch einphasig als sogenannten Einleiter-Aufbau auszuführen (Abb. 2.3 rechts). Hierbei wird ein größerer Einleiterquerschnitt mit entsprechend dickerer Isolierschicht, halbleitenden Schichten und wahlweise nur metallischem Schirm oder kombiniertem metallischem und supraleitendem Schirm als Neutralleiter und ggfs. elektromagnetischer Abschirmung realisiert. Abschließend wird der Einleiter ebenfalls, wie beim konzentrischen Dreileiter- und parallelen Dreileiterdesign, in einen Rohrkryostaten eingezogen. [30]

2.1.2 Historie supraleitender Hochspannungskabelsysteme

Im Vergleich mit anderen energietechnischen supraleitenden Technologien, wie Transformatoren und Strombegrenzern, besitzen supraleitende Hochspannungskabelsysteme den höchsten technologischen Reifegrad (engl.: TRL = Technology Readiness Level). Nach dem Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (engl.: ENTSO-E = European Network of Transmission System Operators for Electricity) ist der technologische Reifegrad in neun Kategorien unterteilt. Kategorie eins ist definiert als „Grundlagenforschung“. Die Kategorien zwei bis vier sind definiert als „Industrielle Forschung“. Kategorie fünf bis acht umfassen die „Experimentelle Entwicklung“. Kategorie neun bildet den Reifegrad für ein am „Markt“ verfügbares Produkt ab [31]. Für supraleitende Hochspannungskabelsysteme wird ein TRL von fünf bis acht angegeben. Dabei liegen Gleichspannungsanwendungen bei einem TRL von fünf bis sechs und Wechselspannungsanwendungen bei einem TRL von sieben bis acht [32].

Tabelle 2.1: Auflistung wichtiger Projekte und Forschungsvorhaben supraleitender Hochspannungskabelsysteme für DC- und AC-Anwendungen.* bedeutet, dass die Länge noch nicht bekannt ist. [16] [32] [33]

Projekt	Land	Jahr	Spannungsart	Höchste Übertragungsspannung U in kV	Nennstrom I in kA	Länge l in m	Quelle
Carollton	USA	2000	AC	15	1,25	30	[34]
Albany	USA	2006	AC	34,5	0,80	350	[35]
Long Island	USA	2008	AC	138	2,40	600	[36]
Yokohama	Japan	2010	AC	66	1,75	30	[37]
Icheon	Südkorea	2011	AC	22,9	1,25	500	[38]
CASER	Japan	2011	DC	10	2,00	200	[39]
IEE CAS	China	2012	DC	1,3	10,0	360	[40]
Ampacity	Deutschland	2013	AC	12	2,30	1.000	[41]
KEPRI	Südkorea	2014	DC	80	3,25	100	[42]
Best Path	Europa	2018	DC	320	10,0	30	[43]
Shingal	Korea	2019	AC	23	1,26	1.000	[44]
St. Petersburg	Russland	2021	DC	20	2,50	2.400	[45]
SuperLink	Deutschland	2020 - 2023	AC	123	3,20	150	[46]
HighAmp	Deutschland	2022 - 2025	AC	24	3,00	15	[47]
Scarlet	Europa	2022 - 2027	DC	50	10,0	*	[48] [49]

Wie Tabelle 2.1 zu entnehmen findet seit Beginn des 21. Jahrhunderts eine kontinuierliche Entwicklung von supraleitenden Hochspannungskabelsystemen statt.

Das erste supraleitende Hochspannungskabelsystem wurde im Jahre 2000 im Rahmen des *Carollton*-Projekts entwickelt, bei dem erfolgreich ein erster Demonstrator für eine Wechselspannung von 15 kV mit einer Länge von 30 m experimentell erprobt wurde. [34]

Das *Ampacity*-Projekt aus dem Jahr 2013 gilt als eines der nennenswertesten Meilensteinprojekte für supraleitende Kabelsysteme, da in diesem erstmals ein supraleitendes Hochspannungskabelsystem für eine Wechselspannung von 12 kV mit einer Länge von 1.000 m, inklusive Garnituren und Verbindungsmuffen sowie supraleitenden Strombegrenzern, in der Verteilnetzebene eingesetzt und betrieben wurde. Über mehrere Jahre konnten so signifikante Betriebserfahrungen unter Realbedingungen gesammelt werden. Während des Betriebes kam es von Seiten des

supraleitenden Kabelsystemen zu keinerlei Auffälligkeiten, Problemen oder gar Ausfällen. [50] In den letzten sieben Jahren ergaben sich daraufhin die folgenden wesentlichen Entwicklungen im Bereich supraleitender Hochspannungskabelsysteme.

Im EU-geförderten *Best Path*-Projekt wurde ein ± 320 kV / 10 kA (3 GW) supraleitendes Hochgleichspannungskabelsystem mit einer Qualifizierungslänge von 30 m entwickelt. Bei diesem besteht die Besonderheit darin, dass das HTS-Material Magnesiumdiborid (kurz: MgB_2) eingesetzt wurde. Zwar beträgt die Sprungtemperatur von MgB_2 -234 °C (39 K), womit Flüssigstickstoff mit -196 °C (77 K) als Kühlmedium nicht in Frage kommt, jedoch ist MgB_2 einfach als Draht herstellbar und, aufgrund der hohen natürlichen Verfügbarkeit, bereits in großen Mengen kostengünstig verfügbar. Zur Kühlung des HTS-Materials befindet sich der MgB_2 -Phasenleiter im Innenrohr eines ersten Rohrkryostaten, welcher auf Hochspannungspotential liegt und von gasförmigem Helium (He), mit einem Druck von 20 bar und einer Temperatur von -253 °C (20 K), durchströmt wird. Auf dem Außenrohr des ersten Rohrkryostaten folgt die elektrische Hochspannungsisolierung, bestehend aus PPLP, sowie die elektrische Schirmung bzw. der Neutralleiter. Der gesamte Aufbau befindet sich erneut in dem Innenrohr eines zweiten Rohrkryostaten, der von Flüssigstickstoff durchströmt wird. Die Tränkung des PPLP mit Flüssigstickstoff führt zu einer Erhöhung der elektrischen Gesamtfestigkeit. Die höchste elektrische DC-Designfeldstärke auf der Phasenleiteroberfläche in der elektrischen Isolierung beträgt ca. 20 kV/mm. Abschließend folgt das geerdete Außenrohr des zweiten Rohrkryostaten zur thermischen Isolierung. [32] [43]

Beim *Shingal*-Projekt wurde im Jahr 2019 das weltweit erste kommerzielle supraleitende Wechselspannungskabelsystem mit 23 kV / 1,26 kA (50 MVA) und einer Länge von 1.000 m von der Firma *LS Cable & System* installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Hierbei kommen für die drei separaten Phasenleiter REBCO HTS-Bandleiter der Firma *SuNAM* und der Firma *AMSC* zum Einsatz. Die elektrische Isolierung jedes Phasenleiters besteht aus ca. 4,5 mm dickem aufgewickelten PPLP-Laminat. Die höchste effektive elektrische AC-Designfeldstärke auf der Phasenleiteroberfläche beträgt ca. 3 kV/mm. Mit dem Kabelsystem wurden zu Lastausgleichszwecken zwei Umspannwerke sekundärseits auf der Mittelspannungsverteilnetzebene miteinander gekoppelt, um einen starken tageszeitabhängigen Leistungsbedarf besser bereitstellen zu können. [44] [51] [52]

Im geförderten *St. Petersburg*-Projekt wurde 2021 das mit insgesamt 2.400 m längste supraleitende Hochgleichspannungskabelsystem der Welt mit ± 20 kV / 2,5 kA (50 MW) erfolgreich in einer experimentellen thermohydraulischen und elektrischen Inbetriebnahmeprüfung über einen Zeitraum von mehreren Monaten erprobt. Die elektrische Isolierung ist mit einer höchsten elektrischen DC-Designfeldstärke auf der Phasenleiteroberfläche von 4,3 kV/mm ausgelegt worden. Das Kabelsystem für DC-Anwendungen besteht aus sechs Einzellängen von je 400 m. Zum Einsatz kamen bei diesem Kabelsystem ebenfalls REBCO HTS-Bandleiter. Die Installation in St. Petersburg wurde für Ende 2021 terminiert. [32] [45] [53]

Das BMWK-geförderte *SuperLink*-Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung eines supraleitenden Hochwechselspannungskabelsystems für 123 kV / 3,2 kA (500 MVA). Die Besonderheit des Kabelsystems ist, dass dieses tolerant für einen Kurzzeit-Kurzschlussstrom von 40 kA über eine 1 s ausgelegt wird. Das wird ermöglicht, indem der REBCO HTS-Bandleiter der supraleitenden Phasenleiter nicht auf ein Tragrohr sondern einen Kupfer-Vollleiter aufgebracht wird. Jedoch bedingt die Kurzschluss toleranz, dass der LN_2 -Kühlkreislauf eine externe Rückleitung benötigt.

Details zum gesamten geometrischen Kabelaufbau sowie der eingesetzten Materialien existieren zum jetzigen Zeitpunkt nicht. Im Rahmen des Projekts wird das Kabelsystem inklusive der gesamten Infrastruktur konzeptionell für eine Gesamtlänge von 12 km entwickelt, zunächst aber nur ein 150 m langes Kabelsystem zur Präqualifikation gefertigt. [46]

Das Projekt *HighAmp* wird parallel von 2022 bis 2025 vom BMWK gefördert. In diesem Verbundprojekt wird ein alternatives Konzept eines supraleitenden AC-Hochspannungskabelsystems untersucht, indem CORT-Phasenleiter nur partiell von Stützisolatoren gegeneinander und gegenüber dem Rohrkryostaten in flüssigem Stickstoff auf ihren elektrisch optimalen Positionen fixiert werden. Dadurch kann ein geometrisch möglichst kompaktes Design erzielt werden, bei dem die entstehenden Wärmeverluste dadurch kompensiert werden, dass sich durch die fehlende Feststoffisolierung und dem resultierenden geringeren Längsdruckabfall ein höherer LN_2 -Massendurchsatz ergibt. Die Aufgabe des elektrischen Isoliersystems wird dabei ebenfalls vom Flüssigstickstoff übernommen, dessen elektrische Isoliereigenschaften mit denen von Isolieröl vergleichbar sind.

Dieses neuartige Konzept kann es ermöglichen, konventionelle Kabelsysteme in urbanen Regionen durch kompaktere supraleitende Hochspannungskabelsysteme mit geringerer Systemspannung und höherer Übertragungsleistung zu substituieren.

Zur experimentellen Untersuchung wird ein 15 m Demonstrator für eine höchste Spannung U_m von 24 kV aus einem dreiphasigen Dreileitersystem, bestehend aus drei CORT-Phasenleitern, Stützisolator, Rohrkryostat und Stromzuführungen mit Hochspannungsdurchführungen konzipiert und aufgebaut. [54]

Das derzeit aktuellste Forschungsvorhaben ist das EU-geförderte Projekt *SCARLET*. Ziel von *SCARLET* ist es, aufbauend auf den Erkenntnissen von *Best Path*, supraleitende Hochgleichspannungskabelsysteme für ± 50 bis ± 100 kV und 10 kA (bis zu 1 GW) sowie für Land- und Unterseeanwendungen von Längen bis zu 50 km zu entwickeln. Als HTS-Material soll, wie auch schon bei *Best Path*, MgB_2 eingesetzt werden, welcher allerdings nicht mittels Heliumgas sondern mit Flüssigwasserstoff (kurz: LH_2) gekühlt wird. [48] [49]

Ein erster konzeptioneller Entwurf eines LH_2 -gekühlten Hochgleichspannungskabelsystems für 25 kV erreicht eine höchste elektrische Designfeldstärke auf der Phasenleiteroberfläche von ca. 8,7 kV/mm mit einer elektrischen Isolierung, die aus ca. 3,5 mm dickem aufgewickeltem PPLP-Laminat besteht. [55]

Dem aktuellen Stand der Technik ist zu entnehmen, dass supraleitende Hochspannungskabelsysteme für vielfältige energietechnische Gleich- und Wechselspannungsanwendungen einsetzbar und auch bereits in experimentellen wie kommerziellen Projekten erfolgreich erprobt sind.

2.2 Elektrische Isolatoren

Unter einem elektrischen Isolator ist im Allgemeinen ein nichtleitendes festes, flüssiges oder gasförmiges Medium zu verstehen, welches elektrische Potentiale durch seine geringe Leitfähigkeit sicher voneinander isoliert. In der Energietechnik ist ein elektrischer Isolator ein elektromechanisches Feststoffbauteil mittels dem elektrisch spannungsführende Bauteile und Komponenten befestigt, gehalten oder geführt werden. Die bekannteste Anwendung eines elektrischen Isolators ist die als Freileitungsisolator aus Keramik- oder Silikon-Verbund-Materialien mittels derer Freileitungsseile geführt und fixiert sowie vom geerdeten Hochspannungs-Freileitungsmast

isoliert werden [13] [56].

Eine speziellere Anwendung des elektrischen Isolators ist die des elektrischen Durchführungsisolators. Dabei wird ein spannungsführender Leiter durch eine geerdete Wandung oder ein Gehäuse geführt. Die elektrische Durchführung bewirkt eine Vergleichmäßigung der elektrischen Feldverteilung und Reduzierung der daraus resultierenden elektrischen Belastungsfeldstärke im Isoliermaterial der Durchführung durch eine entsprechend aktive Feldsteuerung. Der Durchführungsisolator übernimmt dabei die Aufgabe, die Grenzflächenbelastung der unterschiedlichen Isolierstoffmedien (fest / flüssig oder fest / gasförmig) entlang der Längsgrenzfläche so kompakt wie möglich zu isolieren, dass es unter den geforderten elektrischen Beanspruchungen nicht zu einem elektrischen Überschlag kommt. Durchführungsisolatoren finden in allen elektrischen Hochspannungsbetriebsmitteln, wie Schaltanlagen, Transformatoren, Generatoren und Kabelendverschlüssen Anwendung [13].

In gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und Leitungen (GIL) werden mittels spezieller Isoliergase bzw. Isoliergasgemische hohe Spannungen und Ströme von bis zu 1.100 kV und 8.000 A äußerst kompakt isoliert und übertragen. Spezielle elektrische Zylinder- und Stützisolatoren halten den spannungsführenden Phasenleiter in äquidistanten Abständen auf konstantem Abstand zum umgebenden geerdeten Rohr (Abb. 2.4) [57] [58] [59].

Grundsätzlich ähneln GIS- und GIL-Systeme in ihrem Gesamtaufbau und den eingesetzten Isolatoren dem Kabelkonzept, welches im *HighAmp*-Projekt verfolgt wird. Wesentliche Unterschiede bzgl. der elektrischen Isolatoren bestehen darin, dass diese das Isoliergasvolumen segmentweise abschotten. Im *HighAmp*-Projekt wird im Gegensatz dazu ein möglichst großer durchgängiger Massenstrom für Flüssigstickstoff benötigt.

2.2.1 Zylinderisolatoren

Je nach zu erfüllender elektrischer und / oder mechanischer Anforderung werden unterschiedliche Zylinderisolatoren in gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen eingesetzt. Die geläufigsten Ausführungen sind Scheiben- und Konusisolatoren – auch Trichterisolator genannt (Abb. 2.4) – in gasdichter oder gasdurchlässiger Ausführung.

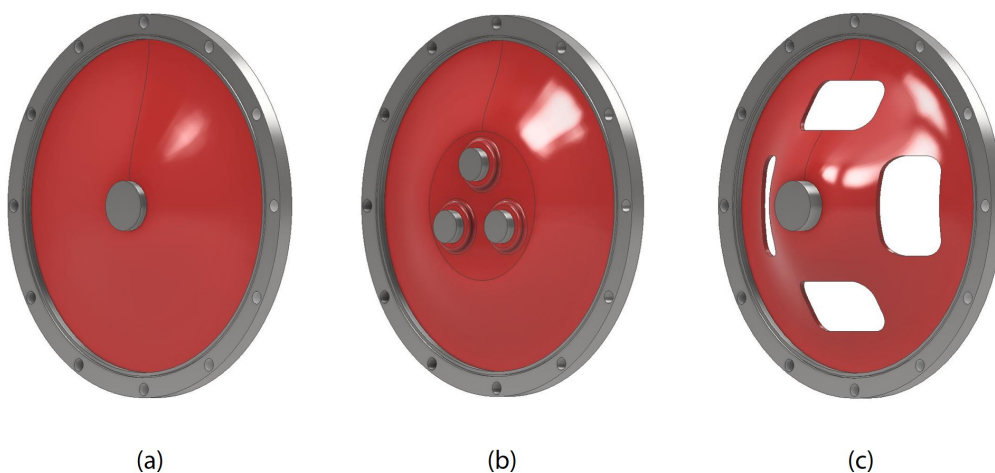


Abbildung 2.4: Häufig verwendete Bauformen von Zylinderisolatoren in gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen: (a) Scheibenisolator einphasig, (b) Scheibenisolator dreiphasig und (c) Konusisolator einphasig gasdurchlässig. (modifiziert nach [59])

Unterschieden wird des Weiteren, ob Zylinderisolatoren für eine ein- oder dreiphasige Anwendung ausgeführt sind. Das hängt davon ab, ob die Systemspannung unter- oder oberhalb von 170 kV liegt. Bis zu einer Systemspannung von 170 kV werden gasisolierte Schaltanlagen dreiphasig ausgeführt, wodurch drei parallele Phasenleiter durch einen Isolator geführt werden müssen. Ab einer Spannung von 170 kV werden gasisolierte Schaltanlagen einphasig ausgeführt [60]. Bei gasisolierten Leitungen werden nach jetzigem Stand der Technik nur einphasige Systeme gebaut, wobei aktuell im Bereich der Wissenschaft dreiphasige Systemkomponenten erforscht werden [61].

Bei richtiger Auswahl der relativen Permittivität des eingesetzten Materials sowie der geometrischen Formgebung des Scheibenisolators kommt es zu einer nahezu konstanten Tangentialfeldstärke auf dessen Oberfläche. Jedoch sind bei dem Scheibenisolator die Durchschlag- und Überschlagstrecke minimal (Abb. 2.5 links). Beim Konusisolator hingegen führt die verlängerte Oberfläche durch die Neigung zu einer niedrigeren Tangentialfeldstärke auf der Oberfläche und einer Verlängerung der Überschlagstrecke (Abb. 2.5 rechts). Daraus folgt wiederum ein kleinerer Außendurchmesser des Konusisolators und somit des gesamten Betriebsmittels [62].

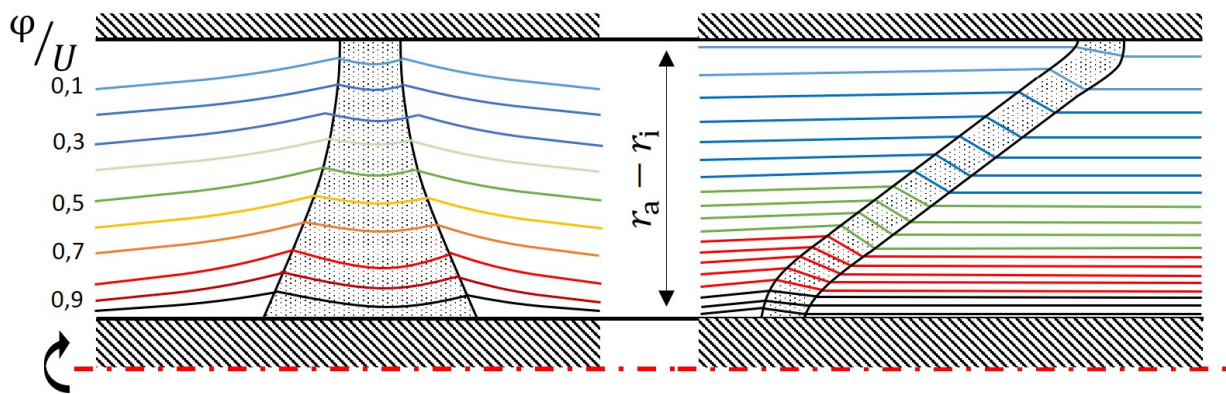


Abbildung 2.5: Äquipotentialverlauf in konzentrischen Leiteranordnungen. Links: Scheibenisolator (Abb. 2.4 (a, b)); rechts: Konusisolator (Abb. 2.4 (c)). (modifiziert nach [62])

An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass der beschriebene Einfluss einer Neigung und somit verlängerten Überschlagstrecke nicht grundsätzlich gilt. Aus den theoretischen Grundlagen zu schräg geschichteten inhomogenen Dielektrika (Abschn. 3.4.2) lässt sich das nicht allgemein erklären, da am Übergangsbereich zwischen Phasenleiter, Isolator und umgebenden Isoliermedium die elektrische Feldstärkebelastung in Abhängigkeit des Neigungswinkels steigt. So kann es zu einem verfrühten Durch- bzw. Überschlag kommen. Letztlich ist dies ein Aspekt, den es für Stützisolatoren in Flüssigstickstoff experimentell zu untersuchen gilt.

2.2.2 Stützisolatoren

Besonders bei gasisolierten Leitungen (GIL) werden Stützisolatoren eingesetzt, um den Phasenleiter ca. alle 10 m zum umgebenden geerdeten Rohr abzustützen und konzentrisch zu positionieren.

In horizontaler Installation werden dafür Einfach-Stützisolatoren (Abb. 2.6 links) doppelt bzw. V-förmig in den Phasenleiter geschraubt. In vertikaler Verlegung werden zum Abstützen des Phasenleiters Dreifach-Stützisolatoren eingesetzt (Abb. 2.6 rechts) [59] [57].

Beide Stützisolatortypen werden nicht mit dem umgebenden geerdeten Rohr verschraubt, sondern gleitend gelagert ausgeführt, damit der Phasenleiter bei der Montage in das Rohr eingeschoben werden kann.

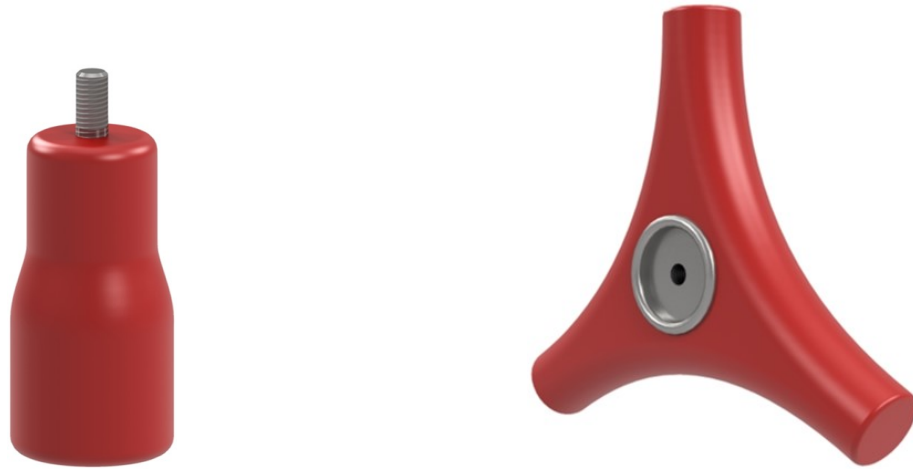


Abbildung 2.6: Modell eines Einfach-Stützisolators zum Einschrauben in den Innenleiter (links) und eines Dreifach-Stützisolators zur Zwischenmontage (rechts). (modifiziert nach [59] und [63])

Hinsichtlich der geometrischen Formgebung, unter dem Gesichtspunkt elektrischer Beanspruchungen, verhält es sich mit der Feldstärkeverteilung bei Stützisolatoren wie bei Zylinderisolatoren. Je nach Notwendigkeit kann die Überschlagstrecke durch das Hinzufügen von Schirmprofilen verlängert und damit die elektrische Überschlagfestigkeit ggfs. vergrößert werden.

2.3 Elektrische Felder zylindrischer Leiteranordnungen

Der Abbildung 2.7 ist zu entnehmen, dass zum Zeitpunkt t_1 aus der Leiter-Erd-Spannung der einzelnen Phasenleiter (U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}) zum umgebenden geerdeten Rohrkryostaten die maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung entsteht. Zum Zeitpunkt t_2 folgt daraufhin die maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung zwischen den einzelnen Phasenleitern aus der verketteten Leiter-Leiter-Spannung U_{L12} .

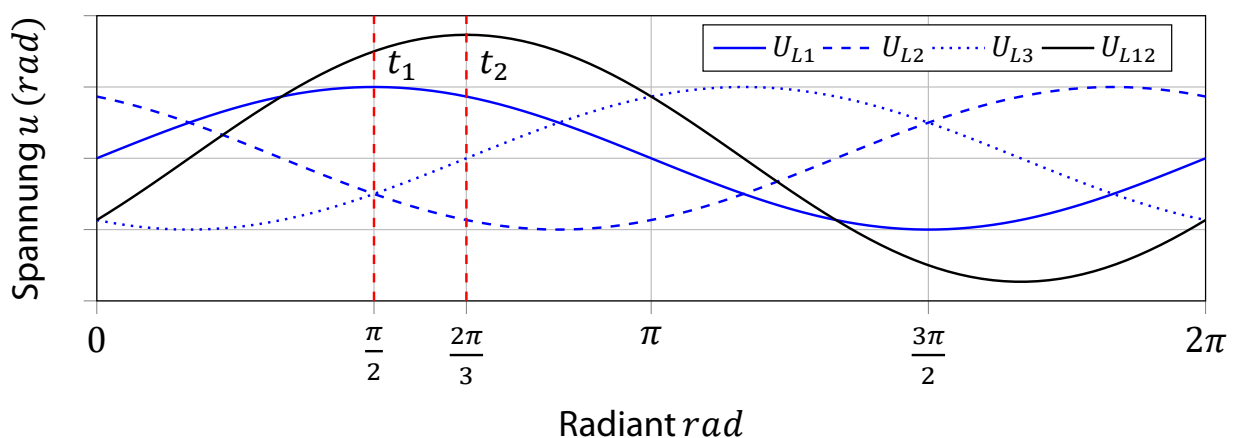


Abbildung 2.7: Darstellung der auftretenden Spannungsbeanspruchungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Dreiphasensystem.

Somit muss die Geometrie so gewählt werden, dass die geringste maximale elektrische Feldstärke beider zeitlich unterschiedlicher Feldstärkebeanspruchungen gleich ist. Am effizientesten lassen sich die optimalen geometrischen Eigenschaften (ohne Stützisolator), mit Hinblick auf die geringste maximale elektrische Feldstärke mittels iterativer numerischer Berechnungen ermitteln (Kap. 4).

Da jedoch die elektrischen Festigkeitseigenschaften von Flüssigstickstoff für die Gesamtanordnung unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung nicht bekannt sind, muss diese für empirische Untersuchungen vereinfacht werden. Dazu lässt sich die Gesamtanordnung in zwei separat zu betrachtende zylindrische Leiteranordnungen unterteilen: In eine zentrisch-zylindrische und eine parallel-zylindrische Leiteranordnung. Die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung stellt die elektrische Feldstärkebelastung unter der Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung nach. Die Leiter-Leiter-Spannungsbeanspruchung und daraus resultierende elektrische Feldstärkebelastung wird mittels der parallel-zylindrischen Leiteranordnung nachgebildet.

Da es sich bei den elektrischen Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchungen, im Vergleich zum betrachteten Raumbereich, um langsame zeitliche (bzw. niederfrequente) Veränderungen der Feldgrößen handelt, können die mathematischen Vereinfachungen für quasistationäre kapazitive elektrische Felder herangezogen werden [64]. Damit lassen sich die elektrischen Feldstärkebelastungen beider Leiteranordnungen nach analytischen Berechnungsverfahren, wie in Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 aufgezeigt, ermitteln.

2.3.1 Analytische Berechnung zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen

In einer einphasigen konzentrischen Leiteranordnung mit der Potentialdifferenz U und einer symmetrischen elektrischen Feldverteilung nimmt die elektrische Feldstärke $E(r)_{\text{Kon}}$ umgekehrt proportional zum Radius r vom Innenleiterradius r_0 zum äußeren umgebenden Außenleiterradius r_1 ab [15].

$$E(r)_{\text{Kon}} = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (2-1)$$

Zwar befindet sich in einer konzentrischen Leiteranordnung die maximale elektrische Feldstärke immer am Innenleiter ($r = r_0$), jedoch hat diese ein natürliches Minimum in Abhängigkeit des Verhältnisses von Außen- zu Innenradius bei

$$\frac{r_1}{r_0} = e \approx 2,72. \quad (2-2)$$

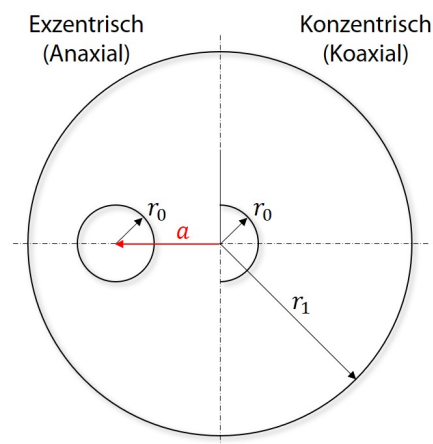


Abbildung 2.8: Darstellung zur Erklärung des Unterschiedes einer exzentrischen und einer konzentrischen Leiteranordnung.

Somit lässt sich die geringste maximale elektrische Feldstärke $E_{\text{Kon, max, min}}$, unter Annahme eines beliebigen Außenradius, mit

$$E_{\text{Kon, max, min}} = \frac{U}{r_1} \cdot e \quad (2-3)$$

bestimmen [62].

Die maximale Feldstärke E_{Ex} einer exzentrischen Leiteranordnung lässt sich mittels folgender analytischen Gleichung in Abhängigkeit des Abstandes a zum Mittelpunkt der konzentrischen Anordnung (Abb. 2.8) nach [15] bestimmen:

$$E(a)_{\text{Ex}} = \frac{U}{r_0} \cdot \frac{r_1^2 - (r_0 - a)^2 + \sqrt{(r_1^2 - r_0^2 + a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot r_1^2}}{r_1^2 - (r_0 + a)^2 + \sqrt{(r_1^2 - r_0^2 + a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot r_1^2}} \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{r_1}{r_0} \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2 - a^2 + \sqrt{(r_1^2 - r_0^2 + a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot r_1^2}}{r_1^2 - r_0^2 + a^2 + \sqrt{(r_1^2 - r_0^2 + a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot r_1^2}} \right]} \quad (2-4)$$

Die maximale Feldstärke tritt wieder am Innenleiter auf. Unter Gleichhaltung der Anordnungscharakteristika r_1 und r_0 steigt bei zunehmender Exzentrizität des Innenleiters (Vergrößerung des Abstandes a zum Mittelpunkt (Abb. 2.8)) zum umgebenden Außenleiter die maximale elektrische Feldstärkebelastung am Innenleiter.

2.3.2 Analytische Berechnung parallel-zylindrischer Leiteranordnungen

Zwischen zwei parallelen kreisförmigen Leitern (Abb. 2.9) mit dem gleichen Radius r , an denen eine Potentialdifferenz U anliegt, lässt sich entlang einer Verbindungsgeraden a zwischen den Kreismittelpunkten, auf beliebiger Strecke x , die symmetrische elektrische Feldverteilung mit

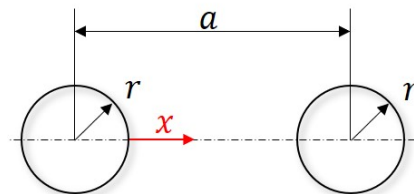


Abbildung 2.9: Darstellung einer parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

$$E(a, r, x)_{\text{Para}} = \frac{U \cdot \sqrt{a^2 - (4 \cdot r^2)}}{2 \cdot [(r + x)(a - (2 \cdot r)) - x^2] \cdot \ln \left(\frac{a}{2 \cdot r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2 \cdot r}\right)^2 - 1} \right)} \quad (2-5)$$

analytisch bestimmen [15]. Der Verlauf des elektrischen Feldes zwischen beiden Leitern nimmt, beginnend beim Maximum der Feldstärke auf der Oberfläche des ersten Leiters, mit zunehmender Strecke x bis $a/2$ ab und erreicht dort sein Feldstärkeminimum. Ab $a/2$ steigt die Feldstärke mit demselben Verlauf, bis dasselbe Maximum auf der Oberfläche des zweiten Leiters wieder erreicht ist. Die maximale elektrische Feldstärke auf den Leiteroberflächen ergibt sich mit Gleichung 2-5 und $x = 0$ zu

$$E(a, r)_{\text{Para, max}} = \frac{U \sqrt{\left(\frac{a}{2 \cdot r}\right)^2 - 1}}{2 \cdot r \cdot \left[\left(\frac{a}{2 \cdot r}\right) - 1\right] \cdot \ln\left(\frac{a}{2 \cdot r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2 \cdot r}\right)^2 - 1}\right)}. \quad (2-6)$$

Für einen genügend großen Abstand a , der mindestens dem fünffachen Wert des Leiterradius r entspricht ($a \gg 5 \cdot r$), kann die maximale elektrische Feldstärke auf beiden Leiteroberflächen mit

$$E(a, r)_{\text{Para, max}} \approx \frac{U}{2 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (2-7)$$

angenähert werden.

2.4 Elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

Bei flüssigem Stickstoff handelt es sich um das chemische Element Stickstoff (N_2) im flüssigen Aggregatzustand, der bei einem Normaldruck von ca. 1.013 mbar bei einer Temperatur von -196°C siedet. Ab einer Temperatur von ca. -208°C (1.013 mbar) geht Flüssigstickstoff in den festen Aggregatzustand über. Stickstoff ist ein Elementargas und zählt zudem zu den Inertgasen, was bedeutet, dass es sehr reaktionsträge ist und sich nur wenig an chemischen Reaktionen beteiligt. Inertgase sind zudem geschmack- und geruchlos sowie ungiftig. Mit etwa 78 % ist Stickstoff zudem Hauptbestandteil der Erdatmosphäre. [65]

Erzeugt wird Flüssigstickstoff als Nebenprodukt durch die fraktionierte Destillation flüssiger Luft, wodurch Flüssigsauerstoff sowie die Edelgase Neon, Krypton, Argon und Xenon gewonnen werden. Aufgrund der großen anfallenden Mengen ist Flüssigstickstoff verhältnismäßig günstig. Elektrische Isolierflüssigkeiten werden in mehrere Klassen unterteilt. Zum einen wird zwischen kohlenstoffhaltigen (organischen) und kohlenstofffreien (anorganischen) Isolierflüssigkeiten unterschieden. Kohlenstoffhaltige Isolierflüssigkeiten werden des Weiteren in natürlich oder synthetisch hergestellte Stoffe unterteilt. Unter natürlichen Stoffen sind zum einen petrochemische und zum anderen pflanzliche Stoffe zu verstehen. Die synthetisch hergestellten Stoffe werden in künstlich hinzugefügte Kohlenstoffe und halogenfreie Stoffe kategorisiert. Flüssigstickstoff zählt zu den anorganischen Isolierflüssigkeiten, da es sich um eine kohlenstofffreie Verbindung handelt. Isolierflüssigkeiten stellen aus molekularer Sicht (ideale Fluide) extrem komprimierte Gase dar, für die dieselben physikalischen Gesetze gelten.

Allgemein gilt für Isoliermedien, dass mit steigender Dichte (Gas \rightarrow Flüssigkeit \rightarrow Feststoff) – und demnach sinkender freier Weglänge eines Elektrons – die elektrische Festigkeit steigt. In Isolierflüssigkeiten entstehen Entladungen grundsätzlich wie in Gasen (Generationen-Mechanismus, Gesetz von Paschen, Streamer-Mechanismus) durch Beschleunigung von Elektronen, Stoßionisation und Lawinenbildung. Jedoch gibt es bisher noch keine allgemeingültige physikalische Theorie zur Beschreibung des Entladungsprozesses in Isolierflüssigkeiten. Das liegt im Wesentlichen an der Komplexität und Vielzahl an Einflussparametern, die den Entladungsprozess in einer Isolierflüssigkeit maßgeblich beeinflussen (Tab. 2.2).

Eine allgemein geläufige Vorstellung ist, dass durch die elektrische Feldstärkebelastung und den daraus resultierenden Stoßprozessen mit LN_2 -Molekülen eine partielle Verdampfung hervorge-

rufen werden könnte. Durch die entstehenden N_2 -Gasblasen und den darin größer werdenden freien Weglängen könnten, bei ausreichend hohen elektrischen Feldstärken, Stoßionisations- und Lawinenbildungsprozesse eingeleitet werden, die wiederum zu Teil- bzw. Vorentladungen führen. Durch Kaskadierung dieser Abläufe kommt es letztlich zur Ausbildung einer vollen Entladung und somit zu einem Durchschlag. Da der Durchschlagmechanismus im flüssigen Stickstoff demnach durch eine partielle Gasentladung initiiert wird, spricht man auch von einem verschleierte Gasdurchschlag [66] [67] [68] [69].

Allgemein gibt es bei Isolierflüssigkeiten, wie auch bei Isoliergasen oder festen Isolierstoffen, den Unterschied zwischen intrinsischen elektrischen Festigkeiten und technisch erreichbaren elektrischen Festigkeiten. Die intrinsische elektrische Festigkeit von flüssigem Stickstoff liegt zwischen 160 und 188 kV/mm (zum Vergleich: Isolieröl von 100 bis 400 kV/mm) [70]. Die technisch erreichbare elektrische Festigkeit liegt immer weit unter der intrinsischen elektrischen Festigkeit. Bei Isolierflüssigkeiten fällt dieser Unterschied auch größer aus als bei Isoliergasen [13]. So muss letztlich für jedes entwickelte elektrisch ausgedehnte Betriebsmittel die individuelle elektrische Festigkeit der Isolierung in Abhängigkeit der Konstruktion ermittelt werden. Im wissenschaftlichen Bereich werden aber auf kleinerem Maßstab abstrahierte Experimente durchgeführt, um auch eine vergleichende Einordnung mit anderen (evtl. bereits ausführlicher) untersuchten Materialien vorzunehmen (siehe Abb. 2.10) [13] [66].

Die experimentellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur technischen elektrischen Festigkeit von Flüssigstickstoff hängen von einer Vielzahl verschiedener Einflussparameter sowie deren Variation untereinander ab. Bei den meisten Ergebnissen zur elektrischen Festigkeit handelt es sich um die sogenannte elektrische Kurzzeit-Festigkeit. Untersuchungen über längere Zeiträume fallen unter die Vergrößerungsgesetze und sind zumeist, aufgrund der sehr langen Dauer, nicht oder nur schwierig durchführbar.

Ein Auszug geläufiger Einflussparameter auf die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff sind in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Tabelle 2.2: Auszug geläufiger Einflussparameter auf die elektrische Festigkeit von LN_2 .

Kategorie	Eigenschaft
Geometrie	Formgebung (Platte, Kugel, Zylinder, Spitze, etc.), Abmessung, Abstand
Material	Oberflächenrauheit, verwendete Metalle / Legierungen, Verunreinigungen
Elektrische Belastungsart	Signalform (AC, DC, Blitzstoß, etc.), Anstiegszeit, Steigerungsgeschwindigkeit, Frequenz, Gesamtdauer
Umgebung	Druck, Temperatur, ultraviolette / radioaktive Strahlung

Beim Vergleich elektrischer Kurzzeit-Festigkeiten in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussparameter spielt auch der sogenannte Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger (auch Homogenitätsgrad genannt) eine wesentliche Rolle. Hierbei handelt es sich um eine rein geometrische Eigenschaftsbeschreibung. Der Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger lässt sich aus dem Quotienten von mittlerer elektrischer Feldstärke E_{Mittel} zu maximal auftretender elektrischer Feldstärke E_{max} wie folgt bestimmen:

$$\eta = \frac{E_{\text{Mittel}}}{E_{\text{max}}} \quad \text{mit} \quad E_{\text{Mittel}} = \frac{U}{a}. \quad (2-8)$$

So kann der Ausnutzungsfaktor für Experimente mit kleinen oder annähernd gleichen Flächen und Volumina dazu genutzt werden, die elektrischen Kurzzeit-Festigkeitswerte (über die maximal auftretende elektrische Feldstärke) vergleichbar zu machen. Der Ausnutzungsfaktor ist grundsätzlich auch ein Maß, um eine Aussage über die geometrische Kompaktheit einer Hochspannungsanlage treffen zu können. Als homogen wird in Flüssigstickstoff ein elektrisches Feld bei einem Ausnutzungsfaktor η von etwa gleich 1,0 bezeichnet. Ein schwach inhomogenes elektrisches Feld liegt dann vor, wenn der Ausnutzungsfaktor η im Bereich von etwa 1,0 bis 0,7 liegt. Ab einem Ausnutzungsfaktor η von kleiner als 0,7 handelt es sich um inhomogene bis stark inhomogene elektrische Felder. [23]

Wie Abbildung 2.10 qualitativ zu entnehmen ist, zeigt Flüssigstickstoff bei ca. 1 bar und 77 K gegenüber etablierten elektrischen Isoliermedien unter homogener elektrischer Feldverteilung vergleichbare elektrische Kurzzeit-Festigkeitseigenschaften.

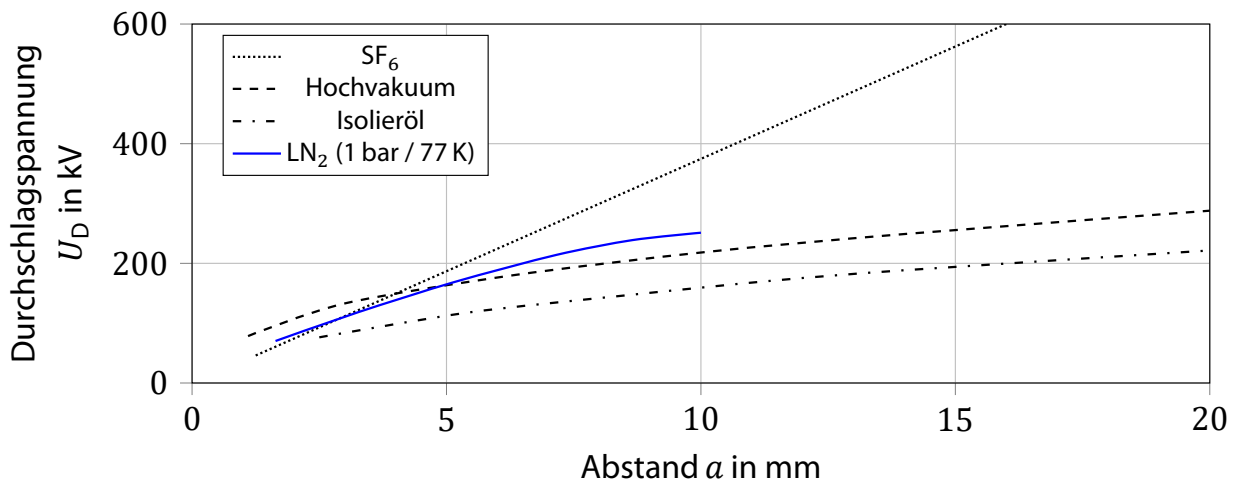


Abbildung 2.10: Elektrischen Festigkeit von LN₂ (ca. 1 bar, 77 K) im Vergleich zu anderen bekannten elektrischen Isoliermedien unter homogener Gleichspannungsbeanspruchung ($\eta = 1$). (modifiziert nach [12])

Die Kurzzeit-Spitzendurchschlagspannung aus Abbildung 2.10 wird nach [12] mit folgender empirischen Gleichung abgeschätzt:

$$U_{D, \text{Spitze}} = 29 \text{ kV} \cdot \left(\frac{a}{\text{mm}} \right)^{0,8}. \quad (2-9)$$

Aus der effektiven Kurzzeit-Spitzendurchschlagspannung (Gl. 2-9) ergibt sich für einen Abstand a von 1 mm eine elektrische Kurzzeit-Spitzenfeldstärke $E_{D, \text{Spitze}}$ von 29 kV/mm für Flüssigstickstoff. Diese ist als elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff zu verstehen, da dieser sich in seinem Zustand am Siedepunkt befindet und der gasförmige Stickstoffanteil die elektrische Gesamtfestigkeit definiert. Mit der Erhöhung der Verdampfungsrate durch eine zusätzlich zugeführte elektrische Leistung von 4 W/m² zeigt sich, dass die elektrische Kurzzeit-Spitzenfestigkeit nach Gleichung 2-9 für die gleiche Anordnung bereits auf ca. 14,5 kV/mm halbiert wird [71]. Ein annähernd gleiches Ergebnis von ca. 14 kV/mm ergibt sich ebenfalls, wenn die elektrische

Festigkeit nach dem *Gesetz von Paschen* für die Festigkeit von tiefkaltem Stickstoffgas ($p = 1 \text{ bar}$, $T = -195 \text{ °C}$ (ca. 79 K)) in Abhängigkeit der Massendichte berechnet wird [13] [72]. So zeigt sich, dass die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff im Wesentlichen vom Vorhandensein der Menge gasförmigen Stickstoffs abhängt bzw. dieser den maßgeblichsten festigkeitsmindernden Einfluss darstellt.

Die zuvor erklärte elektrische Kurzzeit-Spitzenfeldstärke $E_{D, \text{Spitze}}$ von 29 kV/mm stellt eine erste Mindestfestigkeit für Flüssigstickstoff dar, um eine Einschätzung derer vornehmen zu können. Eine allgemeingültige Quantifizierung der elektrischen Festigkeit von Flüssigstickstoff ist so ohne weiteres nicht möglich, da diese von zu vielen Einflussparametern abhängt, welche in Tabelle 2.2 veranschaulicht sind.

Ein großer Teil von Untersuchungsergebnissen zur elektrischen Durchschlagsspannung von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit der elektrischen Spannungsform, Elektrodengeometrie, Abstand, Druck und Temperatur etc. sind in [73] in einem Übersichtsdiagramm dargestellt. In Abbildung 2.11 ist auszugsweise die Durchschlagsspannung von Flüssigstickstoff unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung dargestellt.

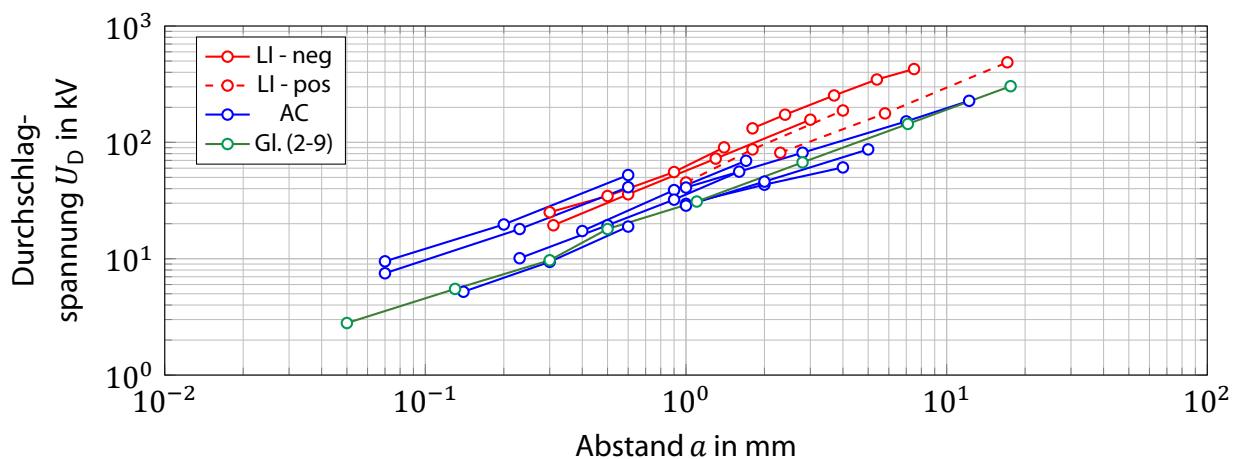


Abbildung 2.11: Auszug elektrischer Durchschlagsspannungen von LN_2 in Abhängigkeit vom Abstand a . (modifiziert nach [73])

Weitere detaillierte Ergebnisse zu den technischen elektrischen Kurzzeit-Festigkeiten von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit individueller Einflussparameter finden sich zudem in den technischen Broschüren [23], [74] und [75] der *CIGRÉ*.

2.5 Vergrößerungsgesetze

Ein weiterer Aspekt, der für die Auslegung von ausgedehnten elektrischen Betriebsmitteln äußerst wichtig ist, ist der festigkeitsmindernde Einfluss der Vergrößerungsgesetze. Unter den Vergrößerungsgesetzen ist allgemein zu verstehen, dass durch Vergrößerung eines elektrischen Isoliersystems, bspw. in seiner Isolierlänge oder im Isoliervolumen, die Anzahl der Defekte und Fehlstellen statistisch ansteigen. Das wiederum führt zu einer Reduzierung der elektrischen Gesamtfestigkeit des Isoliersystems im Vergleich zu den, in herunterskalierten Laborexperimenten ermittelten elektrischen Festigkeitswerten.

Die Vergrößerungsgesetze werden unterteilt in den Volumeneffekt, Flächeneffekt, Effekt der großen Anzahl sowie den Zeiteffekt (Lebensdauergesetz) [64].

Für die Auslegung von elektrisch isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystemen stellen der Volumen- und Flächeneffekt die größte Beeinflussung dar. Zum einen sind Kabelsysteme viele Kilometer lang, was zu großen Leiteroberflächen führt (Flächeneffekt). Zum anderen haben Kabelsysteme aus Effizienzgründen eine höhere Übertragungsspannung, wodurch eine dickere Isolierung zur sichereren Trennung der elektrischen Potentiale auf einer langen Kabelstrecke benötigt wird (Volumeneffekt). Für Flüssigstickstoff wurden über Jahrzehnte intensive experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Flächen- und Volumeneffekt auf die elektrische Festigkeit durchgeführt. Aus den Erkenntnissen wurden die empirischen Formalismen abgeleitet. Diese liefern zwar noch immer nicht die allgemeingültige quantitative elektrische Festigkeit für Flüssigstickstoff, jedoch die Möglichkeit die elektrische Festigkeit für eine spezifische Anwendung, unter Hinnahme statistischer Unsicherheiten, in erster Näherung zu ermitteln.

2.5.1 Volumeneffekt

In Abbildung 2.12 ist die elektrische Spitzenfestigkeit, bei 50 % Durchschlagwahrscheinlichkeit, von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit des entscheidenden belasteten Isolierolumens $\alpha \% SLV$ (engl.: *SLV* = Stressed Liquid Volume) dargestellt.

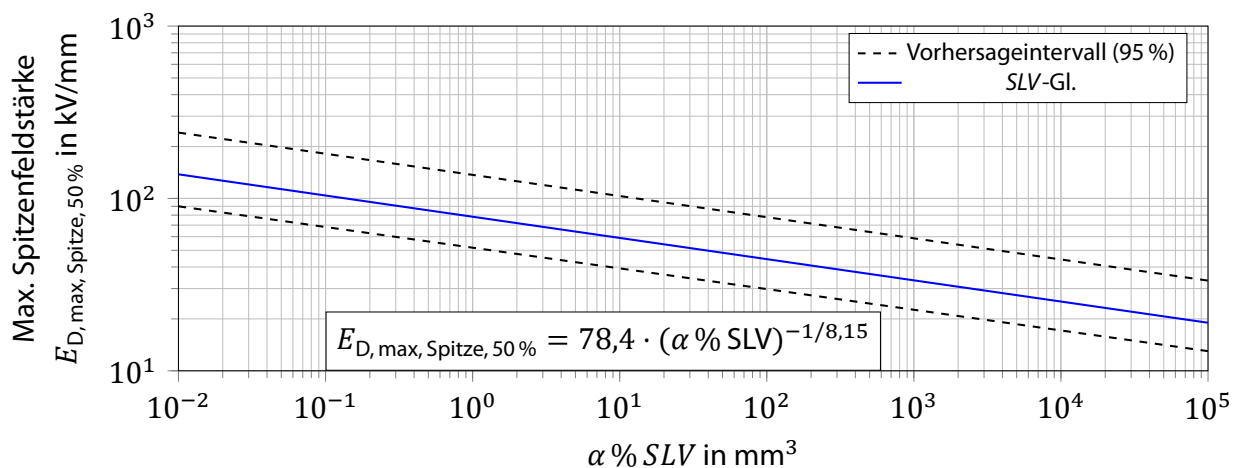


Abbildung 2.12: Elektrische Festigkeit von LN_2 in Abhängigkeit vom entscheidend belasteten Isolierolumen $\alpha \% SLV$. (modifiziert nach [76]).

Zu erkennen ist, dass die maximale Spitzenfeldstärke $E_{D,max,Spitze,50\%}$ mit zunehmendem entscheidend belasteten Isolierolumen abnimmt. Das entscheidend belastete Isolierolumen ist als das Teilvolumen der Isolierung zu verstehen, in dem die elektrische Feldstärke größer als das Produkt aus maximaler Spitzenfeldstärke $E_{D,max,Spitze}$ und entscheidendem Faktor α ist. Der Faktor α bemisst den entscheidenden Isolierolumenanteil, dessen beinhaltete Defekte das Versagen der Isoliersystems verursachen. Wie bereits zuvor in Abschnitt 2.4 beschrieben, entstehen die wesentlichen festigkeitsmindernden Defekte in Flüssigstickstoff durch das Vorhandensein von N_2 -Gasblasen. Für Mineralöl und SF_6 wurde für α ein Wert von über 0,9 ermittelt [58] [77]. Bei Flüssigstickstoff fällt α mit 0,81 bei 77 K und 1.013 mbar geringer aus.

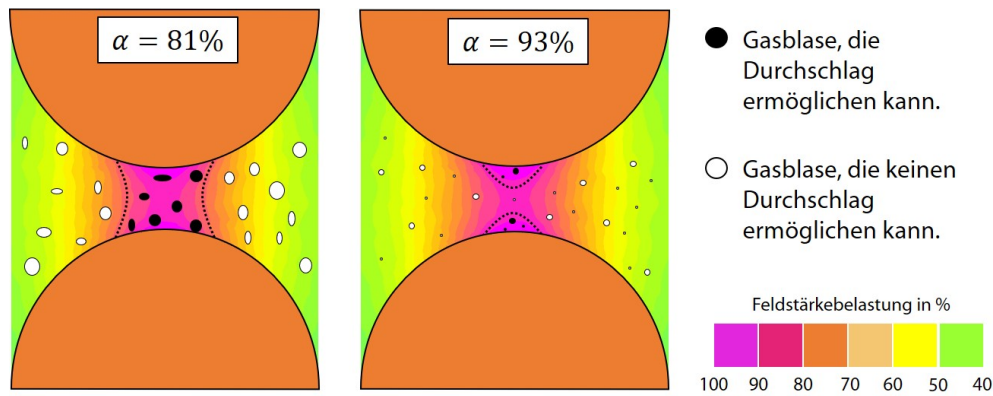


Abbildung 2.13: Qualitative Veranschaulichung des entscheidenden belasteten Isoliervolumens α % SLV in einer parallel-zylindrischen Leiteranordnung in Abhängigkeit des entscheidenden Faktors α . (modifiziert nach [76])

Wird nun, wie in Abbildung 2.13 gezeigt, den Druck p und die Temperatur T von Flüssigstickstoff variiert, so verändert dies die Anzahl an N_2 -Gasblasen sowie das für den Durchschlag entscheidende Isoliervolumen α % SLV . Bei steigendem Druck steigt die elektrische Festigkeit im LN_2 -Isoliervolumen, da der Druck in den N_2 -Gasblasen ansteigt, was eine Erhöhung der elektrischen Festigkeit in den Gasblasen bewirkt. Durch Reduzierung der Temperatur wird ein Teil des gasförmigen Stickstoffs verflüssigt, sodass eine geringere Anzahl an festigkeitsmindernden N_2 -Gasblasen im Isoliervolumen vorhanden sind und die elektrische Festigkeit somit ansteigt. Sowohl die Drucksteigerung in den N_2 -Gasblasen als auch die Temperaturreduzierung führen somit zu einer Reduzierung des entscheidenden Isoliervolumens α % SLV . Als Quantifizierung der Volumenreduzierung dient der entscheidende Faktor α [76].

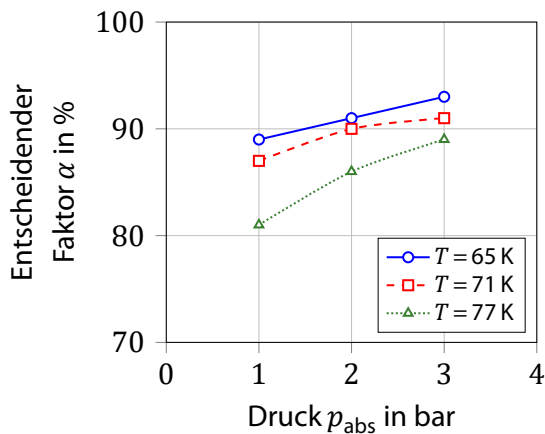


Abbildung 2.14: Verlauf des entscheidenden Faktors α in Abhängigkeit des absoluten Drucks p_{abs} . (modifiziert nach [76])

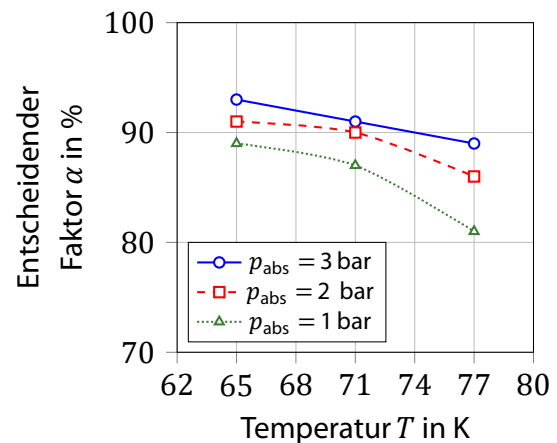


Abbildung 2.15: Verlauf des entscheidenden Faktors α in Abhängigkeit der Temperatur T . (modifiziert nach [76])

Wie den Abbildungen 2.14 und 2.15 zu entnehmen ist, erreicht α bei einer Temperatur von 65 K und einem Druck von 3 bar einen Wert von 0,93, was zu einer erheblichen Festigkeitssteigerung von Flüssigstickstoff führt [78]. So wird ersichtlich, dass die elektrische Festigkeit der kryogenen Flüssigkeit Stickstoff stark abhängig von den Umgebungsbedingungen Druck und Temperatur – zusammengefasst im Faktor α – und demnach von entscheidender Bedeutung für die Auslegung von elektrischen kryogenen Isoliersystemen ist [76]. Die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff

steigt bei einer konstanten Temperatur von 77 K um 40 bis 75 %, wenn der Druck von 1 auf 3 bar erhöht wird. Andererseits steigt die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff um 10 bis ca. 35 %, wenn die Temperatur von 77 auf 65 K bei einem Druck von 1 bar reduziert wird. In der Praxis werden supraleitende elektrische Betriebsmittel bis zu einem Druck von 16 bar ausgelegt, was nach der druckabhängigen Verhalten des Volumeneffektes einen weiteren festigkeitsverbessernden Effekt mit sich bringt [77] [79] [80].

Mit Zunahme von α wird das entscheidend belastete Isoliervolumen α % SLV stetig kleiner, bis es sich nur noch auf den Volumenbereich direkt vor der Leiteroberfläche befindet. Bei ausgedehnten Systemen und einem hohen α -Faktor nimmt somit die Leiteroberfläche, sprich der Flächeneffekt, stetig mehr Einfluss auf die elektrische Festigkeit. Der explizite Übergang zwischen beiden Vergrößerungsgesetzen bzw. die Einflussüberlagerung beider Effekte ist nicht exakt bekannt und bei jeder elektrischen Isolieranordnung individuell zu untersuchen [81] [82].

2.5.2 Flächeneffekt

Abbildung 2.16 zeigt die elektrische Spitzenfestigkeit, bei einer 63 % Durchschlagwahrscheinlichkeit, von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit der entscheidend belasteten Fläche α % SEA (engl.: SEA = Stressed Electrode Area).

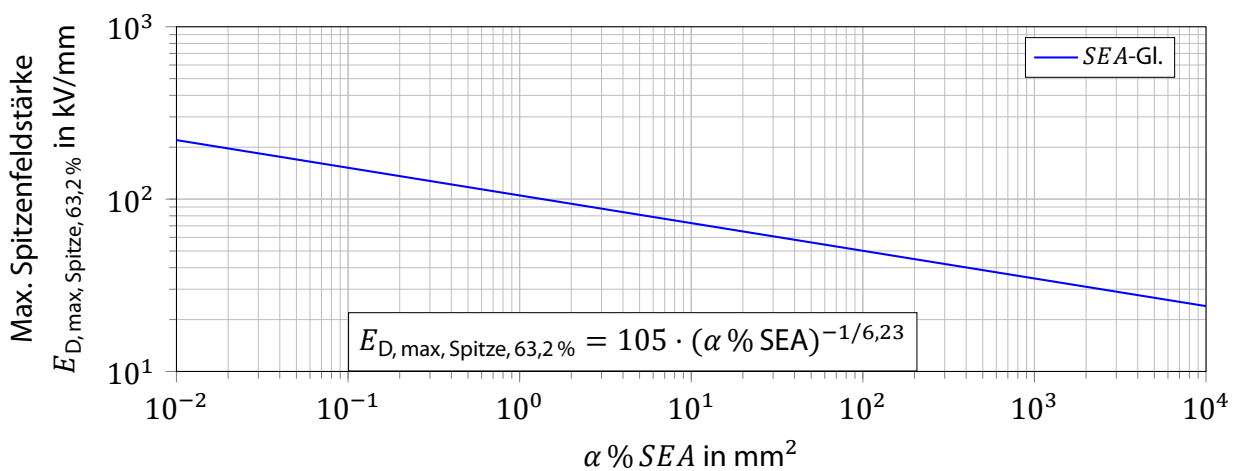


Abbildung 2.16: Elektrische Festigkeit von LN_2 in Abhängigkeit der entscheidend belasteten Fläche α % SEA . (modifiziert nach [81])

Beim Flächeneffekt von Flüssigstickstoff hängt die maximale Spitzenfeldstärke $E_{D, \max, \text{Spitze}, 63,2\%}$ im Wesentlichen von der Oberflächenbeschaffenheit und weniger von der Temperatur und dem Druck ab. Je rauer die Oberfläche ($R_a \geq 1 \mu\text{m}$), desto mehr führen mikroskopische Metallspitzen zu einer Erhöhung der lokalen elektrischen Feldstärke. Hohe lokale elektrische Feldstärken an den mikroskopischen Metallspitzen können u. a. zur Auslösung von Ladungsträgern aus der Leiteroberfläche führen, die wiederum als Startelektronen für Entladungsprozesse dienen. Auch führen die hohen lokalen Feldstärken zu einer Überlastung des Flüssigstickstoff vor der Leiterfläche, was wiederum zu Vorentladungen und letztlich Durchschlägen führt. Experimentell wurde für die entscheidend belastete Fläche eines Leiters ein entscheidender α -Faktor ermittelt, der für Flüssigstickstoff einen Wert von 0,82 ($R_a \leq 1 \mu\text{m}$) besitzt. Demnach ist die Leiterfläche an der Reduzierung der elektrischen Festigkeit beteiligt, an der eine Feldstärke von mehr als 82 % der maximalen Spitzenfeldstärke herrscht. So ist der

Einfluss des oberflächenrauheitsabhängigen Flächeneffekts besonders in gering belasteten Isoliervolumen und hochbelasteten Leiteroberflächen dominant [81] [82].

Zum Flächeneffekt ist abschließend zu sagen, dass dieser im Vergleich zum Volumeneffekt wissenschaftlich das weitaus weniger untersuchte Vergrößerungsgesetz ist.

2.6 Elektrische Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff

Bei der elektrischen Überschlagfestigkeit handelt es sich, im Vergleich zur elektrischen Durchschlagfestigkeit, um keine weitere eigenständige elektrische Eigenschaft eines Isoliermediums. Die elektrische Überschlagfestigkeit entsteht zwischen Grenzflächen zweier Isoliermedien und kann entlang der Grenzfläche zu einem verfrühten elektrischen Überschlag und damit zum Versagen der Isolierung führen. Dabei wird davon ausgegangen, dass feste Isolierstoffe, welche im Allgemeinen eine höhere elektrische Durchschlagfestigkeit aufweisen, nicht den Überschlagprozess selbst beeinflussen, sondern Randbedingungen, wie Feldverteilung, Elektronenbereitstellung oder Elektronenverluste etc. verändern. Auch fällt die elektrische Überschlagfestigkeit nie größer als die elektrische Durchschlagfestigkeit der Gesamtanordnung ohne Grenzflächen aus [62].

Allgemein wird die Grenzflächenorientierung in isotropen Dielektrika für quasistationäre kapazitive elektrische Felder, zu Anschauungszwecken, in drei analytisch berechenbare Fälle unterschieden: Quer geschichtetes, längs geschichtetes und schräg geschichtetes Dielektrikum (siehe Abb. 2.17).

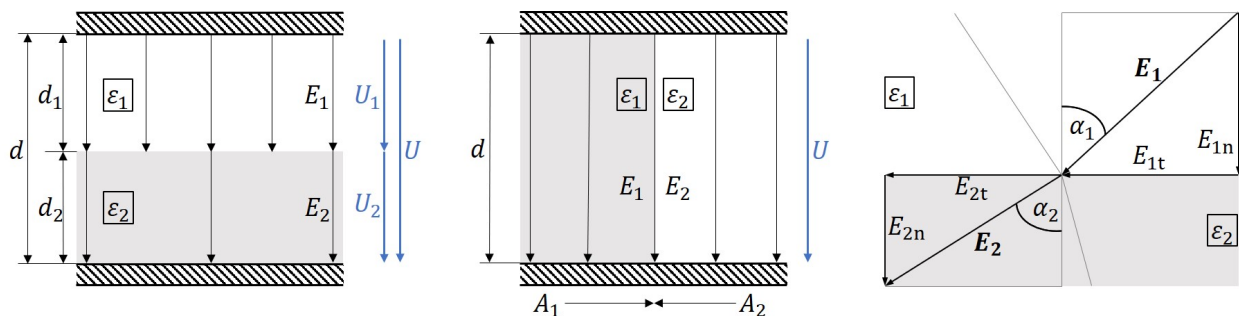


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der elektrischen Felder in geschichteten Dielektrika. Links: Quer geschichtet. Mitte: Längs geschichtet. Rechts: Schräg geschichtet. (modifiziert nach [13])

Bei isotropen quer geschichteten Dielektrika (Abb. 2.17 links) verläuft die Grenzfläche quer zum elektrischen Feld, sodass die Normalkomponenten der dielektrischen Verschiebungsdichten stetig übergehen. Da die Beträge der dielektrischen Verschiebungsdichten und elektrischen Feldstärken ihren Normalkomponenten entsprechen, folgt:

$$D_{1n} = D_{2n} \quad \begin{matrix} D_n = |\vec{D}| \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad D_1 = D_2 \quad (2-10)$$

$$\Rightarrow \text{mit } D = \varepsilon \cdot E \quad \Rightarrow \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

Wie dem zuvor gezeigten Zusammenhang zu entnehmen, verhalten sich die elektrischen Feldstärken umgekehrt zu den Permittivitäten. Demnach entstehen im Isoliermedium mit geringerer

relativer Permittivität größere elektrische Feldstärken. Die erhöhten Feldstärken können bei stark inhomogenen Anordnungen ($\eta < 0,2$) zu Teil- oder Vorentladungen führen, woraus letztlich Gleit- bzw. Oberflächenentladungen entstehen.

Der Einfluss quer geschichteter inhomogener Dielektrika verdeutlicht sich am stärksten dort, wo in einem Zwickel ein Tripel-Punkt entsteht. Ein Zwickel ist eine keilförmige Geometrie, die alle mikroskopischen komplexen Unebenheiten vereinfacht umschreibt. Im Extremfall entsteht ein Zwickel am Übergang eines elektrischen Leiters zum Dielektrikum, dem sogenannten Tripel-Punkt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass ein Zwickel aus einer Vielzahl quer geschichteter dielektrischer Teilstücke besteht, bei dem die Schichtdicke des niederpermittiven und elektrisch schwächeren Isoliermaterials stetig entlang der Grenzfläche zunimmt. [13]

Bei isotropen längs geschichteten Dielektrika (Abb. 2.17 Mitte) verläuft die Grenzfläche parallel zu den dielektrischen Verschiebungsdichten und elektrischen Feldstärken. Daraus folgt für das elektrische Feld und die dielektrische Verschiebungsdichte, dass deren Beträge denen der Tangentialkomponenten entsprechen. [13]

$$E_{1t} = E_{2t} \quad \begin{matrix} E_t = |\vec{E}| \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad E_1 = E_2 \quad (2-11)$$

$$\Rightarrow \text{ mit } D = \varepsilon \cdot E \quad \Rightarrow \quad \frac{D_1}{D_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Aus der vorherigen Herleitung ist zu entnehmen, dass sich die elektrische Feldstärkebelastung in längs geschichteten Dielektrika nicht ändert. Die Veränderung der dielektrischen Verschiebungsdichte führt dazu, dass sich auf der Oberfläche des Isoliermediums mit größerer relativer Permittivität weniger gebundene elektrische Ladungsträger pro Flächeneinheit sammeln.

Aufgrund der gleichen elektrischen Feldstärkebelastung in den längsgeschichteten Dielektrika sollte demnach die Überschlagfestigkeit entlang der Grenzschicht gleich der Durchschlagfestigkeit im jeweiligen Dielektrikum sein. In Experimenten stellt sich jedoch häufig heraus, dass die elektrische Festigkeit vermindert ist. Dieses Phänomen wird allgemein als „Grenzflächenproblem“ bezeichnet und kann verschiedene Ursachen haben. So könnten Störstellen schwach gebundene Ladungsträger begünstigend für Oberflächenentladungsprozesse zur Verfügung stellen. Auch führt eine hohe reale Oberflächenrauigkeit zu Verzerrungen der Feldverteilung entlang der Oberfläche, wodurch verfrühte Entladungen begünstigt werden können [13].

Um isotrope schräg geschichtete Dielektrika (Abb. 2.17 rechts) handelt es sich, wenn der Winkel α zwischen den Feldgrößen E und D und dem Flächenvektor \vec{A} einen Wert zwischen 0° ($E \parallel A$) bis 90° ($E \perp A$) annimmt. Aus der Division der Stetigkeitsbedingungen der dielektrischen Verschiebungsdichten (Gl. 2-10) und elektrischen Feldstärken (Gl. 2-11) folgt

$$\frac{E_{1t}}{E_{1n}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{r1}} = \frac{E_{2t}}{E_{2n}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{r2}}. \quad (2-12)$$

Der Quotient aus der Tangential- und Normalkomponente ist gleich dem Tangens des Winkels α , woraus aus Gleichung 2-12 mit

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (2-13)$$

das sogenannte „Brechungsgesetz“ elektrischer Feldlinien folgt, welches ebenfalls für die senkrecht dazu stehenden Äquipotentiallinien gilt. Dem Brechungsgesetz (Gl. 2-13) nach verhält sich der Winkel α proportional zur relativen Permittivität. Steigt also die relative Permittivität, werden die elektrischen Feldlinien von der Lotachse weg gebrochen und der Winkel α wird größer. Sinkt die relative Permittivität, werden die Feldlinien zur Lotachse hin gebrochen und der Winkel α wird kleiner [13]. Umgekehrt gilt demnach bzgl. eines steigenden Winkels α in einem Isoliersystem, bestehend aus einem festen Isolierstoff mit höherer relativer Permittivität umgeben von einem Isoliermedium (Gas oder Flüssigkeit) mit niedrigerer relativer Permittivität, dass die elektrische Feldstärkebelastung im niederpermittiven und elektrisch schwächeren Isoliermedium ansteigt. Nur unter Berücksichtigung des Grenzflächenproblems kann eine Neigung zu einer Verbesserung führen, da sich dadurch die Kriechweg- bzw. Überschlagstrecke der Oberflächenentladung verlängert. Dieser Umstand muss aber in experimentellen Untersuchungen explizit für die jeweilige Kombination an Isoliermedien und geometrischen Eigenschaften ermittelt werden. In realen komplexen Isoliersystemen treten die drei, zu Anschauungszwecken vereinfachten Fälle der Grenzflächenorientierung von inhomogenen isotropen Dielektrika fast immer in komplexer Kombination auf. Die exemplarischen Darstellungen aus Abbildung 2.17 können grundsätzlich für erste vereinfachte qualitative Veranschaulichungen makroskopischer wie auch mikroskopischer Effekte an Grenzflächen herangezogen werden [62]. Jedoch zeigen die Erkenntnisse empirischer Untersuchungen mitunter große Abweichungen zu theoretischen Modellvorstellungen. Somit sind bzgl. des elektrischen Überschlagverhaltens immer zwingend experimentelle Untersuchungen durchzuführen, um explizite Erkenntnisse über das elektrische Überschlagverhalten individuell komplexer Isoliersysteme zu erhalten und um diese geometrisch möglichst kompakt und sicher auszulegen.

Eine Möglichkeit zur Untersuchung von längs geschichteten Dielektrika stellen unsymmetrische ebene Dreieck-Platte-Elektrodenanordnungen dar (Abb. 2.18). Diese werden entweder auf der Oberfläche der zu untersuchenden Isoliermaterialien mechanisch fixiert oder aber mittels galvanischer Oberflächenbehandlung in einem Ätzprozess hergestellt. Die metallischen Elektroden können, bspw. wie beim Ätzen, eine sehr geringe Materialstärke s im 1/10 mm-Bereich erreichen.

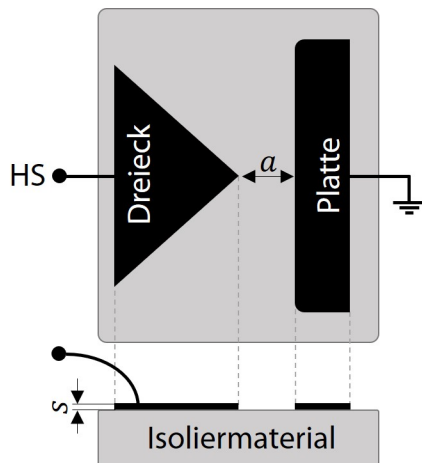


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung einer unsymmetrischen ebenen Dreieck-Platte Elektrodenanordnung.

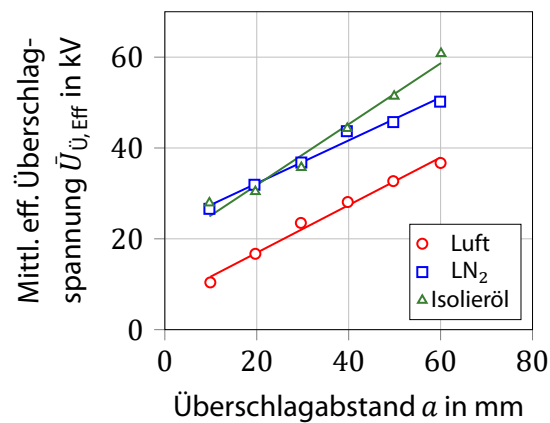


Abbildung 2.19: Vergleich der mittleren effektiven Überschlagspannung $\bar{U}_{U, \text{Eff}}$ von Isolieröl und LN_2 in Abhängigkeit vom Überschlagabstand a . (modifiziert nach [83])

Vergleichende Untersuchungsergebnisse an GFK-Isoliermaterial in Isolieröl und Flüssigstickstoff zeigen in Abbildung 2.19, dass die mittlere effektive Überschlagspannung unter 50 Hz Wechselspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit des Überschlagabstandes bis ca. 30 mm annähernd gleich ausfällt. Während die mittlere effektive Überschlagspannung von Isolieröl ab einem Abstand von 30 bis 60 mm weiterhin linear zunimmt, zeichnet sich bei Flüssigstickstoff aber ein zunehmend degressiver Verlauf ab. Bei einem Überschlagabstand von 60 mm beträgt die Überschlagspannung in Flüssigstickstoff nur noch 83 % im Vergleich zu Isolieröl.

Einen gleichartigen degressiven Verlauf zeigen ebenfalls Untersuchungsergebnisse zum Überschlagverhalten an GFK-Isoliermaterial unter positiver Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Dreieck-Platte-Elektrodenanordnungen auf, wie in Abbildung 2.20 dargestellt ist. Es wird zudem ersichtlich, dass die Blitzstoßüberschlagfestigkeit durchweg höher und bei ungefähr dem Zweifachen der Wechselspannungsüberschlagfestigkeit liegt [84]. Weitere Untersuchungen zeigen einen festigkeitsmindernden Einfluss der negativen Polarität auf die Blitzstoßüberschlagfestigkeit. Ab einem Überschlagabstand von 10 mm nimmt die elektrische Überschlagfestigkeit unter negativer Blitzstoßbeanspruchung stärker ab als bei positiver Polarität. So beträgt die Blitzstoßüberschlagfestigkeit bei negativer Polarität und einem Überschlagabstand von 40 mm nur noch ca. 80 % der Blitzstoßüberschlagfestigkeit bei positiver Polarität. Das eingesetzte Isoliermaterial PA6 und PTFE nimmt dabei nur einen geringen bis vernachlässigbaren Einfluss, wie Abbildung 2.21 zu erkennen ist [85].

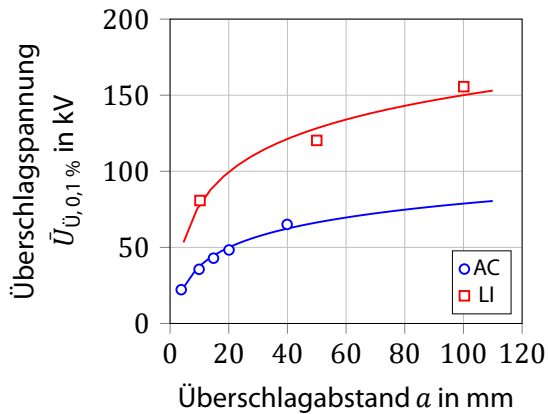


Abbildung 2.20: Vergleich von positiver LI- und AC-Überschlagspannung, bei einer Überschlagwahrscheinlichkeit von 0,1 %, von GFK-Isoliermaterial in LN_2 . (modifiziert nach [84])

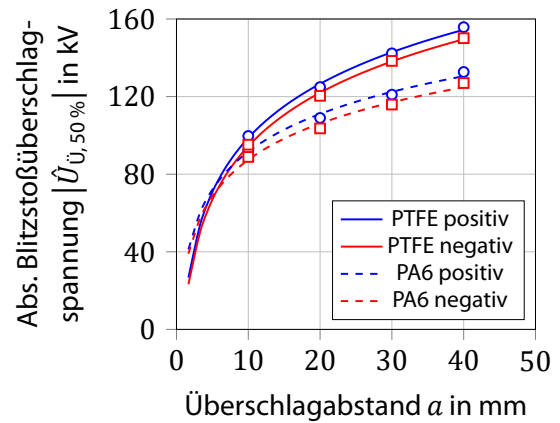


Abbildung 2.21: Darstellung der polaritätsabhängigen Blitzstoßüberschlagspannung $\hat{U}_{\bar{U},50\%}$, bei einer Überschlagwahrscheinlichkeit von 50 %, von PA6- und PTFE-Isoliermaterial in LN_2 . (modifiziert nach [85])

Dreieck-Platte-Elektrodenanordnungen sind aufgrund der spitzen Dreieckelektrode zwar gut geeignet, um speziell Vorentladungsprozesse und deren Einfluss auf Oberflächenentladungen zu untersuchen, jedoch ist die Anordnung extrem inhomogen ($\eta \ll 0,2$) und somit nur wenig vergleichbar mit parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen, die im Allgemeinen homogener ausfallen. Ein Nachteil kann auch die mechanische Fixierung der Elektroden sein, wodurch sich aufgrund materieller Unebenheiten ein Spalt zwischen den Elektroden-Rückseiten und dem Isoliermaterial bilden kann, der die Entladungsvorgänge beeinträchtigt. Auch lässt die geringe Dicke und die entstehenden schärferen metallischen Kanten eine Beeinflussung der Untersuchungen, mit Hinblick auf zusätzliche Vorentladungsprozesse, nicht ausschließen.

Um dem Grenzflächenproblem längs geschichteter Dielektrika bzw. den Oberflächenentladungen entgegenzuwirken, wurden Untersuchungen an einfachen zylindrischen Stützermodellen (Abb. 2.22) gleichen Materials (PTFE) in ebenen zylindrischen Elektrodenanordnungen in Flüssigstickstoff mit zusätzlichen Schirmprofilen durchgeführt [86]. Dabei wurde die Gesamthöhe von 15 mm sowie die Profilform ($r_{\text{Profil}} = 1,5 \text{ mm}$) konstant gehalten, aber die Anzahl (keins, ein Profil oder zwei Profile) und die Position (oben, unten sowie oben und unten) der Profile an den Stützermodellen variiert (Abb. 2.22 Typ 1 bis 4). Weiterhin wurde bei gleichen Profilkonfigurationen die Überschlagstrecke von 35 mm konstant gehalten und die Gesamthöhe variiert (Abb. 2.22 Typ A bis C). Durch das Hinzufügen von Schirmprofilen folgt an deren Orten jedoch eine partielle Beeinflussung der elektrischen Feldverteilung von schräg bis hin zu quer geschichteter Dielektrika.

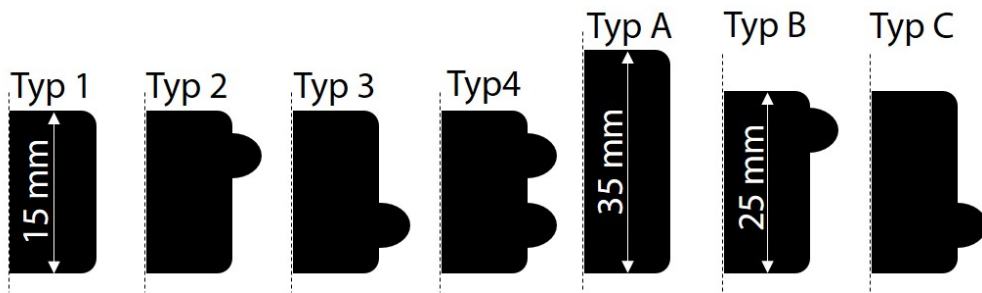


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der einfachen zylindrischen Stützermodelle ohne und mit Schirmprofilen. (modifiziert nach [86])

Bei gleichbleibender Höhe von 15 mm zeigt sich, dass zwei Schirmprofile (Typ 4) mit einer maximalen Überschlagstrecke von 35 mm zu einer Verbesserung der Überschlagspannung um 27 % führen. Ein Schirmprofil (Typ 2 & Typ 3) bewirkt indes nur eine Steigerung um 12 %. Bei gleichbleibender Überschlagstrecke zeigt sich Gegenteiliges. Das Stützermodell ohne Schirmprofil (Typ A) mit einer Höhe von 35 mm, erreicht im Vergleich zum Stützermodell mit zwei Schirmprofilen und einer Höhe von 15 mm (Typ 4) eine Erhöhung der Überschlagspannung um 40 % (Abb. 2.23). Daraus wird ersichtlich, dass die Höhe der Überschlagfestigkeit maßgeblich von der Gesamthöhe des Stützermodells abhängt, bei gleicher Gesamthöhe (Typ 1 - 4) aber zusätzliche Schirmprofile eine Verbesserung der Oberflächenentladungseigenschaften bewirken. [86]

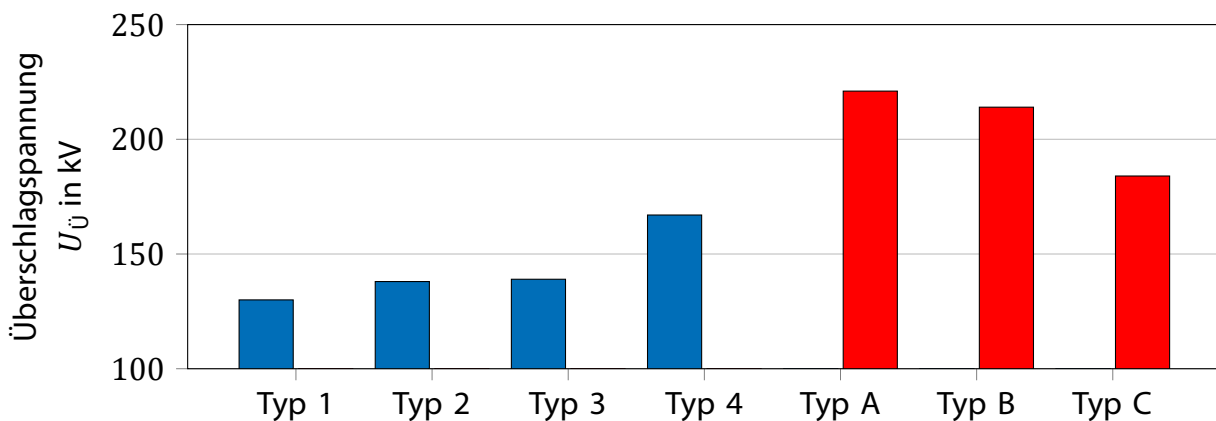


Abbildung 2.23: Untersuchung des Einflusses von Schirmprofilen auf das Überschlagverhalten von Stützermodellen. Typ 1 bis 4: Gleiche Gesamthöhe. Typ 4 und Typ A bis C: Gleiche Überschlagstrecke. (modifiziert nach [86])

Bezüglich schräg geschichteter Dielektrika bestätigen Simulationsergebnisse zum Verlauf des elektrischen Feldes prinzipiell eine Erhöhung der elektrischen Spitzenfeldstärke in Abhängigkeit der relativen Permittivität und des Neigungswinkels α eines Stützermodells in einer coaxialen Leiteranordnung. Hierbei wurde der Neigungswinkel von 15 bis 90° in 15°-Schritten variiert und die normierte relative Erhöhung der Feldstärke für die Materialien Epoxidharz (G10, $\epsilon_r = 5,2$), PA6 (Nylon, $\epsilon_r = 3,5$) und PTFE (Teflon, $\epsilon_r = 2,1$) ermittelt (Abb. 2.24). Keine Erhöhung der Feldstärke fand bei einem Neigungswinkel von

90° (senkrecht) statt, da es sich um den Bezugswert handelt. Den geringsten Anstieg in Flüssigstickstoff zeigt das Material PTFE mit einer Zunahme der maximalen Feldstärke um ca. 8 %. Die höchste Steigerung der elektrischen Feldstärke entsteht beim Epoxidharz mit 20 %. Das Material PA6 liegt zwischen den beiden anderen Materialien. Somit führt ein Neigungswinkel dazu, dass die maximale elektrische Feldstärke erhöht wird und es somit zu einem verfrühten Verlust der elektrischen Festigkeit kommen könnte. Gleiches gilt für die Auswahl des Materials des Stützisolators. Je höher dessen relative Permittivität ausfällt, desto höhere Werte nimmt auch die maximale elektrische Feldstärke an. Allerdings zeigt sich andererseits auch, dass die Überschlagstrecke bei einem Neigungswinkel von 15° viermal länger ist als bei einem Neigungswinkel von 90°, was wiederum ein Vorteil bei der Entstehung bzw. Entwicklung einer Oberflächenentladung wäre [87].

In Experimenten zur Untersuchung der Entstehung von Gleitentladungen sowie deren Vorentladungen an Tripel-Punkten in Flüssigstickstoff wurde das Überschlagverhalten an dünnen Polyimidfolien untersucht [88]. Dabei wurde an zwei verschiedenen Materialstärken s von 75 und 125 μm , bei variablem Überschlagabstand a , die mittlere effektive Überschlagspannung zwischen ebenen Zylinder Elektroden mit einem Verrundungsradius von 1 mm gemessen. Aus den Messergebnissen in Abbildung 3.8 ist ersichtlich, dass es eine lineare Abhängigkeit der mittleren Überschlagspannung $U_{\text{Ü}}$ von dem Überschlagabstand a nach folgender Beziehung gibt:

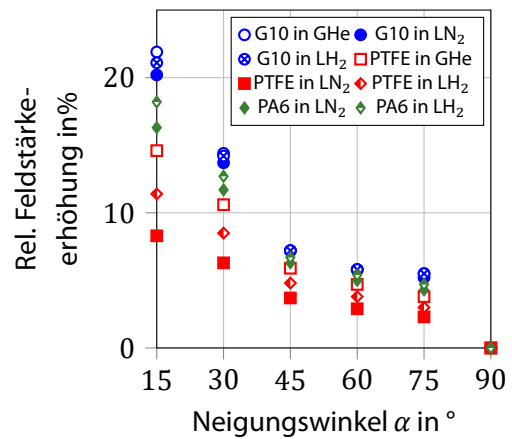


Abbildung 2.24: Relative elektrische Feldstärkeerhöhung in Abhängigkeit des Neigungswinkels α und der relativen Permittivität ϵ_r . (modifiziert nach [87])

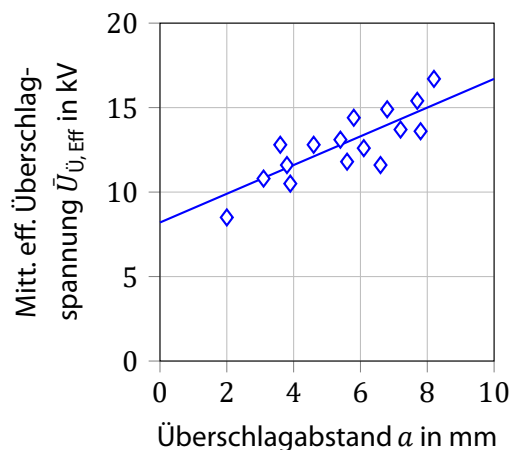


Abbildung 2.25: Überschlagverhalten in LN₂ an Gleitanordnungen in Abhängigkeit des Überschlagabstandes. (modifiziert nach [88])

$$\bar{U}_{\ddot{U}, \text{Eff}} = U_{\text{TE, Ein}} + a \cdot u_a \quad \text{mit} \quad u_a = \frac{\Delta U_{\ddot{U}}}{\Delta a}. \quad (2-14)$$

Die Variable u_a beschreibt den Spannungsbedarf der Entladung bei zunehmendem Überschlagabstand a . Der Schnittpunkt mit der Ordinate veranschaulicht die allgemeine Theorie, dass es zur Entstehung bzw. zum Auftreten einer Oberflächenentladung oder eines Überschlags zuvor Vorentladungen, wie in Abbildung 2.26 dargestellt, bedarf. Bei diesen handelt es sich im ersten Schritt um sogenannte Teilentladungen (kurz: TE), die ab einem Schwellenwert der Spannung – der sogenannten Einsatzspannung $U_{\text{TE, Ein}}$ – einsetzen.

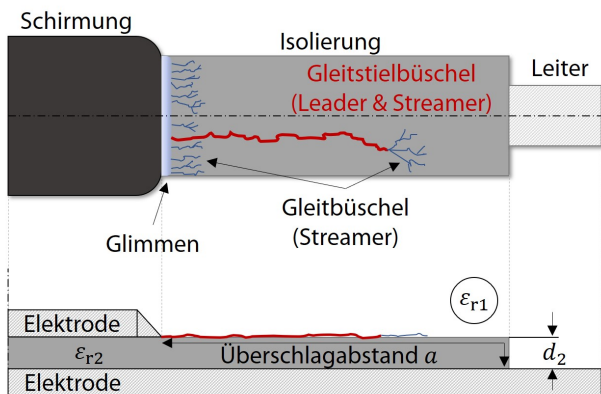


Abbildung 2.26: Darstellung des Entstehungsprozesses einer Oberflächenentladung am Beispiel eines ungesteuerten koaxialen Kabelendes (oben) sowie Herleitung einer Elektrodenanordnung zur experimentellen Nachstellung dieser Gleitanordnung (unten). (modifiziert nach [89])

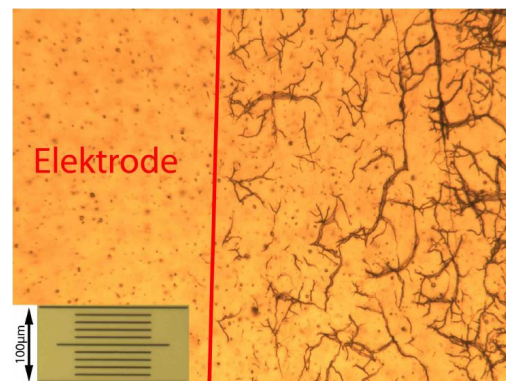


Abbildung 2.27: Spuren von Oberflächenentladungsprozessen auf der Oberfläche einer Polyimidfolie. [90]

Teilentladungen entstehen allgemein dort, wo lokale Feldstärkeüberhöhungen im Mikroskopischen zu einem unvollkommenen Durchschlag innerhalb oder Überschlag auf der Oberfläche eines Isoliermaterials führen. Bei ausreichend hohen elektrischen Feldstärken, wie sie speziell bei Gleitanordnungen (Abb. 2.26) bedingt durch die großen Querkapazitäten der Isoliermaterialien sowie hohen tangentialen Feldstärkekomponenten entstehen, folgen aus den Teilentladungen sichtbare oberflächliche Glimmentladungen. Durch Steigerung der Spannung oder zeitlich anhaltender partieller Erosion des Isoliermaterials am Ort des Auftretens der Entladungen, wie durch thermisches Aufschmelzen oder chemisch erosive Zersetzungsprodukte, entwickeln sich Entladungskanäle entlang des elektrischen Feldes auf dem Isoliermaterial weiter zu Gleitbüschelentladungen (Streamer) aus. Auch begünstigt eine zusätzlich eintretende Thermoionisation, bei genügend großen Stromdichten aus den Querkapazitäten, eine stetig fortschreitende Weiterentwicklung der Gleitbüschelentladung bis hin zu einer Gleitstielbüschelentladungen (Leader + Streamer). Ab einer genügend großen Überbrückung entlang des Isoliermaterials in Richtung des elektrischen Gegenpotentials kommt es letztlich zum kompletten Versagen der Isolierung und dem vollen elektrischen Überschlag. Sowohl bereits durch das Einwirken der Vorentladungen als auch den Überschlägen kommt es dort, wo sich die elektrischen Entladungskanäle ausbilden zu leitfähigen Kohlenstoffrückständen, wie in Abbildung 2.27 gezeigt [64] [91] [92].

Aus experimentellen Untersuchungen zur Einsatzspannung von Teilentladungen an Gleitanordnungen konnte folgende näherungsweise allgemeingültige Beziehung hergeleitet werden [88]:

$$U_{\text{TE, Ein}} = K \cdot \left(d_2 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^a \quad (2-15)$$

In Gleichung 2-15 sowie Abbildung 2.26 wird der Einfluss des quer geschichteten Dielektrikums durch die Beziehung $d_2 \cdot \varepsilon_1/\varepsilon_2$ verdeutlicht. Für den Exponenten a wurde in Experimenten ein Wert zwischen 0,45 bis 0,50 als guter Erfahrungswert ermittelt. Bei der Variablen K handelt es sich um einen individuellen Proportionalitätsfaktor. Für Luft, SF₆ und Isolieröl beträgt dieser experimentell zu ermittelnde Faktor 8, 21 und 20 [13]. Für den Einsatz von Teilentladungen an Gleitanordnungen in Flüssigstickstoff wurde aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen für a ein Wert von 0,68 und für K ein Wert von 300 ermittelt [88].

Zu dem Wertepaar ist zu sagen, dass dieses derzeit noch einer höheren Unsicherheit unterliegt, da wenige Untersuchungsergebnisse zum Überschlag- und Teilentladungseinsatzverhalten existieren. Es ist an den Werten aber erkennbar, dass besonders der Proportionalitätsfaktor sehr groß ausfällt. Im Vergleich zu den Faktoren von Luft, SF₆ und Isolieröl lässt das für Flüssigstickstoff in erster Näherung darauf schließen, dass Teilentladungen erst bei wesentlich höheren Spannungen einsetzen [13] [88].

Die zuvor beschriebenen empirischen Erkenntnisse sowie theoretischen Modellvorstellungen zu isotropen geschichteten Dielektrika und deren elektrisches Überschlagverhalten in Flüssigstickstoff liefern für spezifische Anwendungsfälle erste gute Ansätze für das allgemeine Verständnis der ablaufenden Entladungsprozesse sowie deren Einflussparameter. Es wird aber auch ersichtlich, dass die drei, zu Anschauungszwecken vereinfachten Vorstellungen von isotropen geschichteten Dielektrika in technischen Anwendungen selten bis nie alleine auftreten. Viel mehr treten diese Fälle in komplexem Zusammenhang miteinander auf, sodass zur Entwicklung spezifischer dreiphasiger Stützisolatoren für Dreileiter-Anordnungen experimentelle Untersuchungen zu deren elektrischem Überschlagverhalten in Flüssigstickstoff unerlässlich sind.

3 Elektrische Festigkeit einphasiger Leiteranordnungen

Um die geometrische Dimension eines dreiphasigen LN₂-isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystems definieren zu können, ist die Kenntnis der anordnungsspezifischen elektrischen Festigkeitseigenschaften von Flüssigstickstoff von essentieller Bedeutung. Über die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff existieren im Allgemeinen, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, empirische Formalismen, die es erlauben, Abschätzungen über die elektrische Festigkeit in Abhängigkeit der Beeinflussung durch die Vergrößerungsgesetze (Abschn. 2.5.1 und 2.5.2) zu treffen. Jedoch liegen diesen empirischen Formalismen keine Untersuchungsergebnisse aus einphasigen parallel-zylindrischen und nur teilweise von zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen zu Grunde, sodass nicht eindeutig bekannt ist, ob die Formalismen der Vergrößerungsgesetze auf dreiphasige LN₂-isolierte supraleitende Hochspannungskabelsysteme anwendbar sind. Somit sind empirische Untersuchungen zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in repräsentativen experimentellen Versuchsanordnungen notwendig, deren Ergebnisse als Referenzwerte für elektrische Durch- und Überschlagfestigkeitsuntersuchungen in Flüssigstickstoff dienen. Zudem findet dadurch die Einordnung der ermittelten anordnungsspezifischen elektrischen Festigkeiten von Flüssigstickstoff in die empirischen Formalismen aus Abschnitt 2.5.1 und 2.5.2 statt.

3.1 Herleitung der Anordnungen zur Festigkeitsuntersuchung

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ergeben sich in einem dreiphasigen LN₂-isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystem zwei wesentliche elektrische Belastungen im flüssigen Stickstoff. Aus der dreiphasigen Wechselspannung resultiert zum Zeitpunkt t_1 (Abb. 2.7) durch die Leiter-Leiter-Spannungsbelastung eine maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung zwischen jeweils zwei Phasenleitern. Zum Zeitpunkt t_2 (Abb. 2.7) resultiert aus der Leiter-Erd-Spannungsbelastung eine maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung zwischen jeweils einem Phasenleiter und dem umgebenden geerdeten Rohrkryostaten. Die beiden zeitlich unterschiedlich auftretenden Feldstärkebeanspruchungen lassen sich mittels zweier experimenteller Versuchsanordnungen für einphasige Untersuchungen nachbilden. Die maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung zwischen den Phasenleitern wird für einphasige Untersuchungen mit einer parallel-zylindrischen Leiteranordnung nachgebildet, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Die maximale elektrische Feldstärkebeanspruchung zwischen den Phasenleitern und dem umgebenden geerdeten Rohrkryostaten wird für einphasige empirische Untersuchungen mit einer zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung nachgebildet, wie sie in Abbildung 3.2 dargestellt ist.

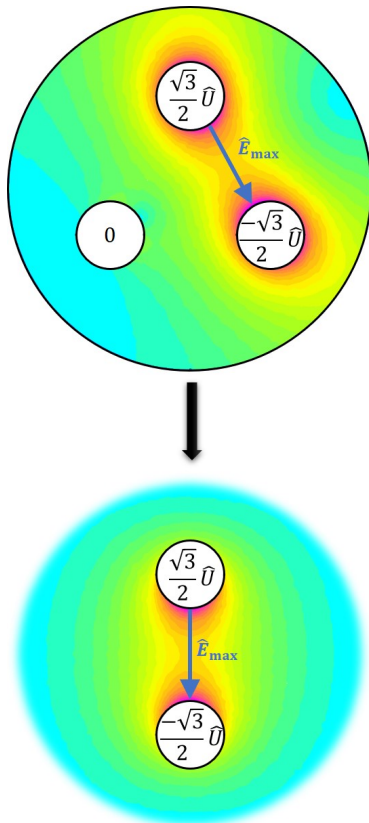


Abbildung 3.1: Herleitung der parallel-zylindrischen Leiteranordnung für einphasige experimentelle Untersuchungen.

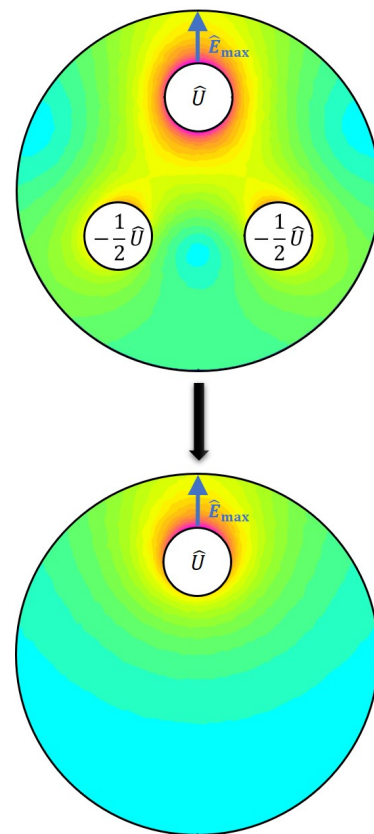


Abbildung 3.2: Herleitung der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung für einphasige experimentelle Untersuchungen.

An die Versuchsanordnungen stellen sich eine Vielzahl allgemeiner Anforderungen: Es sollen möglichst größere Leiterabstände einstellbar sein, bei denen es mit den im Labor befindlichen Hochspannungssystemen zum Durchschlag kommt. Des Weiteren ist über einen repräsentativen Bereich der Leiterdurchmesser zu variieren. Aufgrund der Vielzahl an notwendigen Durchschlagmessungen pro Abstands-Durchmesser-Konfiguration, müssen die Leiterelektroden aus einem robusten Material gefertigt sein, das durch die thermische Belastung der Entladungen auf den Elektrodenoberflächen möglichst wenig Degradation hervorruft. Mittels Oberflächenkonditionierungsverfahren werden die Abbrandspuren für eine erneute Verwendung beseitigt.

Weiterhin werden mehrere Leiterelektroden je Elektrodendurchmesser zur Verfügung gestellt, damit je Abstands-Durchmesser-Konfiguration mehrere Versuchsanordnungen eingesetzt werden können. Alle Leiterelektroden werden die gleiche, elektrisch belastete parallele Leiterlänge besitzen. Die Leiterelektroden müssen auf ein Gestell montierbar sein, das aus einem elektrisch isolierenden Kunststoff besteht, welcher zudem für den Einsatz in Flüssigstickstoff geeignet ist. Die Enden der Leiterelektroden müssen mit ausreichend großen Schirmelektroden zur elektrischen Feldsteuerung und Kontaktierung versehen werden.

Da alle elektrischen Voruntersuchungen in offenen EPP-Behältnissen durchgeführt werden, darf die Grundfläche der Versuchsanordnungen möglichst nicht mehr als 700×400 mm und die Höhe nicht mehr als 250 mm betragen, damit ein genügend großer Isolierabstand zu allen Seiten besteht und die Versuchsanordnungen komplett von flüssigem Stickstoff umschlossen sind.

3.2 Aufbau und Durchführung der Hochspannungsversuche

Die im Abschnitt 3.3 und 3.4 gezeigten Versuchsanordnungen dienen zum einen der Untersuchung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit von Flüssigstickstoff unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung. Zum anderen werden Erkenntnisse darüber erlangt, ob die empirisch ermittelten Formalismen der Vergrößerungsgesetze für Flüssigstickstoff (Abschn. 2.5.1 und 2.5.2) gelten und die Durchschlagergebnisse in diese einzuordnen sind. So kann zugleich evaluiert werden, ob ausgedehnte Systeme dreiphasiger, LN₂-isolierter, supraleitender Hochspannungskabelsysteme ebenfalls mittels der empirischen Formalismen der Vergrößerungsgesetze ausgelegt werden können.

Weiterhin werden die Versuchsanordnungen für die Untersuchung der Beeinflussung der Überschlagfestigkeit von abstrahierten Geometrieigenschaften auf Überschlagproben verwendet. So wird zudem evaluiert, wie benötigte Stützisolatoren für ausgedehnte Systeme dreiphasiger, LN₂-isolierter, supraleitender Hochspannungskabelsysteme ausgelegt werden müssen.

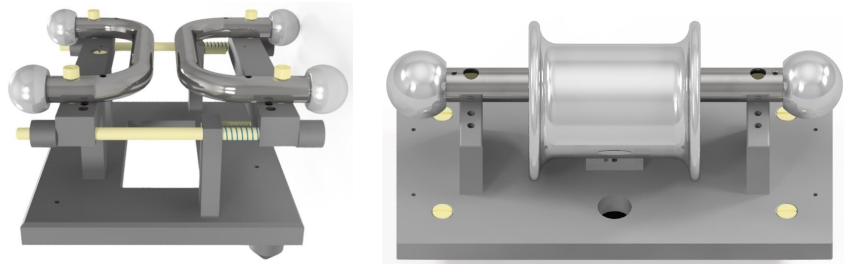
3.2.1 Versuchsplanung

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Untersuchungen werden vorab, im Rahmen einer Versuchsplanung, Annahmen getroffen, da aus zeitlicher Sicht nicht in jeder Versuchsanordnung jede Leiterelektroden-Überschlagproben-Konfiguration untersucht werden kann.

- Feststoffumwickelte Versuchsanordnungen sowie Überschlagproben werden nur unter Wechselspannungsbeanspruchung untersucht.
- Der Einfluss feststoffumwickelter Elektroden wird nur in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm untersucht.
- Da der Einfluss von Isoliermaterialien unabhängig von der Versuchsanordnung ist, werden Überschlagproben aus verschiedenen Materialien nur einmal in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm untersucht und daraufhin alle weiteren Untersuchungen mit dem am besten geeigneten Material durchgeführt.
- Die verschiedenen, auf Überschlagproben abstrahierten Geometrieigenschaften wie Spalt und Taillierung, werden nur in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm untersucht, da angenommen werden darf, dass die Erkenntnisse anordnungsunabhängig sind.
- Der Einfluss der Neigung auf die Überschlagfestigkeit wird nur in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm untersucht, da diese geometrische Eigenschaft an einem Stützisolator nur zum umgebenden, geerdeten Rohrkryostaten hin realisiert werden.

Aus den vorangegangenen Annahmen und Festlegungen ergibt sich die in Tabelle 3.1 dargestellte Übersicht der Versuchsplanung.

Tabelle 3.1: Versuchsplanung zur Darstellung der durchzuführenden Durch- und Überschlagexperimente, im Rahmen der Untersuchungen in der einphasigen parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung in LN₂.



Untersuchung	Parallel-zylindrische Leiteranordnung	Zentrisch-zylindrische Leiteranordnung
AC-Durchschlagfestigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
– Feststoffumwickelte Leiter	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
LI-Durchschlagfestigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AC-Überschlagfestigkeit		
Gerade Probe – Unterschiedliche Materialien	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Gerade Probe – Unterschiedliche Abstände	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerade Probe – Unterschiedliche Taillierungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerade Probe – Unterschiedliche Spaltmaße	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geneigte Probe – Unterschiedliche Neigungswinkel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

3.2.2 Wechselspannungsmessung

Die Durch- und Überschlagversuche unter Wechselspannungsbeanspruchung werden, wie in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt, in einem 300 kV-Prüffeld durchgeführt.

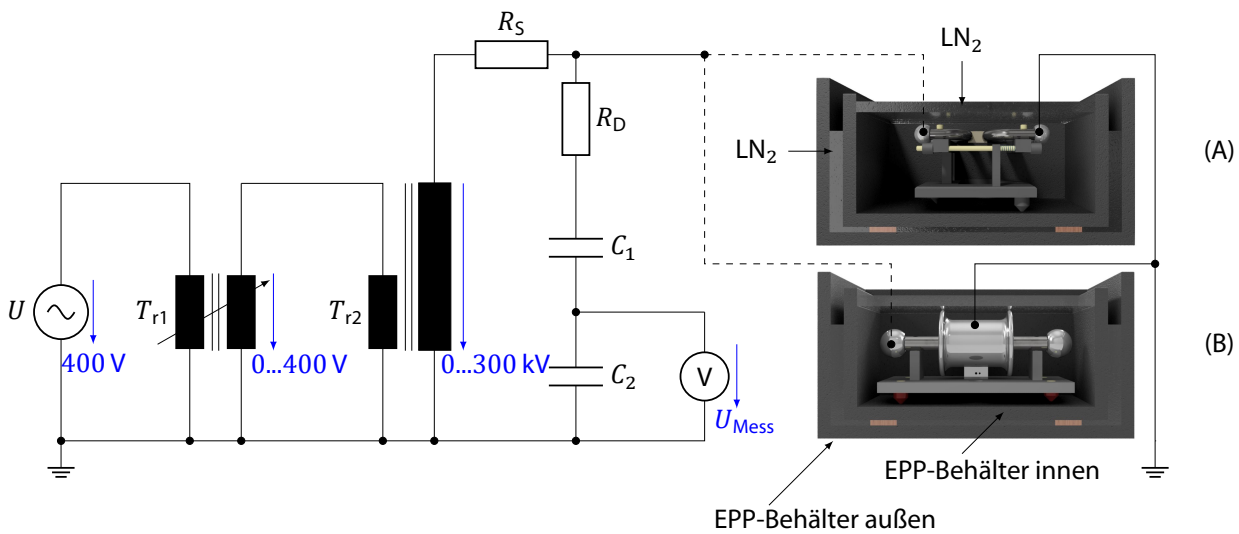


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit der parallel-zylindrischen Leiteranordnung (A) und der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung (B) für die Durch- und Überschlagversuche bei Wechselspannung.

Das 300 kV-Prüffeld besteht aus einem variablen Stelltransformator T_{r1} , der die primäre Niederspannung von 0 bis 400 V reguliert. Die Niederspannung wird durch einen Hochspannungstransformator T_{r2} auf bis zu 300 kV transformiert. Der maximale Nennstrom beträgt 1 A für eine Stunde oder dauerhaft 500 mA. Zum Schutz des Hochspannungstransformators ist ein Schutzwiderstand R_S mit ca. 600 k Ω verbaut, der den Kurzschlussstrom im Durchschlagfall auf den Nennstrom (500 mA) begrenzt. Die Hochspannung wird über einen gedämpft kapazitiven Messteiler, bestehend aus $R_D = 300 \Omega$, $C_1 = 1,05 \text{ nF}$ und $C_2 = 8,37 \mu\text{F}$, gemessen. Die über die Messkapazität C_2 abfallende Messspannung U_{Mess} wird mittels des Spannungsmessgerätes *DMI-552* der Fa. *Haefely* gemessen.

Die Versuchsanordnungen werden direkt hinter der Spannungsmessung, mittels flexibler Metallschläuche, an die Hochspannung angeschlossen. Die parallel- und zentrisch-zylindrische Leiteranordnung befindet sich in zwei offenen EPP-Behältern. Der äußere EPP-Behälter und der innere EPP-Behälter haben die inneren Abmessungen (H \times B \times T) von 332 \times 538 \times 704 mm und 360 \times 485 \times 685 mm. Der äußere EPP-Behälter dient einerseits zum Schutz falls der innere EPP-Behälter beschädigt oder undicht wird. Andererseits befindet sich im äußeren EPP-Behälter bereits eine geringe Menge Flüssigstickstoff, welche als Verbesserung der thermischen Isolierung des inneren EPP-Behälters dient. Im inneren EPP-Behälter, der mit Flüssigstickstoff gefüllt ist, befindet sich die jeweilige, am Hochspannungs-Messkreis angeschlossene Leiteranordnung. Die Verbindung der geerdeten Elektrode wird mittels einer Kupferlitze realisiert und am nächstmöglichen Bodenanschlusspunkt im 300 kV-Prüffeld angeschlossen.

Zu Beginn der Durchschlagversuche an den parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen wird die Versuchsanordnung in den LN₂-gefüllten EPP-Behälter gestellt und für ca. 20 Minuten abgekühlt, bis das übermäßige Sieden des flüssigen Stickstoffs abgeschlossen ist. Daraufhin werden die Elektroden der parallel-zylindrischen Leiteranordnung mittels dreier

elektrischer Durchschläge (kurz: DS) elektrisch konditioniert, da die Elektroden erstmalig zum Einsatz kommen und so etwaige mögliche Oberflächenrauheiten, die durch der Oberflächenkonditionierung nach Abschnitt 3.2.4 nicht beseitigt worden sind, eliminiert werden. Daraufhin wird mit der eigentlichen Durchschlaguntersuchung begonnen, indem insgesamt zehn Durchschlagspannungen je Elektroden-Abstands-Konfiguration ermittelt werden. Dabei wird darauf geachtet, dass die Durchschläge möglichst innerhalb einer Zeit von 10 bis 20 s stattfinden. Dies ist durch die Spannungssteigerungsgeschwindigkeit einstellbar aber auch limitiert, da die Steuerung nur über die Geschwindigkeiten 5 und 10 kV/s verfügt. Als Spannungswert wird der Effektivwert $\hat{U}_D/\sqrt{2}$ erfasst. Nach jeder abgeschlossenen Messung wird eine neue oder rekonditionierte Elektroden-Abstands-Konfiguration verwendet und die beschriebene Messprozedur von neuem durchgeführt.

Vom Grundprinzip her ist die Messprozedur ebenfalls für die Durchschlaguntersuchungen feststoffumwickelter parallel-zylindrischer Leiteranordnungen anzuwenden. Da es aufgrund des Durchschlages zur Zerstörung der Feststoffumwicklung kommt, kann eine Anordnung nur einmal genutzt werden und muss anschließend gegen eine neue (vorbereitete) Anordnung getauscht werden. Insgesamt werden bei den Durchschlaguntersuchungen feststoffumwickelter parallel-zylindrischer Leiteranordnungen fünf Durchschlagspannungen je Elektroden-Abstands-Feststoff-Konfiguration ermittelt.

Bei den Überschlagversuchen verhält es sich zu Beginn bzgl. des Abkühlprozesses wie bei den Durchschlagversuchen. Da sich nun jedoch eine Überschlagprobe im Aufbau befindet, wird auf eine Konditionierung mittels elektrischer Durchschläge verzichtet. Es werden daraufhin zehn elektrische Überschläge (kurz: ÜS) und die zugehörigen effektiven Überschlagspannungen $\hat{U}_Ü/\sqrt{2}$ erfasst. Bei den Untersuchungen von Überschlagproben in den parallel-zylindrischen Leiteranordnungen werden die Überschlagproben nach einem Durchschlag durch neue ersetzt und erneut für ca. 5 Minuten gewartet, bis die Überschlaguntersuchungen fortgeführt werden. Bei den Überschlagfestigkeitsuntersuchungen von Überschlagproben in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung hingegen können die Überschlagproben nicht nach jedem Überschlag ausgewechselt werden, da sich diese im Inneren der umgebenden geerdeten Rohrelektrode befinden.

Eine graphische Darstellung der zuvor beschriebenen Prozedur ist in einem Ablaufdiagramm in Anhang A.6 dargestellt.

3.2.3 Blitzstoßspannungsmessung

Die Durchschlagversuche unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung werden, wie in Abbildung 3.4 schematisch dargestellt, in einem 1 MV-Prüffeld durchgeführt.

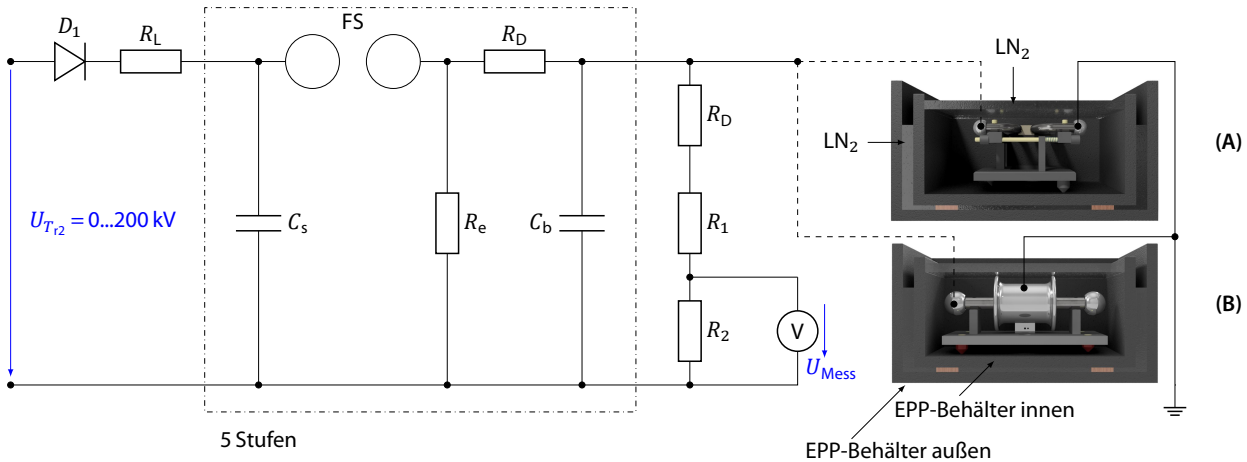


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit der parallel-zylindrischen Leiteranordnung (A) und der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung (B) für die Durchschlagversuche bei Blitzstoßspannung.

Das 1 MV-Prüffeld besteht aus einem variablen Stelltransformator T_{r1} (nicht eingezeichnet), der die primäre Niederspannung von 0 bis 230 V reguliert. Darauf folgt der Hochspannungstransformator T_{r2} (nicht eingezeichnet), durch den die Hochgleichspannung von bis zu 200 kV, mittels der Einweggleichrichtung durch die Diode D_1 und den Ladewiderstand R_L , zum Laden der Stoßkapazität C_s erzeugt wird. Nach dem Aufladen der Stoßkapazität auf einen gewünschten Spannungswert zündet die Zündfunkenstrecke, deren Abstand motorisch eingestellt wird, und entlädt sich über den Dämpfungswiderstand R_D in die Belastungskapazität C_b . Nach dem Umladen entlädt sich die Belastungskapazität C_b über die serielle Verschaltung vom Entladewiderstand R_e und dem Dämpfungswiderstand R_D . Die dabei entstehende Spannungsform ist hinter der Belastungskapazität C_b abgreifbar und entspricht zweier überlagerter Exponentialfunktionen verschiedener Zeitkonstanten, welche den charakteristischen Verlauf einer Stoßspannung ergeben. Durch die fünffache Parallelschaltung der Grundschialtung aus Abbildung 3.4 zu einer sogenannten Vervielfacherschaltung nach *E. Marx* steht eine nominale Stoßspannungsamplitude von 1 MV zur Verfügung.

Der Dämpfungswiderstand R_D beeinflusst maßgeblich den Anstiegsbereich der Stoßspannung, während die Reihenschaltung, bestehend aus dem Entladewiderstand R_e sowie dem Dämpfungswiderstand R_D , den Abfallbereich der Stoßspannung beeinflusst. Eine Blitzstoßspannung wird im Allgemeinen über eine Stirnzeit T_1 von $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ und eine Rückenhalbwertszeit T_2 von $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ charakterisiert. Der Scheitelwert der Stoßspannung darf dabei eine Abweichung von $\pm 5\%$ aufweisen.

Die erzeugte Stoßspannung wird durch den ohmschen Stoßspannungsmessteiler, bestehend aus den Widerständen R_1 und R_2 , gemessen. Der Dämpfungswiderstand R_D dient der Reduzierung entstehender Schwingungen beim Auftreffen der Stoßspannung auf den Messteiler. Direkt hinter dem Stoßspannungsmessteiler folgt der Anschluss der Leiteranordnungen mittels flexibler Metallschläuche, wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

Die Untersuchung der Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung wird in Anlehnung an das Spannungssteigerungsverfahren nach IEC 60243-3 [93] durchgeführt. Zu Beginn muss der Spannungswert der Startspannungsgruppe definiert werden, welcher 70 % der erwarteten Durchschlagspannung entsprechen soll. Dieser Wert kann entweder aus Erfahrungswerten oder Voruntersuchungen angenommen bzw. ermittelt werden. Hier wird angenommen, dass die Durchschlagspannung von Flüssigstickstoff unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung ca. das 1,0 bis 1,5-fache der Durchschlagspannung unter Wechselspannungsbeanspruchung beträgt. Jede Spannungsgruppe (kurz: SG) umfasst insgesamt drei Blitzstoßspannungsimpulse. Kommt es zu keinem Durchschlag (kurz: DS), wird die Spannung für die nächste Spannungsgruppe um 3 % des Spannungswertes der Startspannungsgruppe erhöht und die Messung wiederholt. Kommt es nach mindestens zwei Spannungsgruppen zu zwei Durchschlägen innerhalb einer Spannungsgruppe, ist die Messung erfolgreich beendet. Kommt es zuvor zu einem Durchschlag in einer Spannungsgruppe, ist die Messung ungültig und der Spannungswert der Startspannungsgruppe muss reduziert und die Messung wiederholt werden. Als Durchschlagspannung wird der Wert der letzten Spannungsgruppe angenommen, in der es zu zwei Durchschlägen kam.

Die zuvor beschriebene Prozedur ist ebenfalls graphisch in einem Ablaufdiagramm in Anhang A.7 dargestellt.

3.2.4 Leiterelektroden-Oberflächenkonditionierung

Da die Oberflächenbeschaffenheit der Leiterelektroden durch den mechanischen Herstellungs- und Bearbeitungsprozess nie die gleiche Oberflächengüte besitzt, werden alle Leiterelektroden vor der ersten Verwendung einer grundlegenden Oberflächenkonditionierung unterzogen. Dadurch wird vermieden, dass es aufgrund von unterschiedlichen Oberflächenrauheiten, die zu lokalen elektrischen Feldstärkeüberhöhungen an den metallischen Profilsitzen führen können, zu einem verfrühten elektrischen Durchschlag kommt. Zudem besitzen alle Leiterelektroden nach der Konditionierung eine quantifizierte Oberflächengüte in der gleichen Größenordnung. Weiterhin müssen die Leiterelektroden, für eine wiederholende Verwendung, nach jeder Untersuchung erneut konditioniert werden, da es aufgrund der elektrischen Entladungen beim Durchschlag zu Abbrandspuren (Abb. 3.5) auf der Oberfläche der Leiterelektroden kommt. Diese können zu den gleichen Entladungsbeeinflussungen führen, wie es zuvor beschrieben wurde.

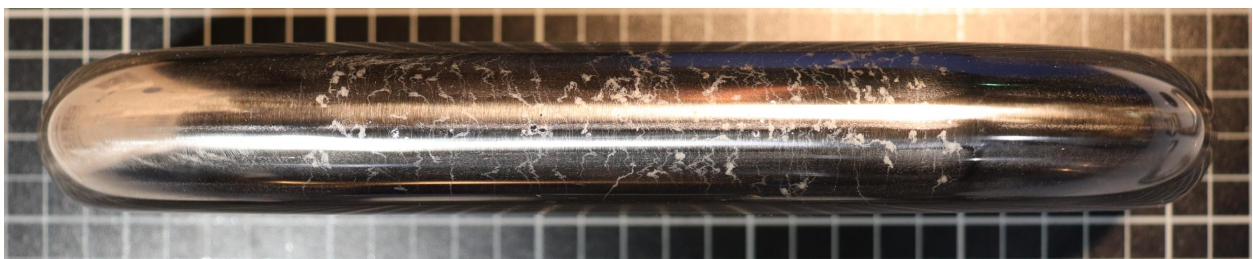


Abbildung 3.5: Abbrandspuren auf der Oberfläche einer 30 mm Leiterelektrode nach Entladungsuntersuchungen in LN_2 .

Die Oberflächenkonditionierung besteht aus einem iterativen Schleif- und Polierprozess, wobei jede Leiterelektrode mit Schleif- bzw. Polierbändern, mit einer Körnung von

- 600 (Typ: 3M TRIZACT 237AA / A030),
- 1200 (Typ: KLINGSPOR CS 325Y) und
- 2500 (Typ: 3M TRIZACT 237AA / A006),

mittels einer Rohrbandschleifmaschine vom Typ *FLEXBRE8-4* bearbeitet wird. Zur Quantifizierung des Schleif- und Polierprozesses wird das Oberflächenprofil mit dem Oberflächenrauigkeitsmesssystem *Hyperion Typ 5100* vermessen und mit der Analysesoftware *Inspector* der Firma *OPM GmbH* ausgewertet. Für die Auswertung der vermessenen Oberflächen wurden nach jedem Schleifdurchgang fünf normative Rauheitsparameter ermittelt und verglichen. Zu den Parametern gehören der nach DIN 4768 [94] definierte arithmetische Mittenrauhwert R_a , die größte Profildifferenz R_{max} , die mittlere Grundrautiefe R_{3z} , die größte Grundrautiefe R_{3zm} und die größte ermittelte Profilspitze R_p . Die genannten Rauheitsparameter sind nach DIN 4768, wie in Tabelle 3.2 beschrieben, definiert.

Tabelle 3.2: Definition der Rauheitsparameter nach DIN 4768.

Rauheitsparameter	Definition nach DIN 4768
R_a	Arithm. Mittenrauhwert – Mittelwert aus den Beträgen aller Profilwerte aus der gesamten Messstrecke
R_{max}	Größte ermittelte Profilspitze aus fünf Einzelmessstrecken
R_{3z}	Größte ermittelte Differenz aus höchstem Profilberg und niedrigstem Profiltal auf der gesamten Messstrecke
R_{3zm}	Grundrautiefe – Arithm. Mittelwert gebildet aus den fünf Profilberg/-tal-Einzelmesswerten
R_p	Größter Wert aus den fünf ermittelten R_{3z} -Werten

In Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse der Rauheitsparameter zu jedem iterativen Schleif- und Polierprozess an einer 30 mm Leiterelektrode exemplarisch dargestellt.

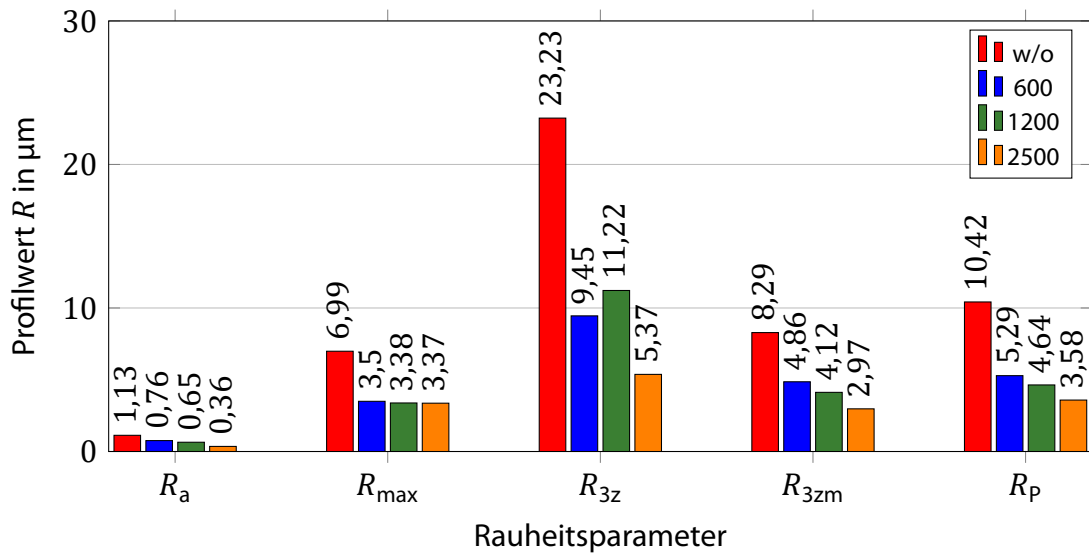


Abbildung 3.6: Exemplarische Darstellung der gemessenen Profilwerte der fünf Rauheitsparameter in Abhängigkeit des iterativen Schleif- und Polierprozesses an einer 30 mm Leiterelektrode.

Am Verlauf der Profilwerte zu den fünf Rauheitsparametern ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Korngrad die Oberflächenrauigkeit abnimmt. Zudem ist die qualitative Oberflächenbeschaffenheit nach jedem Schleifdurchgang mittels des optischen Auflichtmikroskops *EZ4W* der Firma *Leica* bei 8-, 20- und 35-facher Vergrößerung visuell erfasst worden und wird in den Abbildungen in Tabelle 3.7 dargestellt.

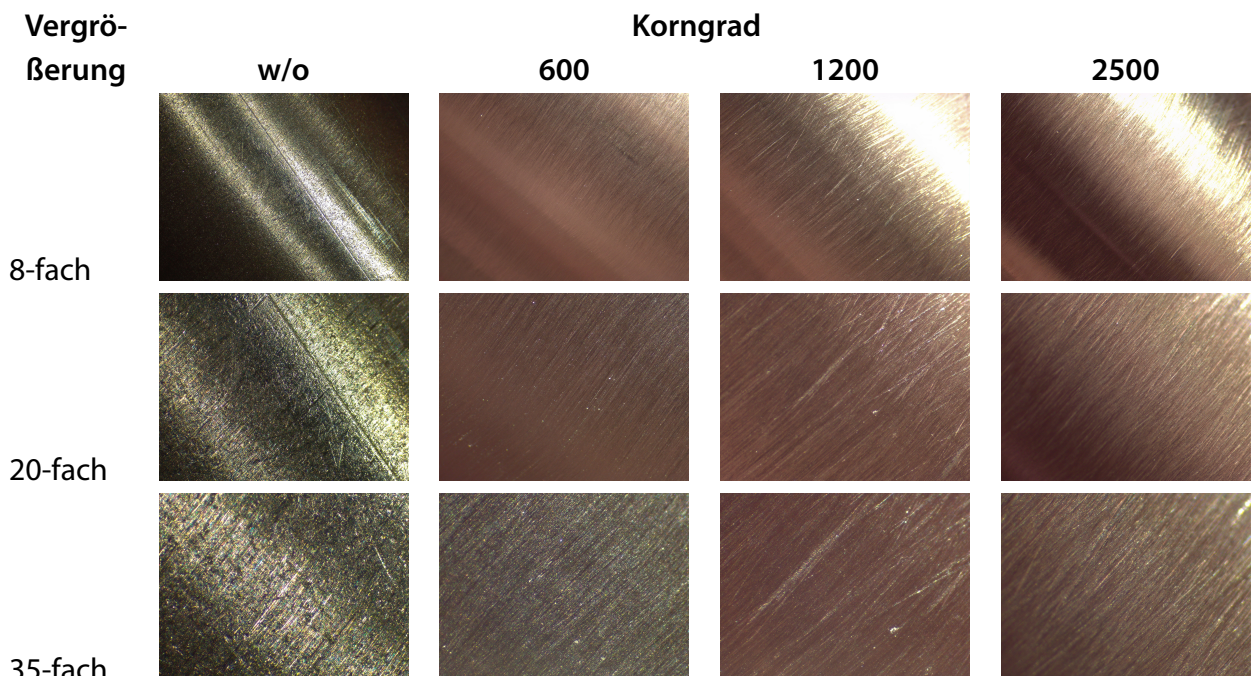


Abbildung 3.7: Visuelle Darstellung der Oberflächen in verschiedenen optischen Vergrößerungen sowie in Abhängigkeit des iterativen Schleif- und Polierprozesses.

Auch den Schliffbildern ist, zumindest beim Vergleich zur Ausgangsoberfläche (w/o), qualitativ eine Verbesserung der Oberfläche durch den Schleif- und Polierprozess anzusehen. Zur Verifikation des Verfahrens wurde je eine 8 mm und 30 mm-Leiterelektrode der parallel-zylindrischen Leiteranordnung auf einer Länge von ca. 60 mm innerhalb der parallelen Länge von 100 mm von zwei gegenüberliegenden Seiten mit einer Auflösung von 100 Punkten/mm und einer Geschwindigkeit von 1 mm/s vermessen. Alle weiteren Leiterelektroden aller Leiteranordnungen wurden ohne Vermessung vor dem ersten sowie nach jedem experimentellen Einsatz, entsprechend dem zuvor definierten und beschriebenen Verfahren, konditioniert.

Bei den geerdeten Rohrelektroden der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung aus Aluminium kann

das zuvor beschriebene Verfahren nicht angewendet werden, da weder eine geeignete Messmethode noch ein geeignetes Messsystem zur Vermessung der inneren Oberflächen zur Verfügung steht. Da es durch die elektrischen Entladungen beim Durchschlag auch auf den Innenflächen der geerdeten Rohrelektroden zu Abbrandspuren kommt, werden diese mit Schleifpapieren mit einem Korngrad von 2500 und Poliervliesen bearbeitet, bis optisch keine Rückstände mehr zu erkennen sind.

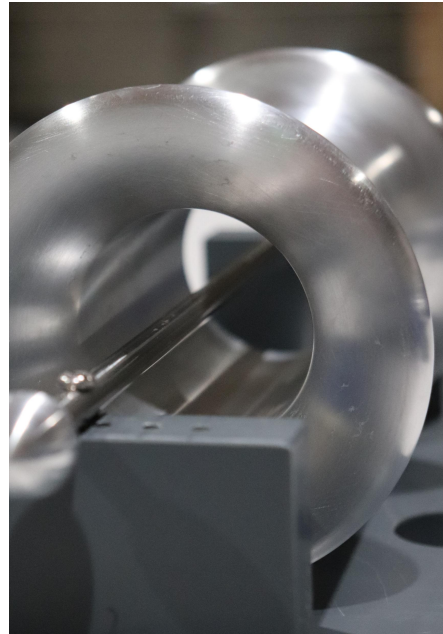


Abbildung 3.8: Innenansicht einer geerdeten Rohrelektrode mit konzentrischer 8 mm-Leiterelektrode.

3.3 Festigkeit einphasiger parallel-zylindrischer Leiteranordnungen

Die allgemeinen Anforderungen an die parallel-zylindrische Leiteranordnung, zu sehen in Abbildung 3.9 als CAD-Modell, werden wie folgt umgesetzt:

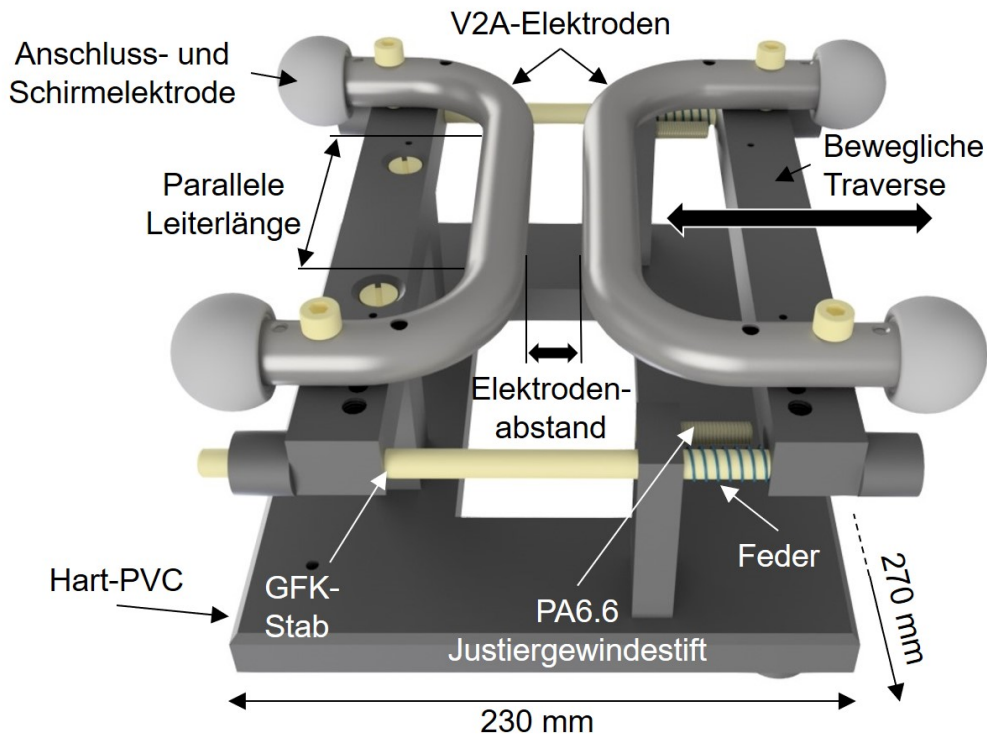


Abbildung 3.9: CAD-Modell des parallel-zylindrischen Versuchsaufbaus für einphasige empirische Untersuchungen.

Für die Leiterelektroden wird der Metallwerkstoff Edelstahl (V2A 1.4301) gewählt, da dessen Abbrandbeeinflussungen sehr gering ausfallen und die Oberfläche sehr gut mittels Schleif- und Polierbändern aufgearbeitet werden kann. Als Durchmesser werden 8, 15, 22 und 30 mm gewählt, was als relevanter Durchmesserbereich für Leiter in Hochspannungsanwendungen erachtet wird. An den Enden der Leiterelektroden werden Aluminiumkugeln als Abschlusselectroden angebracht, damit das elektrische Feld gleichmäßig wird und die Hochspannungszuführung angeschlossen werden kann. Da die Leiterelektroden parallel gegenüber angeordnet sind, müssen die Enden um 90° abgewinkelt werden, damit die Abschlusselectroden zu keiner Reduzierung der Durchschlagstrecke führen und die Anschlussleitungen weit genug voneinander entfernt sind. Aufgrund der erforderlichen 90° -Rohrbiegung der Leiterelektroden kommt, abgesehen vom 8 mm Durchmesser, kein Vollmaterial, sondern Hohlrohrmaterial zum Einsatz. Somit können auch die Befestigungslöcher für die Elektroden im elektrisch unkritischen Bereich hinter der Biegung vorgesehen werden. Alle Biegeradien der Leiterelektroden werden so gewählt, dass immer eine elektrisch belastete parallele Leiterlänge von 100 mm entsteht, welche die durchschlagrelevante Strecke darstellt.

Das Gestell wird, aufgrund seiner guten mechanischen Bearbeitbarkeit sowie Einsetzbarkeit in Flüssigstickstoff, aus Hart-PVC hergestellt. Die Grundfläche und die Höhe der Versuchsanordnung betragen 270×230 mm und 180 mm (bei den 30 mm Leiterelektroden), sodass die

Versuchsanordnung in jeder vorhandenen Größe von EPP-Behältern untersucht werden kann. Eine Leiterelektrode ist mechanisch starr fixiert, während die gegenüberliegende Leiterelektrode gleitend gelagert wird. Die Gleitlagerung wird mittels GFK-Vollstäben auf beiden Seiten der Versuchsanordnung realisiert, da auch Überschlagproben in die Versuchsanordnung eingesetzt werden, während sich diese in Flüssigstickstoff befindet. Damit sich beim Einsetzen der Überschlagproben der Leiterelektrodenabstand nicht unbeabsichtigt vergrößert, wird die gleitend gelagerte Leiterelektrode mittels Federn auf beiden Seiten der Versuchsanordnung auf mechanischer Spannung gehalten. Für die experimentellen Untersuchungen der Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff ohne Überschlagproben wird der benötigte Abstand zwischen den Elektroden mittels PA6.6-Justiergewindestiften im Zusammenspiel mit der Federspannung hergestellt. Die Fertigungsgenauigkeit der Elektroden wird bestimmt, indem mittels eines digitalen Messschiebers, mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,01$ mm, an drei äquidistant voneinander entfernten Stellen entlang der parallelen Leiterlänge von 100 mm der Ist-Durchmesser gemessen wird. Von jeder Leiterelektrode werden insgesamt 20 Stück hergestellt, damit zehn separate Versuchsanordnungen je Elektrodendurchmesser für experimentelle Untersuchungen aufgebaut werden können. Die relevanten Eigenschaften sind in Tabelle 3.3 aufgeführt.

Tabelle 3.3: Eigenschaften der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Eigenschaft	Leiterelektroden-Durchmesser d_L			
	8 mm	15 mm	22 mm	30 mm
Material	Edelstahl - V2A 1.4301			
Stab/-Rohrdurchmesser	8 mm Vollstab	15 × 2 mm	22 × 1 mm	30 × 2 mm
Fertigungsgenauigkeit	8,01 $\pm 0,01$ mm	15,06 $\pm 0,01$ mm	22,04 $\pm 0,03$ mm	30,19 $\pm 0,14$ mm
Parallele Länge	100 mm			
90°-Bogen-Außenradius	14 mm	60 mm	55 mm	75 mm
Max. Elektrodenabstand	75 mm			
Aluminium-Abschlusselectroden-durchmesser	20 mm	30 mm	40 mm	60 mm
Leiterelektrodenanzahl	je 20 Stk.			

Zur Ermittlung der Abstandsgenauigkeit wurden an jedem Elektrodendurchmesser d_L Vergleichsmessungen bei den Nominalabständen 5, 10, 15 und 20 mm vor und nach der Entnahme aus dem flüssigen Stickstoff vorgenommen. Die absolute Abweichung, bezogen auf den eingestellten Nominalabstand a , beträgt unabhängig vom Elektrodendurchmesser bis zu -0,5 mm, sodass als Abstandsgenauigkeit für alle Durchschlaguntersuchungen an den parallel-zylindrischen Leiteranordnungen eine absolute Abweichung von -0,5 mm für den Abstand a angenommen wird.

Da es sich beim Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor (Abschn. 2.4) um eine rein geometrieabhängige Größe handelt, wird dieser für die Auswertungen der elektrischen Durchschlaguntersuchungen in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen berechnet. Durch Annahme einer beliebigen Spannung ergeben sich mittels der Gleichungen 2-6 und 2-8 die Verläufe der Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktoren für die parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L in Abbildung 3.10.

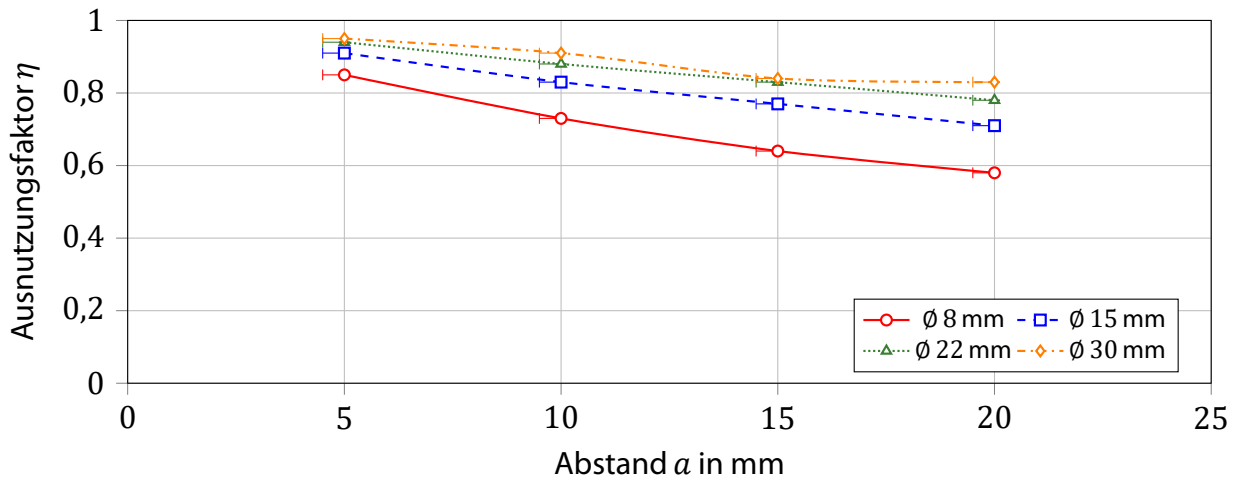


Abbildung 3.10: Verläufe des Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktors η parallel-zylindrischer Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Fotografische Aufnahmen zur parallel-zylindrischen Leiteranordnung finden sich in Anhang A.1.

3.3.1 AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

Für die Auswertung der elektrischen Durchschlagfestigkeit unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung von Flüssigstickstoff in parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen wird immer die jeweils gleiche mathematische Vorgehensweise angewendet. Daher wird diese Vorgehensweise zu Beginn einmalig erörtert und nachfolgend nicht erneut explizit erwähnt, sondern nur noch die resultierenden Ergebnisse in den entsprechenden Abschnitten dargestellt und ausgewertet.

Bei den Durchschlagergebnissen unter Wechselspannungsbeanspruchung wird aus den zehn einzelnen effektiven Durchschlagspannungswerten $U_{D, \text{Eff}} = \hat{U} / \sqrt{2}$ der arithmetische Mittelwert $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ mit der absoluten Standardabweichung σ einer Stichprobe, dargestellt als Fehlerantennen, aller Elektroden-Abstands-Konfigurationen berechnet. Die dargestellten Fehlerantennen des Nominalabstandes a folgen aus den Genauigkeitsangaben der jeweiligen Leiteranordnung in Abschnitt 3.3 und 3.4.

Durch Division der mittleren effektiven Durchschlagspannung $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ mit dem eingestellten Nominalabstand a ergibt sich die mittlere effektive Durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{Eff}}$.

Weiterhin wird die, vor den Leiterelektroden auftretende, maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ mittels der mittleren Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{Spitze}}$ und der anordnungsspezifischen Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktoren (Abb. 3.10 und 3.34) bestimmt.

In den Abschnitten zu den AC-Durchschlagergebnissen wird nur die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ über dem Abstand a und dem Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η graphisch dargestellt und diskutiert.

Alle berechneten Ergebnisse aus der zuvor beschriebenen Vorgehensweise werden in einer tabellarischen Übersicht im mathematischen Anhang B.1 und B.3 zusammenfassend dargestellt. Des Weiteren werden die Durchschlagergebnisse unter Wechselfeldbeanspruchung nach den Vergrößerungsgesetzen von Flächen- und Volumeneffekt ausgewertet. Dazu müssen die ermittelten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}}$ mittels einer allgemeinen kumulativen zwei-parametrischen Weibullverteilung

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (3-1)$$

ausgewertet werden, da beim Volumeneffekt die maximale Spitzenfeldstärke $E_{D, \%}$ bei einer Durchschlagwahrscheinlichkeit von 50 % und beim Flächeneffekt bei einer Durchschlagwahrscheinlichkeit von 63,2 % betrachtet wird. In der kumulativen zwei-parametrischen Weibullverteilung steht x für die Feldstärke mit der Wahrscheinlichkeit $F(x)$, λ ist der Skalierungsfaktor und k der Formparameter. Die beiden Werte von λ und k werden durch eine Kurvenanpassung bestimmt. Zudem wird eine *Benard*-Approximation verwendet, um die kumulative Wahrscheinlichkeit jedes Durchschlags (Median-Rang; kurz: *MR*) mittels der Gleichung

$$MR = \frac{(j - 0,3)}{(N + 0,4)} \quad (3-2)$$

zu bestimmen. Hierbei steht j für die Position der gemessenen Durchschlagfeldstärke und N für die Gesamtzahl der Messungen, in diesem Fall $N = 10$ [95] [96].

Zur Ermittlung des belasteten Volumens je Konfiguration sind numerische Berechnungen mittels *FEMM* [97] nötig, die das beim Durchschlag entscheidende Isoliervolumen $\alpha \% SLV$ bestimmen, worin die Spitzenfeldstärke größer als einem α von 81 % (bei $T = 77,15 \text{ K}$, $p = 1.013 \text{ mbar}$) der maximalen Spitzenfeldstärke ist. Entsprechendes gilt für die Berechnung der entscheidenden belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ zur Betrachtung des Flächeneffektes, jedoch mit einem α von 82 % (bei $T = 77,15 \text{ K}$, $p = 1.013 \text{ mbar}$).

Eine ausführlichere Beschreibung der durchgeführten numerischen FEM-Berechnung findet in Kapitel 4 statt.

Bei den Durchschlagergebnissen unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung wird der letzte ermittelte Gruppenwert als Blitzstoßdurchschlagspannung \hat{U}_D in Abhängigkeit des Nominalabstandes a und der Leiterelektroden-Durchmesser d_L erfasst. Bei einer Blitzstoßspannungsbeanspruchung handelt es sich per Definition um einen Amplitudenwert. Ein Verfahren zur statistischen Auswertung des Amplitudenwertes ist normativ nicht vorgesehen und wird deshalb nicht durchgeführt. Die dargestellten Fehlerantennen des Nominalabstandes a folgen erneut aus den Genauigkeitsangaben der jeweiligen Leiteranordnung in Abschnitt 3.3 und 3.4.

Auch unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung wird die mittlere Blitzstoßdurchschlagfeldstärke \hat{E}_D aus dem Quotienten von Blitzstoßdurchschlagspannung \hat{U}_D und dem Abstand a berechnet. Zudem erfolgt mittels dem anordnungsspezifischen Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η und der mittleren Blitzstoßdurchschlagfeldstärke \hat{E}_D die Berechnung der jeweiligen maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max}$ vor den Leiterelektroden.

Aus der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max, LI}$ und der maximalen AC-Spitzen durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, AC\text{-Spitze}}$ wird abschließend das Verhältnis gebildet, da die elektrische Blitzstoßfestigkeit nicht nach den analytischen Formalismen der Vergrößerungsgesetze für Flüssigstickstoff auswertbar ist.

In den Abschnitten zu den Blitzstoßdurchschlagergebnissen wird nur die maximale Blitzstoß durchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max}$ und das Verhältnis aus maximaler Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max, LI}$ zur maximalen AC-Spitzen durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, AC\text{-Spitze}}$ über dem Abstand a graphisch dargestellt und diskutiert.

Die berechneten Ergebnisse der elektrischen Blitzstoßfestigkeit werden ebenfalls in einer tabellarischen Übersicht im mathematischen Anhang B.2 und B.4 zusammengefasst.

AC-Durchschlagfestigkeit

Die Ergebnisse zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen unter Wechselfeldbeanspruchung werden nach der, in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Versuchsdurchführung ermittelt.

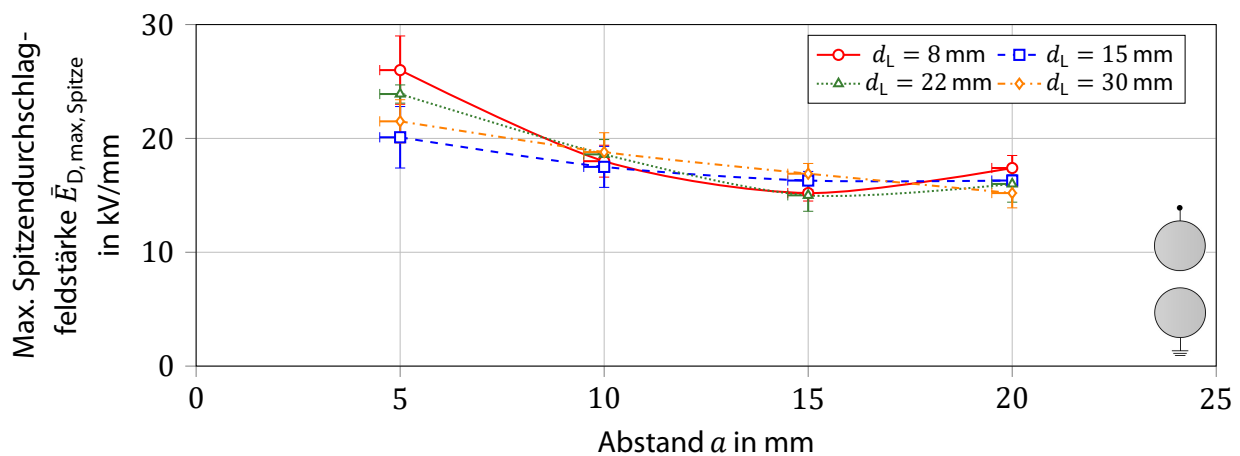


Abbildung 3.11: Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, Spitze}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Die Ergebnisse zur maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, Spitze}$ von Flüssigstickstoff in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abbildung 3.11 zeigen bei zunehmendem Nominalabstand a regressiv abnehmende maximale Spitzenfeldstärken. Die regressiven Verläufe der maximalen Spitzenfeldstärke veranschaulichen zudem, dass die elektrische Festigkeitsminderung mit zunehmendem Abstand a abnimmt und asymptotisch auf ein Festigkeitsplateau ausläuft. Die Variation des Leiterelektroden-Durchmessers d_L zeigt, bei gleichem Nominalabstand a , indes nur geringe und insignifikante Einflüsse. Lediglich beim geringsten Nominalabstand a von 5 mm lässt sich ein Trend erkennen, wonach die maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, Spitze}$ mit dem steigenden Leiterelektroden-Durchmesser d_L abnimmt.

Daraus folgt für die hier untersuchten geometrischen Eigenschaften, dass der Nominalabstand a einen tendenziell größeren Einfluss als der Leiterelektroden-Durchmesser d_L auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen nimmt. Wobei auch dieser mit zunehmendem Nominalabstand a , wie im Bereich ab 10 mm erkennbar, kontinuierlich abnimmt. [98]

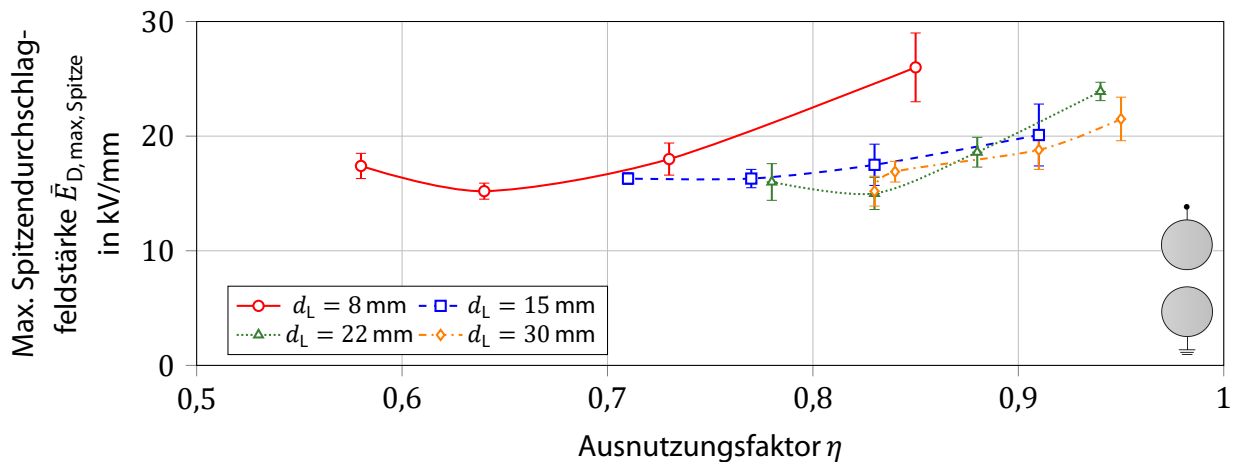


Abbildung 3.12: Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η .

Die in Abbildung 3.12 über den Ausnutzungsfaktor η aufgetragene maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ bestätigt die vorherige Aussage. Auch hier zeigen sich allgemein keine signifikanten Unterschiede. Das gilt insbesondere für die Leiterelektroden-Durchmesser 15, 22 und 30 mm, bei denen sich die maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ in weiten Teilen bzw. mindestens deren Standardabweichungen überlagern. Einzig beim Leiterelektroden-Durchmesser von 8 mm liegt ein signifikanter Unterschied zu den anderen Leiterelektroden-Durchmessern vor. Auch umspannt der Leiterelektroden-Durchmesser von 8 mm den größten Ausnutzungsfaktorbereich.

So scheint der Schwaiger'sche Ausnutzungsfaktor zur Auslegung parallel-zylindrischer Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff eher nur für große Abstands-Durchmesser-Verhältnisse anwendbar.

In Abbildung 3.13 und 3.14 sind die ermittelten maximalen Spitzenfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}}$ sowie die numerisch ermittelten entscheidend belasteten Volumen $\alpha \% SLV$ bzw. Flächen $\alpha \% SEA$ der parallel-zylindrischen Leiteranordnungen dargestellt.

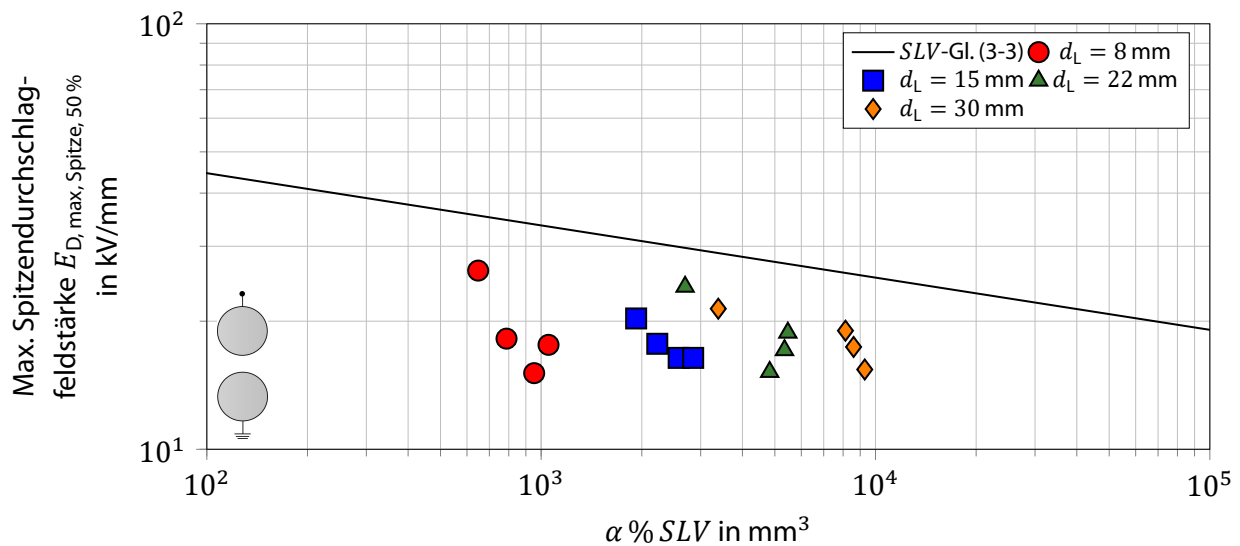


Abbildung 3.13: Darstellung der berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 50\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidenden belasteten Volumens $\alpha \% SLV$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand α sowie Leiterelektroden-Durchmesser d_L in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes.

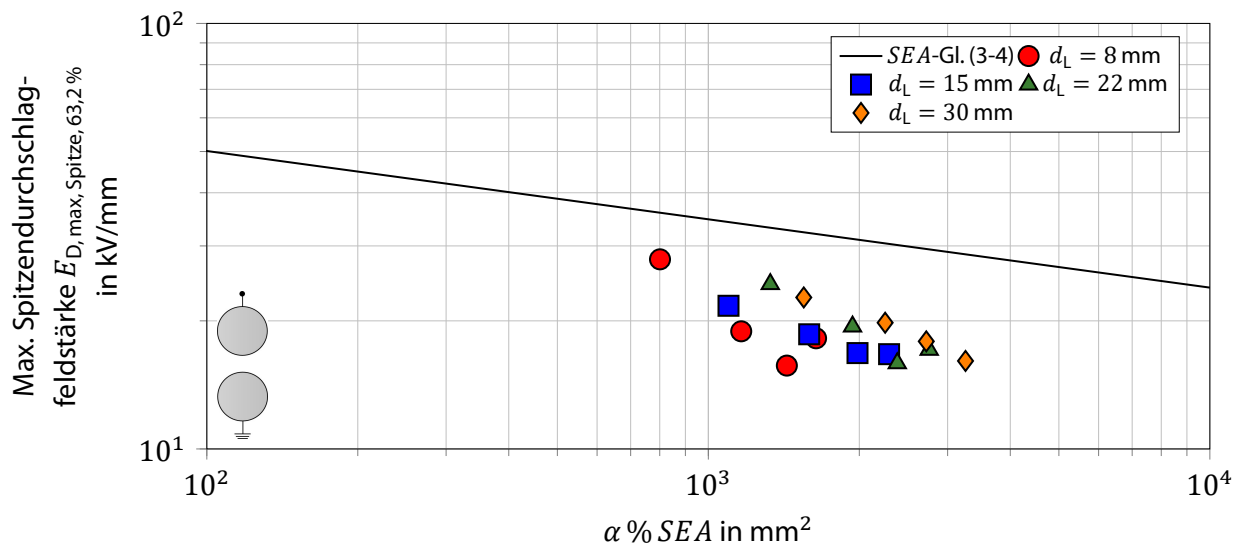


Abbildung 3.14: Darstellung der berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 63,2\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidenden belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand α sowie Leiterelektroden-Durchmesser d_L in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Flächeneffektes.

Die Auswertung und der Vergleich der elektrischen Durchschlagfeldstärken zu den empirischen Formalismen des Volumen- und Flächeneffektes zeigt, dass die elektrischen Durchschlagfestigkeiten mit steigendem SLV bzw. SEA abnehmen, was grundsätzlich der allgemeinen Theorie der Vergrößerungsgesetze entspricht.

Im Vergleich zu den empirischen Formalismen der Vergrößerungsgesetze, welche sich durch

$$E_{D, \max, \text{Spitze}, 50\%} = 78,4 \cdot (\alpha \% SLV)^{-1/8,15} \quad (3-3)$$

und

$$E_{D, \max, \text{Spitze}, 63,2\%} = 105 \cdot (\alpha \% SEA)^{-1/6,23} \quad (3-4)$$

aus Abschnitt 2.5.1 und 2.5.2 ergeben, fallen die elektrischen Durchschlagfestigkeiten bei entsprechend entscheidend belasteten Isoliervolumen bzw. Flächen allerdings geringer aus. So liegt die mittlere Abweichung sowie zugehörige absolute Standardabweichung der Stichprobe, in Bezug zu den Gleichungen 3-3 und 3-4, beim *SLV* um $-33\% \pm 11\%$ und beim *SEA* um $-35\% \pm 12\%$.

Diese Verringerung der elektrischen Durchschlagfestigkeit könnte mit den experimentellen Untersuchungen in den offenen EPP-Behältern zusammenhängen. Zwar wird durch die Verwendung zweier EPP-Behälter bereits versucht, die thermischen Verluste weitestmöglich zu minimieren, jedoch könnten diese, aufgrund des kleinen LN_2 -Volumens im Verhältnis zur umgebenden Behälteroberfläche, worüber der Wärmeeintrag erfolgt, immer noch zu stärkerer Blasenbildung von Flüssigstickstoff führen. Dies würde die elektrische Durchschlagfestigkeit weiter herabsetzen, was einem geringeren α -Faktor und einem größeren *SLV* respektive *SEA* gleich käme. Zudem findet bei Messungen in offenen Behältnissen bzw. bei der Siedetemperatur von ca. 77 K und dem Umgebungsdruck von ca. 1.000 mbar die größte Überlagerung beider Effekte auf, wodurch die jeweilige elektrische Durchschlagfestigkeit von dem Volumen- bzw. Flächeneffekt ebenfalls geringer ausfiele.

Hingegen könnten die geringer ausfallenden elektrischen Durchschlagfestigkeiten für parallel-zylindrische Leiteranordnungen korrekt sein, da es sich bei dem Volumen- und Flächeneffekt für Flüssigstickstoff nicht um allgemeingültige analytische, sondern um empirische Formalismen handelt. Denn in den zugrundeliegenden Messdaten der empirischen Formalismen sind keine Festigkeitswerte von parallel-zylindrischen Leiteranordnungen enthalten.

Um herauszufinden, welche der zuvor genannten Hypothesen die Minderung der elektrischen Durchschlagfestigkeit in den parallel-zylindrischen Leiteranordnungen, bei Betrachtung des Volumen- und Flächeneffektes, zur Folge hat, werden in den Untersuchungen unter Kapitel 5 u. a. elektrische Durchschlaguntersuchungen in einem LN_2 -Badkryostaten mit einem LN_2 -Füllvolumen von 1.000 Litern und unter einem Überdruck von bis zu 4 bar durchgeführt.

LI-Durchschlagfestigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung, ermittelt nach beschriebener Versuchsdurchführung aus Abschnitt 3.2.3, behandelt und in Abbildung 3.15 als dargestellt.

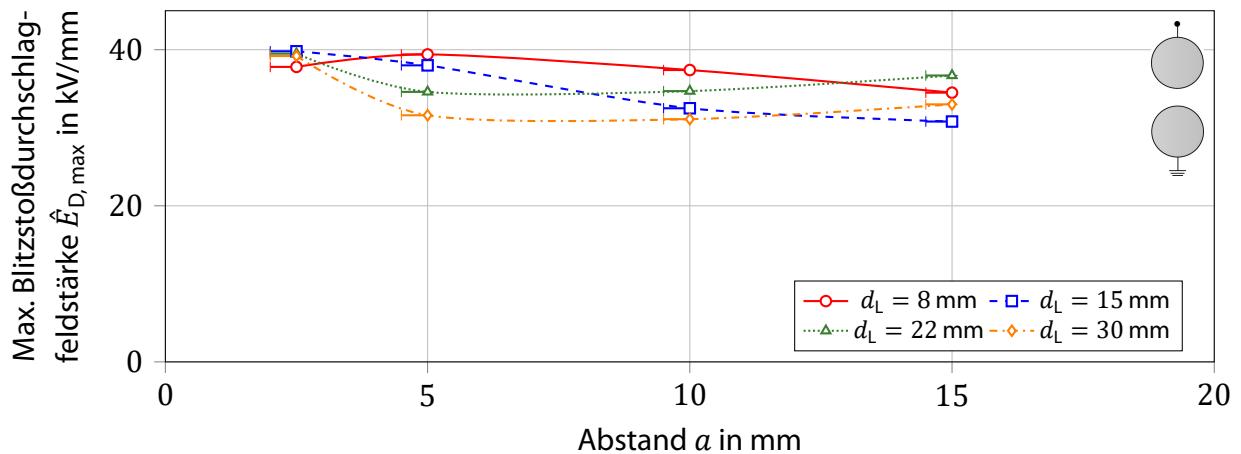


Abbildung 3.15: Verläufe der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D,max}$ von LN₂ in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Aus dem Verlauf der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D,max}$ in Abbildung 3.15 zeigt sich weder eine signifikante Abhängigkeit der elektrischen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke vom Nominalabstand a noch vom Leiterelektroden-Durchmesser d_L . Beim Vergleich des kleinsten und größten Nominalabstandes a von 2,5 und 15 mm, ist eine leichte Abnahme der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärken festzustellen. Ein eindeutiger Einfluss vom Leiterelektroden-Durchmesser d_L ist indes nicht erkennbar.

Abbildung 3.16 zeigt den Verlauf des Verhältnisses aus maximaler Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D,max,Li}$ zu maximaler AC-Spitzenfeldstärke $\bar{E}_{D,max,AC-Spitze}$.

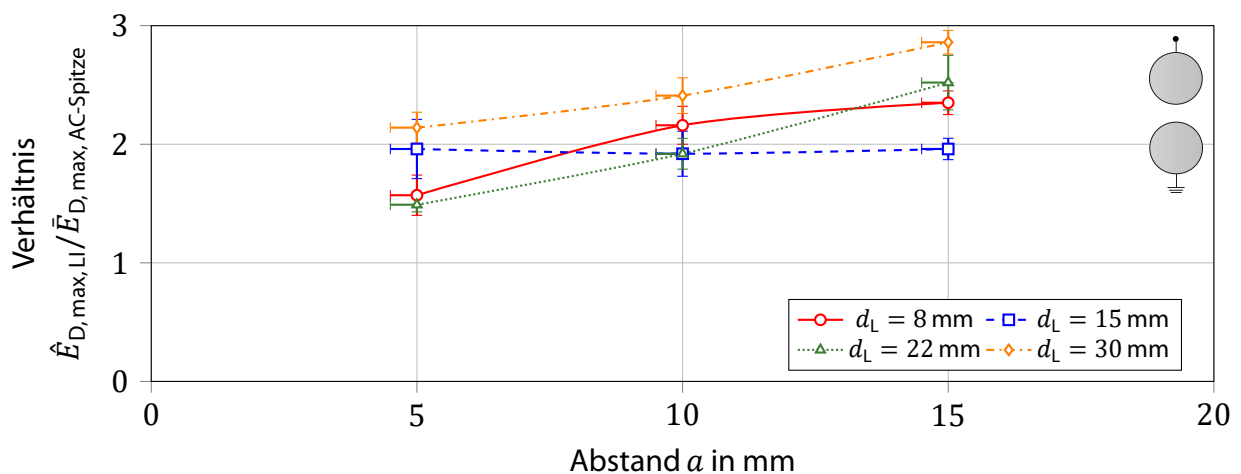


Abbildung 3.16: Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D,max,Li} / \bar{E}_{D,max,AC-Spitze}$ von LN₂ in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Aus diesen Verläufen wird deutlich, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung mit zunehmendem Nominalabstand a deutlich geringer bzw. gar nicht abnimmt als unter Wechselspannungsbeanspruchung und das 1,5 bis 3-fache der Durchschlagfestigkeit unter Wechselspannungsbeanspruchung erreicht.

Dass die elektrische Durchschlagfestigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung größer als die unter Wechselspannungsbeanspruchung ist, entspricht dem erwarteten Verhalten und hängt mit dem sogenannten Zündverzug beim Entladungsprozess zusammen. Bei der Durchschlagfes-

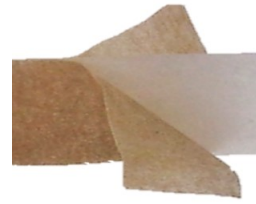
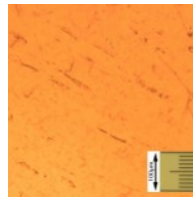
tigkeit unter Wechsellspannungsbeanspruchungen mit einer Frequenz f von 50 Hz spricht man von statischen Durchschlagspannungen, da diese so langsam gesteigert werden, dass Zünd- oder Entladeverzug sich nicht bemerkbar machen. Unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung, mit einer Belastungsdauer von wenigen Mikrosekunden, ist das allerdings nicht der Fall und die Verzüge machen sich bemerkbar. So kann zwar die Ansprechspannung unter beiden Beanspruchungen in derselben Höhe liegen, nur ist zur Initiation der Entladung ein Startelektron nach der statistischen Streuzeit notwendig. Da unter kürzerer zeitlicher Belastung der Isolierstrecke, wie im Falle einer Blitzstoßspannungsbeanspruchung, das gleichzeitige Auftreten eines Startelektrons statistisch unwahrscheinlicher ist, kommt es zu einer späteren Initiation des Entladungsprozesses und somit einer höheren Durchschlagspannung. [13]

3.3.2 AC-Durchschlagfestigkeit dünner Isolierfolien und -papiere

HTS-Phasenleiter können zur mechanischen Fixierung von gewickelten HTS-Bandleitern, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, mit zusätzlichen dünnen Feststoffen von wenigen zehn bis hundert Mikrometern Dicke umwickelt werden. Durch die Umwicklung mit den dünnen Feststoffen ergibt sich, zusammen mit Flüssigstickstoff, ein quer-geschichtetes inhomogenes Dielektrikum, welches Einfluss auf die elektrische Festigkeit des Gesamtsoliersystems nehmen kann. Wie sich solche gemischten Gesamtsoliersysteme, bestehend aus dünnen Feststoffen und Flüssigstickstoff verhalten ist bisher nicht bekannt und daher ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Als dünne Feststoffe für die umwickelte Isolierung werden die für LN_2 -Anwendungen geläufigen und gut untersuchten Materialien Polyimid (PI), mit Polypropylen laminiertes Papier (PPLP) und Kraftisolierpapier (KIP) gewählt (Tab. 3.4) [99] [100] [101]. Beim PI handelt es sich um ein Klebeband, bestehend aus einer Kapton 200HN-Folie, die mit einer Akrylatklebeschicht versehen ist. Da es sich bei Polyimid um ein hochdichtes Kunststoffpolymer handelt, nimmt es Flüssigstickstoff nicht auf. Das PPLP besteht aus zwei äußeren Lagen Kraftisolierpapier (KIP), die eine Lage Polypropylen (PP) umschließen. Während das innere PP ebenfalls ein hochdichtes Kunststoffpolymer ist, nimmt das umschließende poröse KIP den flüssigen Stickstoff als sogenannte Imprägnierung auf. Das KIP besteht aus Zellulosefasern, wodurch es eine poröse Schichtung erfährt und somit in Verbindung mit Flüssigkeiten eine Imprägnierung entsteht. Die relative Permittivität ϵ_r und der Verlustfaktor $\tan \delta$ der Feststoffe, bei einer Frequenz f von 50 Hz in Flüssigstickstoff, sind der Tabelle 3.4 zu entnehmen [102].

Es wurde versucht, die Materialdicken so auszuwählen, dass sie, je nach Verfügbarkeit, etwa gleich ausfallen. Das PI ist mit einer Gesamtdicke von 80 μm das dünnste Material während das PPLP eine Gesamtdicke von 94 μm bemisst und das KIP die höchste Gesamtdicke von 110 μm aufweist. Bei den zuvor genannten Dicken erreicht das PI in Flüssigstickstoff mit ca. 114 kV/mm die höchste elektrische Festigkeit, gefolgt vom PPLP mit 104 kV/mm [103] [104]. Die geringste elektrische Festigkeit weist das KIP mit 85 kV/mm auf [105]. Die Umwicklungen werden mit einer Überlappung von ca. 50 % durchgeführt, wodurch sich bei einlagiger Umwicklung eine doppelte und bei zweilagiger Umwicklung eine vierfache Materialdicke ergibt. Aufgrund der Steifigkeit der Feststoffe und der daraus resultierenden Abhebungen besonders im Bereich der 90°-Bögen der Leiterelektroden, kann nur eine Breite von höchstens 20 mm verwendet werden.

Tabelle 3.4: Eigenschaften der dünnen Feststoffe zur Umwicklung der Leiterelektroden.

Eigenschaften	Polyimid - PI	Mit Polypropylen laminiertes Papier - PPLP	Kraftisolier- papier - KIP
Hersteller	CMC Klebetechnik	Tervakoski Film	Ahlstrom Munksjö
Typ	70105	IPP	101788
Aufbau	50 µm Kapton HN + 30 µm Akrylatkleber	2 x 23,5 µm KIP + 47 µm PP	100 % Zellulose
ϵ_r in LN ₂ @ 50 Hz	3,15	2,19	2,63
$\tan \delta$ in LN ₂ @ 50 Hz	$9,73 \times 10^{-4}$	$6,77 \times 10^{-4}$	$20,9 \times 10^{-4}$
Nominaldicke	80 µm	94 µm	110 µm
AC-Festigkeit in LN ₂	114 kV/mm	104 kV/mm	85 kV/mm
Breite		20 mm	
Überlappung		50 % \pm 5 %	
Einlagige Dicke	160 µm	188 µm	220 µm
Zweilagige Dicke	320 µm	376 µm	440 µm

Dementsprechend ergibt sich, wie in Tabelle 3.4 gezeigt, eine Gesamtdicke bei einlagiger Umwicklung für das PI, PPLP und KIP von 160 µm, 188 µm und 220 µm sowie bei zweilagiger Umwicklung von 320 µm, 376 µm und 440 µm. Abbildung 3.17 zeigt exemplarisch einlagig umwickelte 22 mm Leiterelektroden mit den drei Feststoffen.

**Abbildung 3.17:** Anschauungsbeispiele einlagig umwickelter Leiterelektroden mit den drei verschiedenen Feststoffen. Links: PI. Mitte: PPLP. Rechts: KIP.

Insgesamt werden, je händischer Wickelart (einfach / doppelt) und Material, fünf einzelne elektrische Durchschlagmessungen unter Wechselspannungsbeanspruchung bei den drei Elektrodenabständen 5, 10 und 15 mm in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung durchgeführt. Fotografische Aufnahmen feststoffumwickelter Leiterelektroden finden sich in Anhang A.3. In Abbildung 3.18 wird die mittlere effektive Durchschlagsspannung für Flüssigstickstoff mit den mittleren effektiven Durchschlagsspannungen, berechnet aus fünf Einzelmesswerten je Konfiguration, der feststoffumwickelten 22 mm Leiterelektroden verglichen.

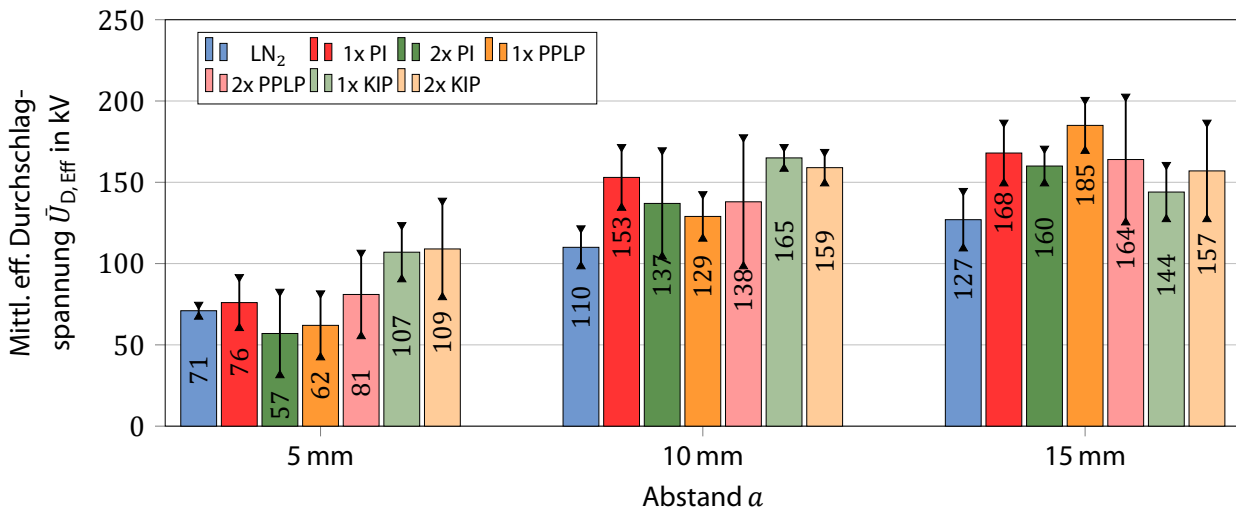


Abbildung 3.18: Ergebnisse der mittleren effektiven Durchschlagsspannung $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von feststoffumwickelten Leiterelektroden in LN₂, im Vergleich zur reinen effektiven mittleren Durchschlagsspannung von LN₂, untersucht in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Die Ergebnisse aus Abbildung 3.18 zeigen, dass bei einem Nominalabstand von 5 mm die Feststoffumwicklungen die mittlere effektive Durchschlagsspannung auf 79 bis 153 %, in Bezug auf die mittlere effektive Durchschlagsspannung von reinem Flüssigstickstoff, beeinflussen. Bei einem Nominalabstand von 10 mm beträgt die Beeinflussung der mittleren effektiven Durchschlagsspannung 118 bis 151 % und bei 15 mm 113 bis 145 %. Beim Vergleich aller Feststoffumwicklungen im Nominalabstand von 5 mm ist nur beim Isolierstofftyp KIP eine deutliche Erhöhung der Durchschlagsspannung, unter Berücksichtigung nicht überlappender Standardabweichungen, zu erkennen. Für den Nominalabstand von 5 mm muss aber auch beachtet werden, dass die mittlere effektive Durchschlagsspannung der dünnen Feststoffumwicklungen ebenfalls unter der von reinem Flüssigstickstoff liegen kann. Für den Nominalabstand von 10 mm bewirkt der KIP-Isolierstoff, unter Berücksichtigung der nicht überlappenden Standardabweichung, wiederum den deutlichsten Anstieg der mittleren effektiven Durchschlagsspannung. Bei 15 mm bewirkt der Isolierstofftyp PI den deutlichsten Anstieg der mittleren effektiven Durchschlagsspannung. Generell ist bei allen Isolierfolien, bei den Nominalabständen von 10 und 15 mm, eine Erhöhung der mittleren effektiven Durchschlagsspannungen, im Vergleich zu der von reinem flüssigen Stickstoff, festzustellen.

Weiterhin wird die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ aus jeder mittleren effektiven Durchschlagsspannung $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ mittels numerischer FEM-Berechnungen ermittelt und in Abbildung 3.19 dargestellt.

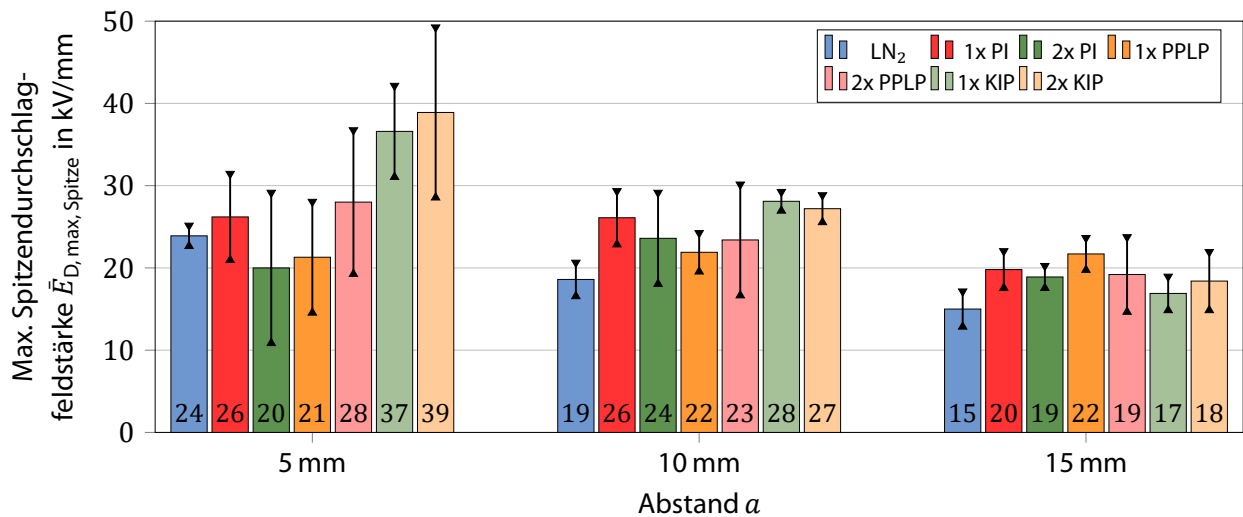


Abbildung 3.19: Ergebnisse der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, Spitze}$ von feststoffumwickelten Leiterelektroden in LN₂, im Vergleich zur reinen Durchschlagfestigkeit von LN₂, untersucht in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Die maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken in Abbildung 3.19 veranschaulichen die Ergebnisse der bereits beschriebenen mittleren effektiven Durchschlagsspannung aus Abbildung 3.18. Zunächst ist zu beachten, dass die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei allen Anordnungen immer in Flüssigstickstoff und nicht in den Feststoffumwicklungen auftritt, was aus den FEM-Berechnungen hervorgeht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die höheren relativen Permittivitäten aller dünnen Isoliermaterialfolien, im Vergleich zur niedrigeren relativen Permittivität des Flüssigstickstoff zu elektrischen Feldverschiebungen führen, die umgekehrt proportional zum Verhältnis der relativen Permittivitäten sind.

Bei einem Nominalabstand von 5 mm führt der Isolierstofftyp KIP, im Vergleich zur maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke von reinem Flüssigstickstoff, zu der größten Erhöhung der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke über den gesamten Abstandsreichweite. PI und PPLP, bei einem Nominalabstand von 5 mm, führen zu einer Verschlechterung der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke. Dies ist abhängig von der Anzahl der Umwicklungen. Für kleine Nominalabstände kann also nicht generell gesagt werden, dass zusätzliche Feststoffumwicklungen zu einer Verbesserung führen.

Dies wird mit zunehmendem Nominalabstand auf 10 und 15 mm deutlicher, da bei diesen Nominalabständen in keinem Fall die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke, im Vergleich zu denen in reinem Flüssigstickstoff, reduziert wird. Es ist aber auch zu erkennen, dass eine weitere Festigkeitssteigerung in der Größenordnung von z. B. KIP bei 5 mm nicht mehr auftritt. Auch ein deutlicher material- und umwicklungsabhängiger Einfluss auf die elektrische Spitzendurchschlagfeldstärke bei 10 und 15 mm ist nicht mehr zu erkennen. Vielmehr ist das Gegenteil der Fall und der Einfluss von Isoliermaterial und Umwicklung wird geringer.

Auch wenn einige Isolierfolien und Umwicklungen, bei unterschiedlichen Nominalabständen, zu einer Festigkeitssteigerung führen, ist es letztlich nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage über ein besonders geeignetes Isoliermaterial, in Abhängigkeit von dessen mittlerer effektiver Durchschlagsspannung bzw. maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke und deren absoluten Standardabweichungen, über den gesamten Abstandsreichweite zu treffen. [106]

Auch ist zu erwähnen, dass der Herstellungsprozess der feststoffumwickelten Leiterelektroden definitiv Einfluss auf die Ergebnisse nimmt. So ergeben sich durch den händischen Wickelprozess u. a. Abweichungen in den Überlappungen der Folien und Papiere. Auch entstehen im Übergangsbereich der Bögen der Leiterelektroden Abhebungen, die eine Beeinflussung der elektrischen Festigkeit herbeiführen können.

3.3.3 AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff

Mittels abstrahierter geometrischer Eigenschaften von Stützisolatoren auf spezifische Überschlagproben wird untersucht, inwieweit diese die elektrische Überschlagfestigkeit, im Vergleich zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff, beeinflussen. Aus den Erkenntnissen werden konkrete Auslegungskriterien dreiphasiger Stützisolatoren für den Einsatz in Flüssigstickstoff abgeleitet. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Überschlaguntersuchungen wird sich dafür entschieden, diese nur bei dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm durchzuführen. Auch wird angenommen, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse qualitativ auf die anderen Leiterelektroden-Durchmesser angewendet werden können.

Folgende Fragestellungen werden durch die spezifisch abstrahierten Überschlagproben, in Bezug auf die geometrischen Eigenschaften von Stützisolatoren, an herunterskalierten Überschlagproben in Voruntersuchungen beantwortet:

- Inwieweit beeinflussen senkrecht zur Leiterelektrode eingebrachte feste Isolierstoffe das elektrische Überschlagverhalten?
- Welcher zusätzliche Einfluss entsteht bei der Variation des Nominalabstandes a der Elektroden?
- Wie nimmt die relative Permittivität ϵ_r fester Isolierstoffe Einfluss auf das elektrische Überschlagverhalten?
- Wie wirken sich kleine Spalte im Bereich des Tripelpunktes, zwischen Leiterelektrode und Überschlagprobe, aus?
- Führen Taillierungen von Überschlagproben, d.h. eine Reduzierung der Querschnittsfläche, zu einer Beeinflussung des elektrischen Überschlagverhaltens?
- Kommt es durch die Neigung von Überschlagproben bei gleichbleibendem Leiterabstand zu einer Verbesserung oder Verschlechterung des Überschlagverhaltens?

Zu Beginn werden gerade Überschlagproben, wie in Abbildung 3.20 gezeigt, konstruiert, um daran den Einfluss der relativen Permittivität ϵ_r in parallel-zyklindrischen Leiteranordnungen zu untersuchen. Zudem dienen die Ergebnisse dazu, ein geeignetes Material mit dem geringstmöglichen Einfluss auf die elektrische Festigkeit für weiterführende Untersuchungen mit Überschlagproben auszuwählen.

Als Materialien werden die Typen PTFE, PP-H, PE-HD, POM-C sowie zwei GFK ausgewählt, da diese sich einerseits im energietechnischen und kryogenen Einsatz bereits bewährt haben und andererseits einen relevanten Bereich bzgl. der relativen Permittivität abdecken.

In Tabelle 3.5 sind die relevanten Eigenschaften der ausgewählten Materialtypen dargestellt.

Tabelle 3.5: Relevante Eigenschaften der ausgewählten Materialtypen nach deren Materialdatenblättern. Die individuellen Bedingungen zur Ermittlung der elektrischen Festigkeiten sind den Datenblättern zu entnehmen. Die Werte wurden bei Standardbedingungen ermittelt.

Material	PTFE [107]	PP-H [108]	PE-HD [109]	POM-C [110]	GFK Vetronite G11 [111]	GFK Vetronite EGS102 [112]
Hersteller	S-Polytec		PlastX24	S-Polytec	VonRoll	
Permittivität ϵ_r	2,1 (50 Hz)	2,3 (300 Hz)	2,3 (300 Hz)	3,8 (50 Hz)	-	-
Verlustfaktor $\tan \delta$	-	-	-	0,002 (50 Hz)	-	-
Oberflächenwiderstand R_O	$> 10^{17} \Omega$	$> 10^{16} \Omega$	$> 10^{16} \Omega$	$> 10^{13} \Omega$	$> 10^{12} \Omega$	$> 10^{12} \Omega$
Elektrische Festigkeit E	40 kV/mm	52 kV/mm	47 kV/mm	40 kV/mm	20 kV/mm	18 kV/mm

Die Abmessungen aller geraden Überschlagproben (Abb. 3.20) zur Untersuchungen des Einflusses der relativen Permittivität ϵ_r in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen weisen einen Nominalabstand a von 20 mm, einen beidseitigen Verrundungsradius R_v von 11 mm sowie eine Materialstärke s von 8 mm auf. Aus jedem Material werden je 10 Überschlagproben zu Untersuchungszwecken hergestellt.

Zur Untersuchung, inwiefern die Überschlagfestigkeit gerader Überschlagproben vom Nominalabstand a abhängt, werden, wie zuvor für die Untersuchung des Einflusses der relativen Permittivität ϵ_r , gerade Überschlagproben mit denselben Eigenschaften in Materialstärke und Verrundungsradius hergestellt, bei denen jedoch der Nominalabstand a 5 mm und 10 mm beträgt. Diese werden zudem lediglich aus dem Materialtyp PE-HD hergestellt, da sich dieses bei den vorherigen Untersuchungen als geeignetstes Material herausstellte. Von jedem Nominalabstand a werden erneut je 10 Überschlagproben hergestellt.

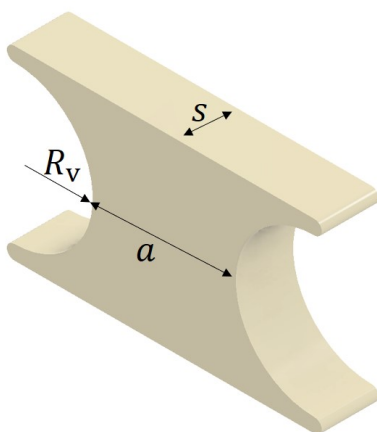


Abbildung 3.20: Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

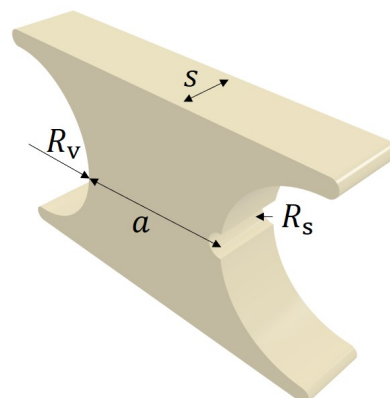


Abbildung 3.21: Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlichem halbrunden Spalt für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Weiterhin werden gerade Überschlagproben für Untersuchungen in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen mit zwei verschiedenen Spaltradien hergestellt, um den Einfluss möglicher Abhebungen zu untersuchen. Dabei werden für den direkten Vergleich die geometrischen Eigenschaften der geraden Überschlagproben, wie Materialstärke und Verrundungsradius, bei einem Nominalabstand a von 20 mm beibehalten und um einen halbrunden Spalt ergänzt (Abb. 3.21). Der halbrunde Spalt hat einen Radius R_s von 1,0 bzw. 1,5 mm und befindet sich einseitig direkt am Übergang von der Leiterelektrode auf die Überschlagprobe und verkürzt den Nominalabstand a um den Spaltradius R_s . Für jeden Spaltradius werden je zehn Überschlagproben aus PE-HD gefertigt und untersucht.

Eine wesentliche Anforderung an den Stützisolator ist, dass dieser im strömenden Flüssigstickstoff eine möglichst geringe Querschnittsfläche aufweist und keinen großen Druckabfall herbeiführt. Daher werden gerade Überschlagproben mit möglichst großzügigen Taillierungen für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, wie in Abbildung 3.22 und 3.23 gezeigt, hergestellt. Zur direkten Vergleichbarkeit werden erneut die geometrischen Eigenschaften der geraden Überschlagproben, wie Materialstärke und Verrundungsradius, mit einem Nominalabstand a von 20 mm verwendet und die zwei Taillierungen „rund“ und „eckig“ erweitert. Bei den beiden Taillierungsarten beträgt die nominale Stegbreite s_B jeweils 4 mm.

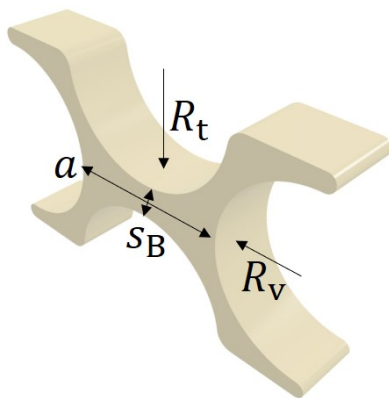


Abbildung 3.22: Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlicher runder Taillierung für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

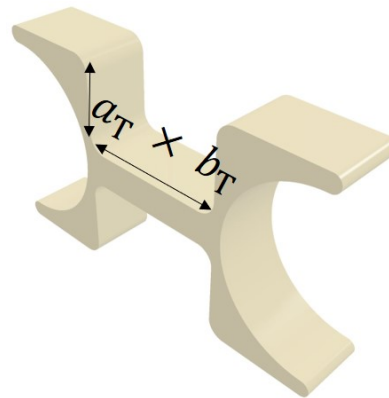


Abbildung 3.23: Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlicher eckigen Taillierung für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Die runde Taillierung hat einen beidseitigen Taillierungsradius R_T von 11 mm während die eckige Taillierung einen rechteckigen beidseitigen Ausschnitt ($a_T \times b_T$) von 11×18 mm aufweist. Von jeder Taillierung werden je zehn Überschlagproben aus PE-HD gefertigt und untersucht.

Die Fertigungsgenauigkeit aller Überschlagproben wird mittels eines digitalen Messschiebers mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm ermittelt und ist tabellarisch in Anhang A.5 dargestellt. Grundsätzlich kann zur Fertigungsgenauigkeit, bezogen auf den Nominalabstand a , aller geraden Überschlagproben festgehalten werden, dass diese $\pm 0,05$ mm und bei den geneigten Überschlagproben $\pm 0,3$ mm beträgt.

Exemplarische fotografische Aufnahmen zu den Überschlagproben sind in Anhang A.4 dargestellt.

Für die Auswertung der elektrischen Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff in parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen wird ebenfalls immer die gleiche mathematische Vorgehensweise angewendet. Bei den Überschlagergebnissen wird aus den zehn einzelnen effektiven Überschlagspannungswerten $U_{\dot{U}, \text{Eff}} = \hat{U} / \sqrt{2}$ der arithmetische Mittelwert $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ mit der absoluten Standardabweichung σ einer Stichprobe, dargestellt als Fehlerantennen, berechnet. Die dargestellten Fehlerantennen des Nominalabstandes a folgen aus den Genauigkeitsangaben der jeweiligen Leiteranordnung.

Mittels der mittleren effektiven Überschlagspannung $\bar{U}_{\dot{U}, \text{Eff}}$ und dem Nominalabstand a von 20 mm wird die mittlere effektive Überschlagfeldstärke $\bar{E}_{\dot{U}, \text{Eff}}$ berechnet und mit der jeweiligen mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{Eff}}$ der 22 mm Leiterelektrode beim jeweiligen vergleichbaren Nominalabstand graphisch dargestellt und verglichen.

Gerade Überschlagproben unterschiedlicher Materialien

Eine wesentliche materielle Eigenschaft, die auf die elektrische Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff Einfluss nehmen kann und daher eingangs ermittelt werden muss, ist die relative Permittivität ϵ_r . Da diese von der Temperatur und Frequenz abhängt, wird sie für jedes, in Tabelle 3.5, aufgeführte Material sowohl bei ca. 293 K in Luft als auch bei ca. 77 K in Flüssigstickstoff, über eine Messfrequenz von 1 Hz bis 5 kHz, gemessen. Die Messungen werden mittels dem dielektrischen Materialanalysator *Spectano 100* der Fa. *OMICRON* durchgeführt. Jede Probe hat eine Kantenlänge von 80 x 80 mm und eine Nominaldicke von 3 mm. Die Proben befinden sich zur Messung in einem zylindrischen Schutzring-Elektrodenaufbau mit Messingelektroden und definiertem Anpressdruck, in Anlehnung an IEC 62631-2-1 [113]. In Abbildung 3.24 und 3.25 sind die Verläufe der gemessenen relativen Permittivitäten dargestellt.

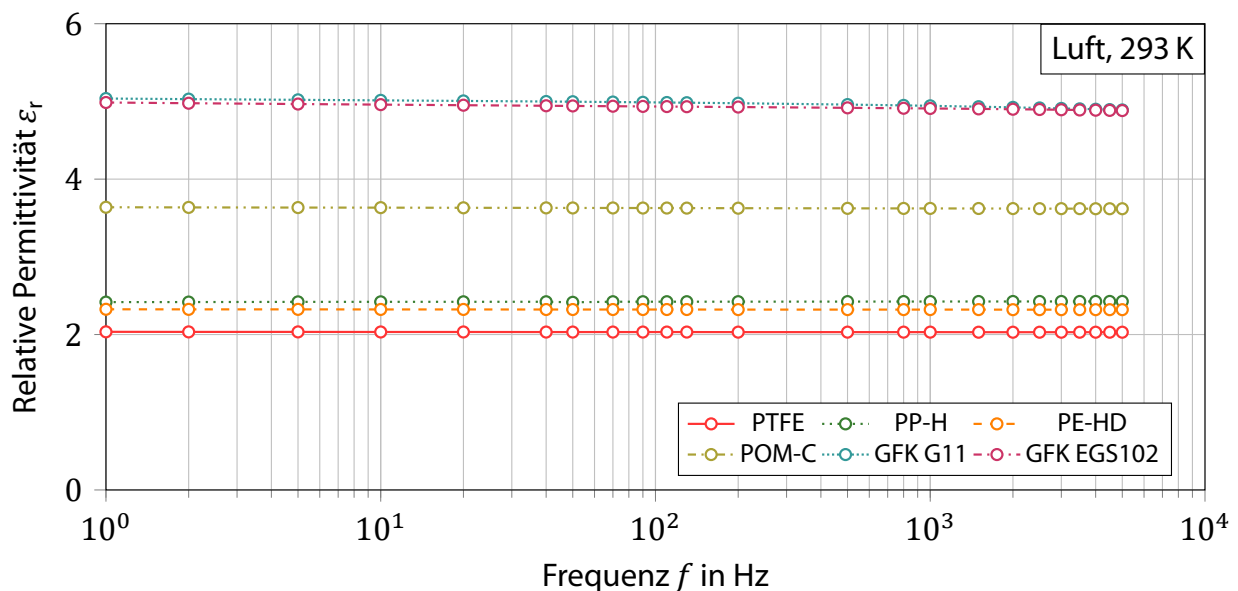


Abbildung 3.24: Relative Permittivitätsverläufe der ausgewählten Materialien in Abhängigkeit der Frequenz f bei einer Temperatur T von 293,15 K in Luft.

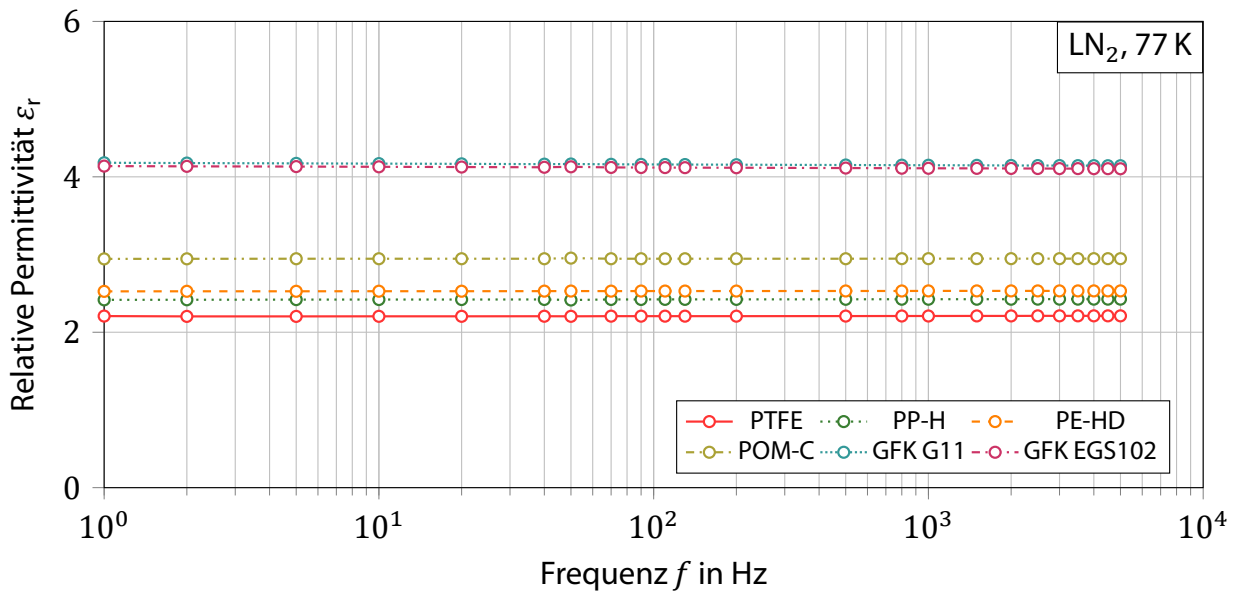


Abbildung 3.25: Relative Permittivitätsverläufe der ausgewählten Materialien in Abhängigkeit der Frequenz f bei einer Temperatur T von 77,15 K in LN_2 .

Den Abbildungen 3.24 und 3.25 ist zu entnehmen, dass die Temperaturdifferenz keinen nennenswerten Einfluss auf die Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivitäten nimmt. Bei den Materialien PTFE, PP-H und PE-HD ist ein leichter Anstieg über den gesamten Frequenzbereich zu beobachten, während die Werte der Materialien POM-C, GFK G11 und GFK EGS102 deutlicher absinken.

Für die Anwendung der Materialien unter Wechselfeldbeanspruchung ist die relative Permittivität ϵ_r bei einer Frequenz f von 50 Hz der relevante Wert und deshalb in Tabelle 3.6 für 293,15 K und 77,15 K separat dargestellt.

Tabelle 3.6: Relative Permittivität ϵ_r der ausgewählten Materialien in Luft und LN_2 bei $f = 50$ Hz.

Frequenz $f = 50$ Hz	Material					
	PTFE	PP-H	PE-HD	POM-C	GFK G11	GFK EGS102
Luft 293,15 K	2,03	2,30	2,32	3,63	5,00	4,94
LN_2 77,15 K	2,21	2,42	2,53	2,95	4,17	4,13

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ der Materialien wurde mittels des dielektrischen Materialanalysators, für beide Temperaturen und den genannten Frequenzbereich, ebenfalls erfasst. Jedoch fallen die Werte bei allen Materialien aufgrund der niedrigen Temperatur von ca. 77 K kleiner als 3×10^{-4} aus, so dass das Messgerät diese nicht mehr ermitteln kann. Ein so geringer Wert hat aber auch keinen relevanten Einfluss und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Um den Einfluss der relativen Permittivität ϵ_r der verschiedenen Materialien auf die Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff zu ermitteln, werden die geraden Überschlagproben, beschrieben in Abschnitt 3.4.2, nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.2.2, in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung mit 22 mm Leiterelektroden untersucht.

Zu den absteigend sortierten mittleren effektiven Überschlagfeldstärken der Materialien wird die zugehörige relative Permittivität ε_r bei 50 Hz und ca. 77 K (Tab. 3.6) ergänzt, um zu bewerten, ob es einen Einfluss, herrührend von der relativen Permittivität ε_r , auf die Überschlagfeldstärke in Flüssigstickstoff gibt. Beide ist in Abbildung 3.26 dargestellt.

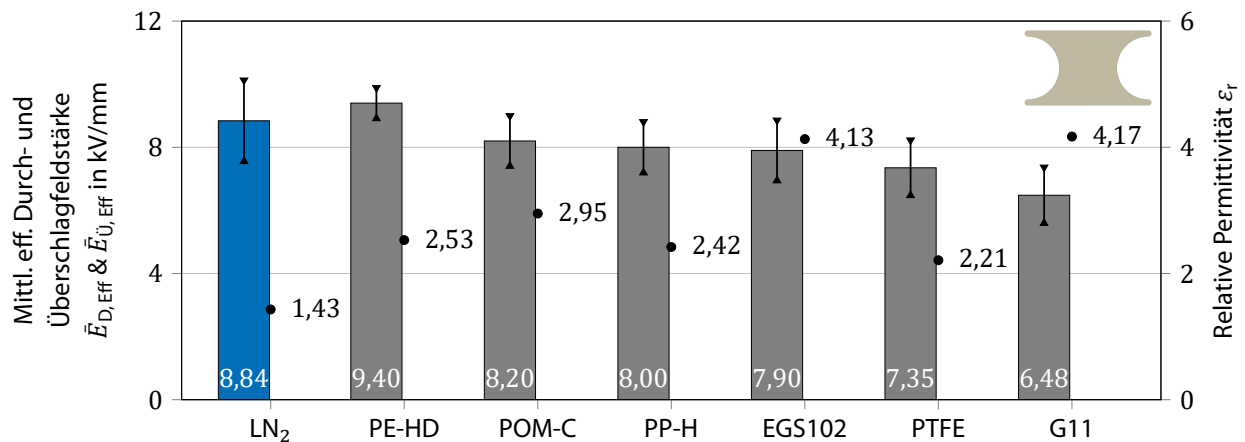


Abbildung 3.26: Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{U, \text{Eff}}$ (grau) von geraden Überschlagproben in LN₂ in absteigender Sortierung, im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN₂ (blau). Zudem dargestellt die jeweils zugehörige relative Permittivität ε_r .

Wie der Abbildung 3.26 zu entnehmen ist, erreicht PE-HD die höchste mittlere effektive Überschlagfeldstärke von 9,4 kV/mm und liegt damit leicht oberhalb der Durchschlagfeldstärke von Flüssigstickstoff. Es zeigt sich somit, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff durch den Einsatz gerader Überschlagproben nicht negativ beeinflusst werden muss. Im Vergleich zu Flüssigstickstoff erreicht POM-C eine um 7,2 % niedrigere elektrische Überschlagfestigkeit von 8,2 kV/mm. Es folgen PP-H mit 8,0 kV/mm (9,5 %), GFK EGS102 mit 7,9 kV/mm (10,6 %) und PTFE mit 7,4 kV/mm (16,9 %). Das GFK G11 erreicht die niedrigste elektrische Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff mit 6,5 kV/mm, so dass die Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff um 26 % reduziert wird.

Des Weiteren werden die relativen Permittivitäten der verwendeten Materialien unter der Annahme berücksichtigt, dass diese mit steigender relativer Permittivität zu höheren Feldstärkebeanspruchungen entlang der Grenzfläche zwischen Überschlagprobe und Flüssigstickstoff, und insbesondere am Tripel-Punkt zwischen Überschlagprobe, Leiter und Flüssigstickstoff führen. Wie aber in Abbildung 3.26 zu sehen ist, zeigen die Werte keinen eindeutigen Zusammenhang, der darauf schließen lässt, dass die Minderung der elektrischen Überschlagfestigkeit allein von der relativen Permittivität ε_r abhängt. Besonders deutlich wird das bei PTFE mit der kleinsten relativen Permittivität ε_r von 2,21 und einer elektrischen Überschlagfestigkeit von 7,4 kV/mm, die um 16,9 % niedriger ist als bei Flüssigstickstoff und den zweitniedrigsten Wert darstellt. [114] In Abbildung 3.27 werden von den geraden Überschlagproben eines jeden untersuchten Materials exemplarisch die beobachteten Oberflächenentladungsspuren dargestellt.

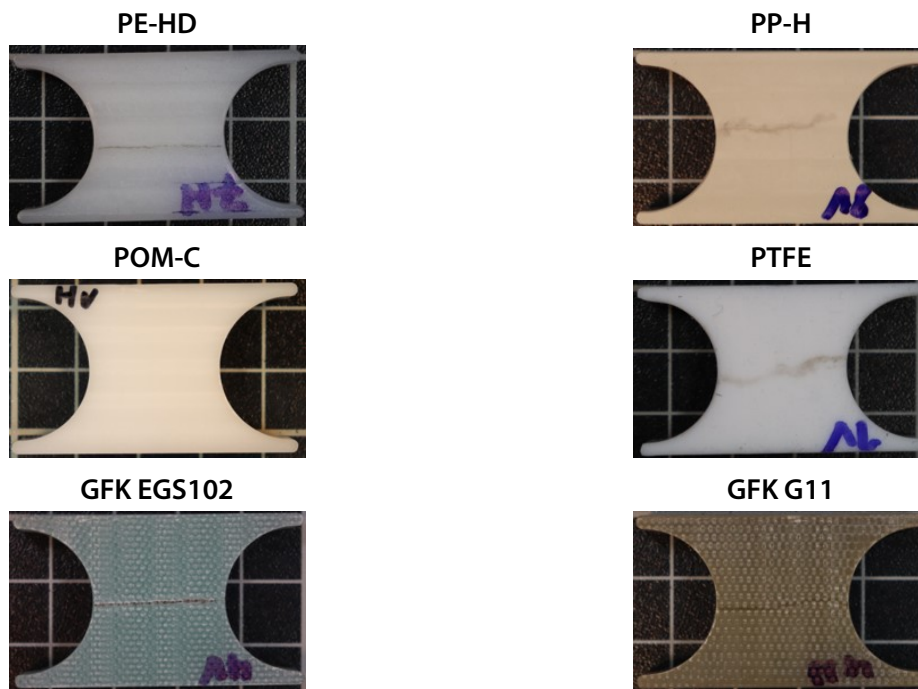


Abbildung 3.27: Exemplarische Darstellung der Materialoberflächen der geraden Überschlagproben mit deren Oberflächenentladungsspuren.

Bei PE-HD treten sichtbare Entladungsspuren in 90 % der Fälle, bei EGS 102 in 70 %, bei G11 in 50 %, bei PP in 40 %, bei PTFE in 30 % und bei POM-C gar nicht auf. Jedoch lassen sich die Entladungsspuren beim PE-HD, PP-H und PTFE leicht entfernen. Bei den GFK-Werkstoffen EGS102 und G11 kommt es zu einer starken Materialdegradation. Die Entladungen scheinen sich im Material aufzubauen und im Verlauf des Überschlages aus dem Material auszutreten, woraufhin die oberflächliche Materialschicht abplatzt. Dies wird anhand der Abbildung 3.28 verdeutlicht. Die 8- und 35-fach vergrößerten Bildaufnahmen wurden mittels des Auflichtmikroskops vom Typ *Leica EZ4W* aufgenommen.

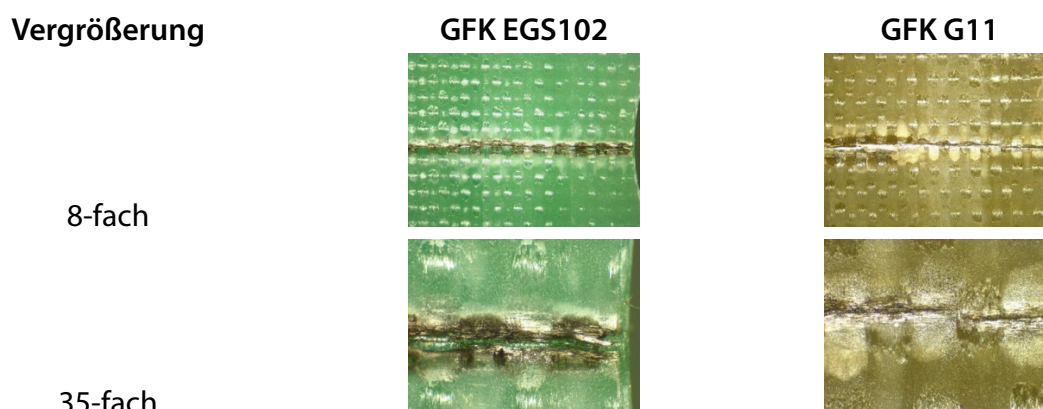


Abbildung 3.28: Vergrößerte Darstellungen der geraden Überschlagproben aus GFK mit den invasivsten Oberflächenentladungsspuren.

Aufgrund der guten Überschlagfestigkeiten in Flüssigstickstoff bzw. geringen bis keiner Beeinflussung der Durchschlagfestigkeiten von Flüssigstickstoff sowie weiterer allgemeingültiger Vorteile, wie gutes Preis-Leistungsverhältnis, Wiederverwertbarkeit, guter Säuren- und Fettbeständigkeit, Langlebigkeit, hoher Durchschlagfestigkeit und niedriger relativer Permittivität, wird für alle weiteren Untersuchungen der Überschlagproben in Flüssigstickstoff das Material PE-HD eingesetzt.

Gerade Überschlagproben bei unterschiedlichem Abstand

Zur Untersuchung der geometrischen Beeinflussungen der elektrischen Überschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff werden als nächstes gerade Überschlagproben für den Nominalabstand a von 5, 10 und 20 mm (Abschn. 3.4.2) nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.2.2 in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.29 dargestellt.

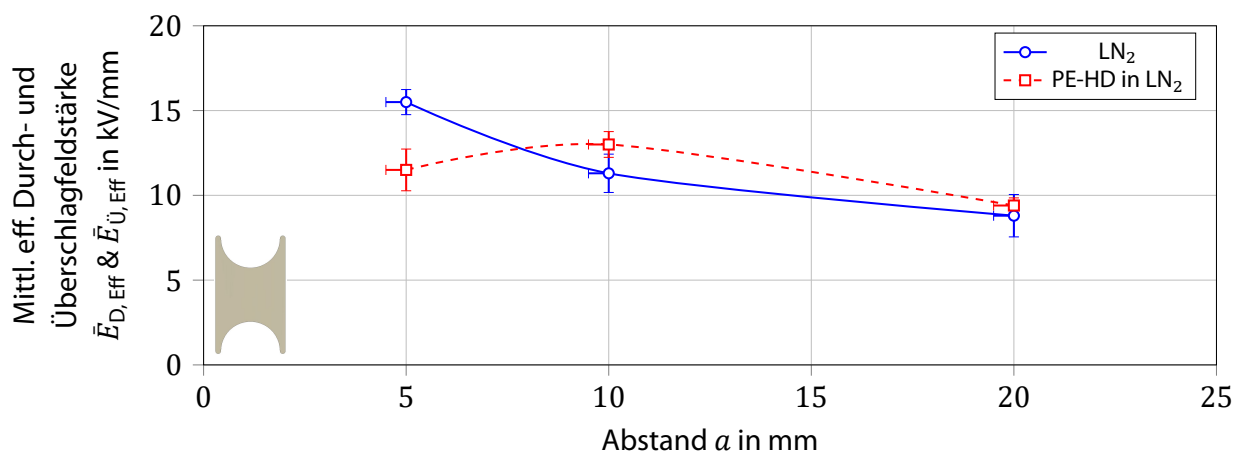


Abbildung 3.29: Darstellung der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von PE-HD Überschlagproben in LN₂ (rot) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN₂ (blau) in Abhängigkeit vom Nominalabstand a .

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Nominalabstand a von 5 mm die elektrische Überschlagfestigkeit von 11,4 kV/mm, gegenüber der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff, um ca. 26 % deutlich reduziert ist. Ab einem Nominalabstand a von 10 mm ist dies nicht mehr der Fall und die elektrische Überschlagfestigkeit entspricht annähernd der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff.

Möglicherweise beeinflussen die kombinierten einzelnen Materialeigenschaften, wie relative Permittivität und Profilrauigkeit der geraden Überschlagproben die elektrische Überschlagfeldstärke erst ab einer minimal kritisch belasteten Isolieroberfläche, die nur bei geringen Abständen überschritten wird. Jedoch bleibt diese Aussage nur eine Hypothese, da hierzu keinerlei dezidierte Untersuchungsergebnisse vorliegen. [114]

Gerade Überschlagproben mit Spalt

Zur Untersuchung der geometrischen Beeinflussungen der elektrischen Überschlagfeldstärke in Flüssigstickstoff werden gerade Überschlagproben für einen Nominalabstand a von 20 mm und mit zwei Spaltradien R_s von 1,0 und 1,5 mm (Abschn. 3.4.2) nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.2.2 in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.30 dargestellt.

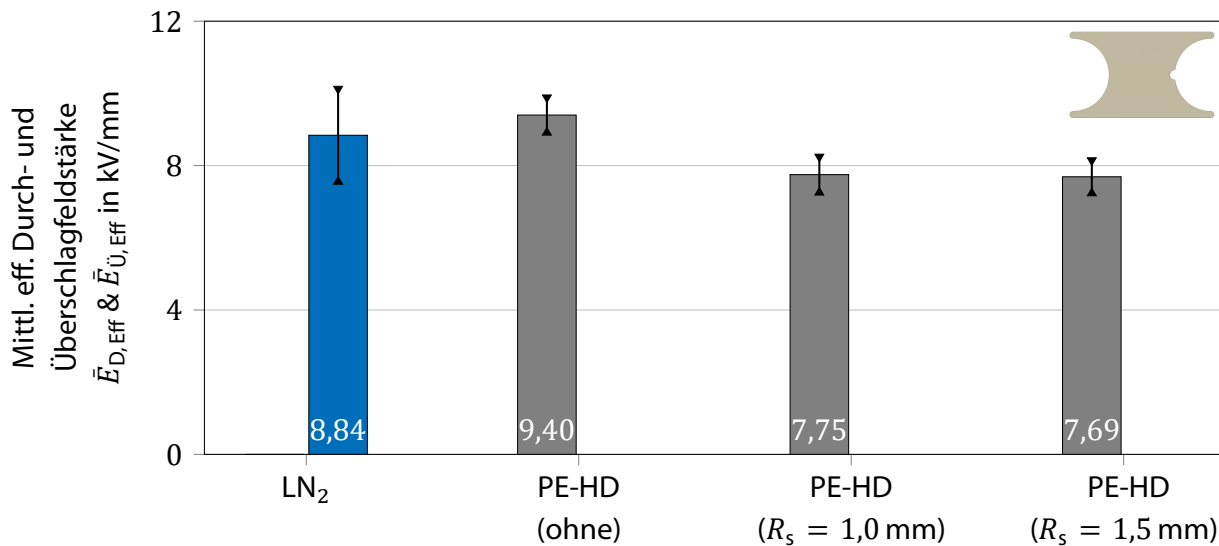


Abbildung 3.30: Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von geraden Überschlagproben aus PE-HD in LN₂ mit variablem Spaltradius (grau), im Vergleich zur geraden Überschlagproben ohne Spalt (grau) sowie zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN₂ (blau).

Wie zu erkennen führen die Spalte, im Vergleich zur geraden Überschlagprobe ohne Spalt, zu einer signifikanten Reduzierung der Überschlagfeldstärke um bis zu 18 %. Dabei hat die Vergrößerung der beiden Spaltradien von 1,0 zu 1,5 mm keinen entscheidenden Einfluss mehr.

Auch hierbei handelt es sich um den Einfluss geschichteter Dielektrika. Dieser tritt jedoch am Orte der höchsten in der Anordnung auftretenden Feldstärke, dem Tripel-Punkt zwischen Leiter, Flüssigstickstoff und Überschlagprobe auf, sodass der Einfluss des Spaltes, trotz der scheinbar geringen Spaltabmessung, erheblich größer ist. Somit wird erkennbar, dass jegliche Art von Spalt am Tripel-Punkt vermieden werden muss, sodass die höchstmögliche elektrische Festigkeit gewährleistet werden kann.

Gerade Überschlagproben mit Taillierung

Zur Untersuchung der geometrischen Beeinflussungen der elektrischen Überschlagfeldstärke in Flüssigstickstoff werden gerade Überschlagproben für einen Nominalabstand a von 20 mm mit zwei Taillierungen (Abschn. 3.4.2) nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.2.2 in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.31 dargestellt.

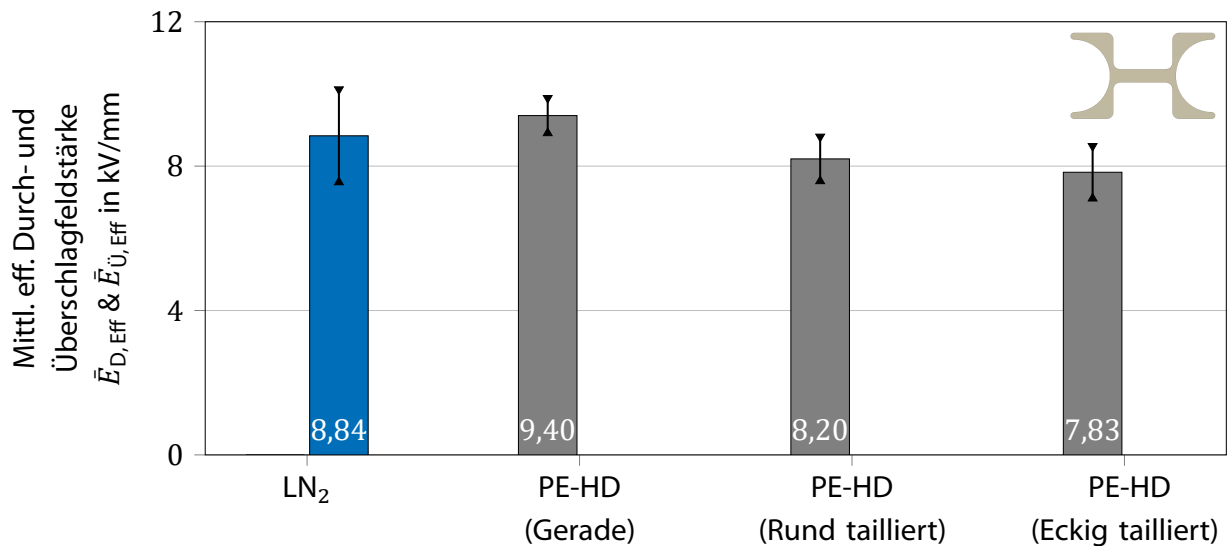


Abbildung 3.31: Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von geraden Überschlagproben aus PE-HD in LN₂ mit verschiedenen Taillierungen (grau), im Vergleich zur geraden Überschlagprobe ohne Taillierung (grau) sowie zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN₂ (blau).

Wie in Abbildung 3.31 zu erkennen ist, sinkt die Überschlagfeldstärke bei den Überschlagproben mit Taillierungen gegenüber der geraden Überschlagprobe ohne Taillierung. Dabei führt die eckige Taillierung zu einer, wenn auch nur marginalen, weiteren Reduzierung im Vergleich zur runden Taillierung.

Die Reduzierung der Überschlagfestigkeit hängt damit zusammen, dass die Taillierungen in Abstandsrichtung zu einer Querschichtung der Dielektrika, bestehend aus PE-HD und Flüssigstickstoff, führen. Die Schichtung wiederum führt an den Übergängen (PE-HD → LN₂) zu einer Feldverdrängung in das niederpermittive Medium, hier Flüssigstickstoff. Der relative Vergleich der elektrischen Feldverteilung in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung ($d_L = 22 \text{ mm}$, $a = 20 \text{ mm}$) in Flüssigstickstoff sowie der einer eckig taillierten Überschlagprobe in Abbildung 3.32 veranschaulicht den Feldverdrängungseffekt.

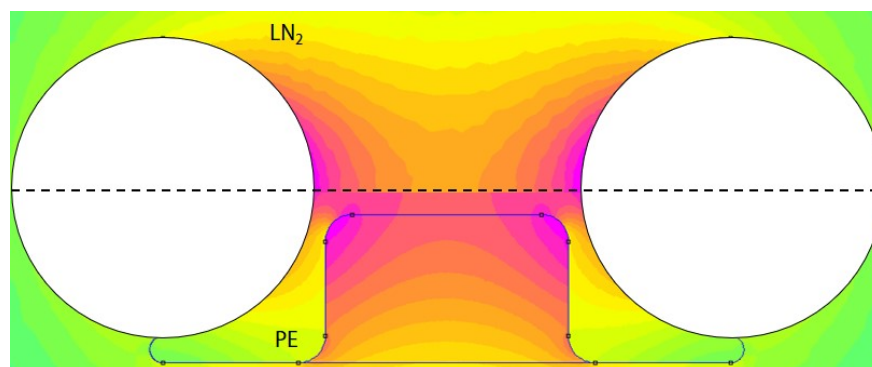


Abbildung 3.32: FEM-Berechnungsergebnis der elektrischen Feldverteilung ohne Überschlagprobe (oben) und mit eckig taillierter Überschlagprobe (unten) in LN₂.

Durch die Taillierung entsteht im flüssigen Stickstoff eine größere elektrische Feldstärkebelastung woraus wiederum ein größeres belastetes Isoliervolumen entsteht. Wie aus Abschnitt 2.5 bereits bekannt hat das eine Reduzierung der elektrischen Festigkeit zur Folge und führt in diesem Fall zu einem verfrühten elektrischen Überschlag.

Somit ist festzuhalten, dass geometrische Änderungen in gleicher räumlicher Orientierung wie es die taillierten Überschlagproben tun, zu einer Reduzierung der Überschlagfestigkeit führen, besonders wenn sich diese nahe dem Bereich maximaler elektrischer Feldstärken befinden.

3.4 Festigkeit einphasiger zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen

Wie im vorherigen Abschnitt werden die allgemeinen Anforderungen an die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung, zu sehen in Abbildung 3.4 als CAD-Modell, wie folgt umgesetzt:

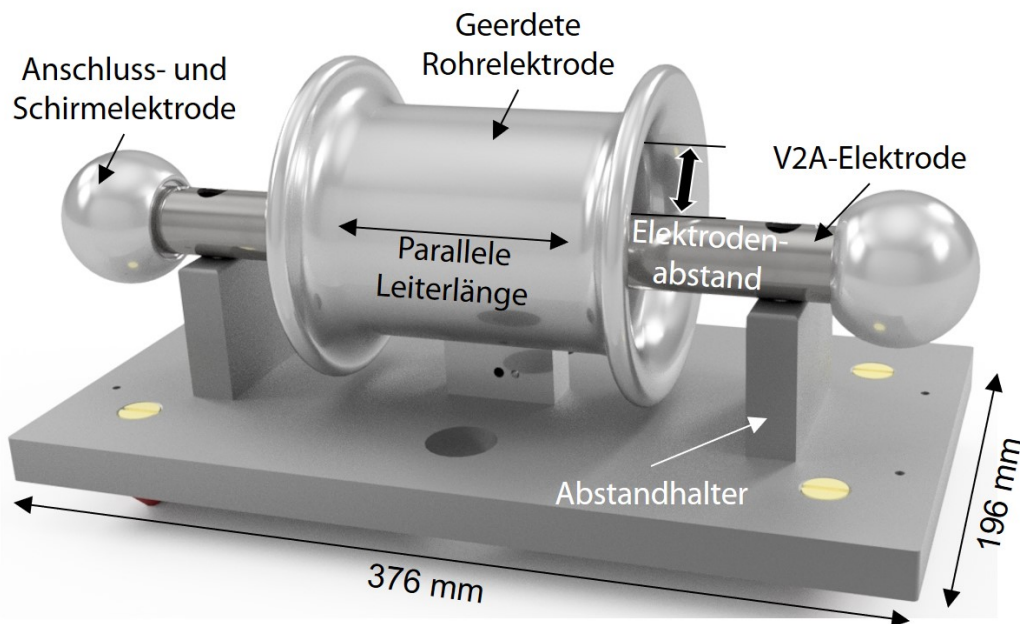


Abbildung 3.33: CAD-Modell des zentrisch-zylindrischen Versuchsaufbaus für einphasige empirische Untersuchungen.

In der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung werden, wie auch zuvor in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, Leiterelektroden mit dem Durchmesser 8, 15, 22 und 30 mm aus Edelstahl (V2A 1.4301) eingesetzt. Da sich die Leiterelektroden innerhalb der umgebenden geerdeten Rohrelektrode befinden, müssen hierbei die Enden nicht abgewinkelt, sondern lediglich länger als die umgebende geerdete Rohrelektrode sein. Die Längen der Leiterelektroden entsprechen demnach (ohne Abschlusselektroden) immer 300 mm. Zur elektrischen Abstimmung der Enden der Leiterelektroden werden dieselben Schirmelektroden wie bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung verwendet.

Für die umgebende geerdete Rohrelektrode wird, aufgrund der besseren mechanischen Bearbeitbarkeit, das Material Aluminium eingesetzt. Der Innendurchmesser der geerdeten Rohrelektrode wird so gewählt, dass in konzentrischer Position der Leiterelektrode jeweils ein nominaler Elektrodenabstand a von 25 mm erreicht wird. Dadurch ergibt sich zu direkten Vergleichszwecken in etwa der gleiche relevante Abstand a , wie bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung. Somit beträgt der Innendurchmesser der geerdeten Rohrelektrode 58, 65, 72 und 80 mm. Die Rohrwandstärke der geerdeten Rohrelektrode beträgt 5 mm. Die elektrisch belastete parallele Leiterlänge von Leiterelektrode zu geerdeter Rohrelektrode beträgt, aufgrund der direkten

Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, ebenfalls 100 mm. Damit es an den Enden der geerdeten Rohrelektrode aufgrund von Inhomogenitäten, nicht zu unbeabsichtigten Feldstärkerhöhungen und vorzeitigen elektrischen Entladungen kommt, läuft der Innendurchmesser mit einem Verrundungs- bzw. Absterradius von 25 mm auf einen vergrößerten Durchmesser von 108, 115, 122 und 130 mm aus.

Die Einstellung des Elektrodenabstandes erfolgt, anders als bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, nicht kontinuierlich sondern äquidistant. Die Leiterelektroden werden auf Hart-PVC Abstandshaltern außerhalb der geerdeten Rohrelektrode verschraubt. Die Höhe der Abstandshalter positioniert die Leiterelektroden horizontal mittig in der geerdeten Rohrelektrode. Beim größten Abstand von 25 mm sind die Leiter- und Rohrelektrode zueinander konzentrisch positioniert. Der Elektrodenabstand zwischen jeder Leiter- und geerdeten Rohrelektrode kann, durch äquidistante Gewindebohrungen auf den Abstandhaltern in 5 mm-Abständen entlang der horizontalen Achse, bis zu einem exzentrischen Mindestabstand von 5 mm verringert werden.

Zwecks Montage auf eine Hart-PVC Grundplatte werden die geerdeten Rohrelektroden auf einen Aluminiumsockel von (H × B × T) 25 × 50 × 20 mm geschweißt. Damit die Versuchsanordnungen ebenfalls wieder in allen verfügbaren offenen EPP-Behältern eingesetzt werden können, beläuft sich jede Grundfläche auf 376 × 196 mm. Die höchste Gesamthöhe von ca. 180 mm erreicht die Leiteranordnung mit der 80 mm Rohrelektrode. Damit sich in der geerdeten Rohrelektrode keine Gasblasen anlagern, werden die Standfüße der Grundplatte auf den Seiten der Rohröffnungen mit einer Höhendifferenz von 5 mm gefertigt. Dadurch stehen die Versuchsanordnungen geneigt in den LN₂-gefüllten EPP-Behältern und Gasansammlungen können somit entweichen.

Die Fertigungsgenauigkeit der Leiterelektroden wird, wie zuvor bei den parallel-zylindrischen Leiteranordnung, ermittelt. Bei der Ermittlung der Fertigungsgenauigkeit der Rohrelektroden wird ebenfalls an drei Stellen entlang der parallelen Leiterlänge von 100 mm der Istdurchmesser ermittelt, allerdings mittels eines analogen Schnelltasters mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm. Von jeder V2A-Leiterelektrode werden insgesamt vier Stück und von jeder geerdeten Rohrelektrode ein Stück hergestellt, damit eine separate Versuchsanordnung je Elektrodenkonfiguration für experimentelle Untersuchungen aufgebaut werden kann. Alle relevanten Eigenschaften sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Tabelle 3.7: Eigenschaften der Elektroden für die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung.

Eigenschaft	Leiterelektroden-Durchmesser			
	8 mm	15 mm	22 mm	30 mm
Material Leiterelektrode	Edelstahl - V2A 1.4301			
Material Rohrelektrode	Aluminium			
Stab/-Rohrdurchmesser Leiter	8 mm Vollstab	15 × 2 mm	22 × 1 mm	30 × 2 mm
Fertigungsgenauigkeit	7,95 ± 0,02 mm	15,06 ± 0,01 mm	22,10 ± 0,07 mm	29,92 ± 0,09 mm
Rohrinnendurchmesser geerdete Elektrode	58 mm	65 mm	72 mm	80 mm
Fertigungsgenauigkeit	57,3 ± 0,3 mm	64,5 ± 0,2 mm	72,2 ± 0,3 mm	79,7 ± 0,3 mm
Parallele Länge	100 mm			
Absteuerradius geerdete Elektrode	30 mm			
Max. Elektrodenabstand	25 mm			
Aluminium- Abschlusskugeldurch- messer	20 mm	30 mm	40 mm	60 mm
Leiterelektrodenanzahl	je 10 Stk.			
Rohrelektrodenanzahl	je 1 Stk.			

Zur Ermittlung der Abstandsungenauigkeit werden an jedem Elektrodendurchmesser d_L Vergleichsmessungen bei den Nominalabständen 5, 15 und 25 mm, vor und nach dem Einsatz in Flüssigstickstoff, vorgenommen. Die relativen Abweichungen, bezogen auf den eingestellten Nominalabstand a , variieren bis zu 6 %, sodass als Abstandsungenauigkeit für alle Durchschlaguntersuchungen mit der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung eine relative Abweichung von ± 6 % angenommen wird.

Für die zentrisch-zylindrische Leiteranordnungen wird, wie zuvor für die parallel-zylindrische Leiteranordnung, der Schwaiger'sche Ausnutzungsfaktor berechnet und in Abbildung 3.34 dargestellt.

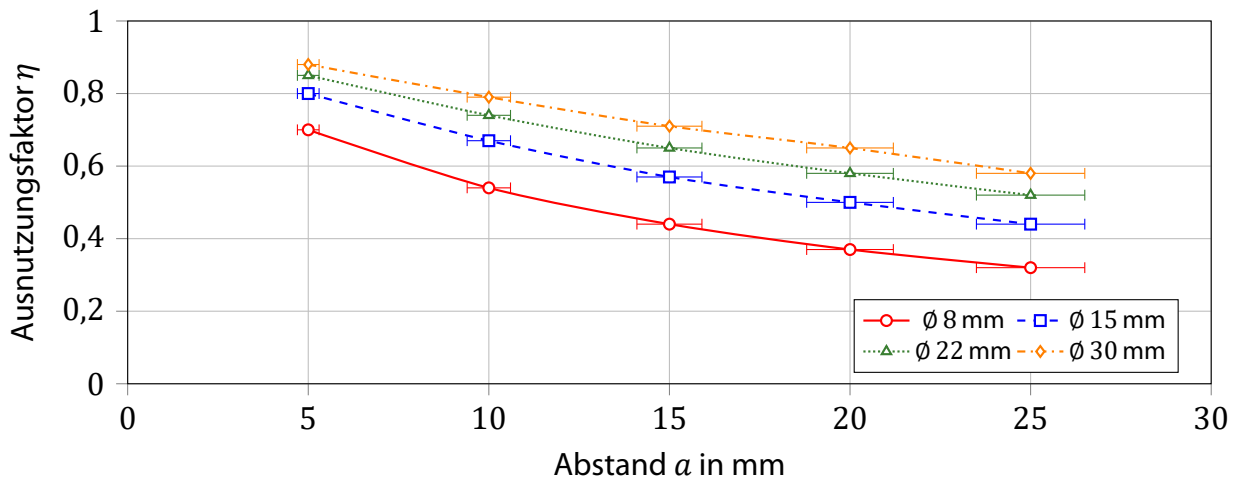


Abbildung 3.34: Verläufe des Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktors η zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Fotografische Aufnahmen zur zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung finden sich in Anhang A.2.

3.4.1 AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

AC-Durchschlagfestigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen unter Wechselfeldbeanspruchung, ermittelt nach Abschnitt 3.2.2, dargestellt.

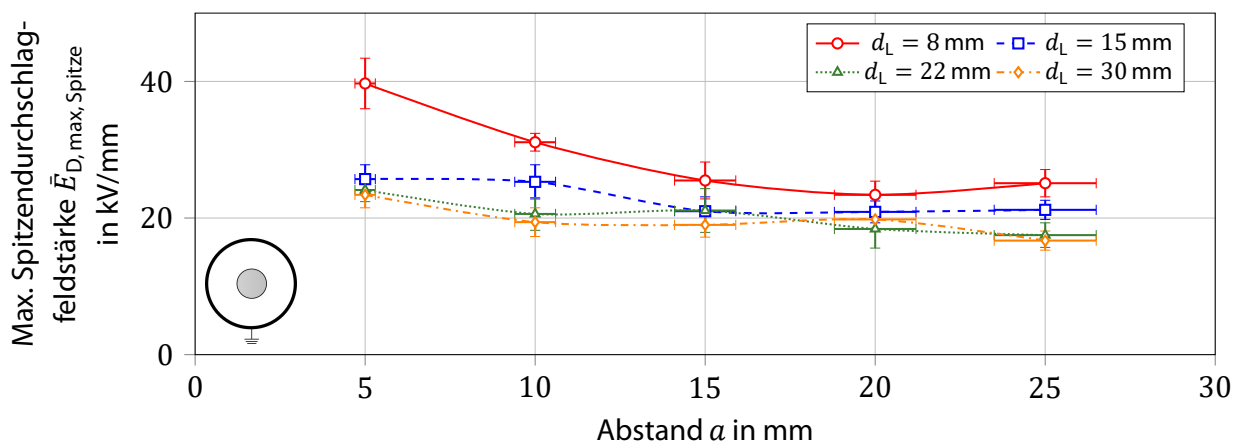


Abbildung 3.35: Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D,max,Spitze}$ von LN_2 in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Die Ergebnisse der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D,max,Spitze}$ der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abbildung 3.35 verhalten sich im Wesentlichen wie die Ergebnisse der parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abschnitt 3.3.1. Die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D,max,Spitze}$ nimmt etwas deutlicher, in Abhängigkeit des zunehmenden Nominalabstandes a , ab und verläuft asymptotisch auf ein Festigkeitsplateau. Die Variation des Leiterelektroden-Durchmessers d_L zeigt, bei gleichem Nominalabstand a , erneut nur insignifikante Einflüsse. Jedoch kann, im Vergleich zur parallel-zylindrischen Leiteranordnung, tendenziell deutlicher erkannt werden, dass die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D,max,Spitze}$ mit

zunehmendem Leiterelektroden-Durchmessers d_L leicht abnimmt. Auch wenn dieser Einfluss mit steigendem Nominalabstand a immer geringer ausfällt. [115]

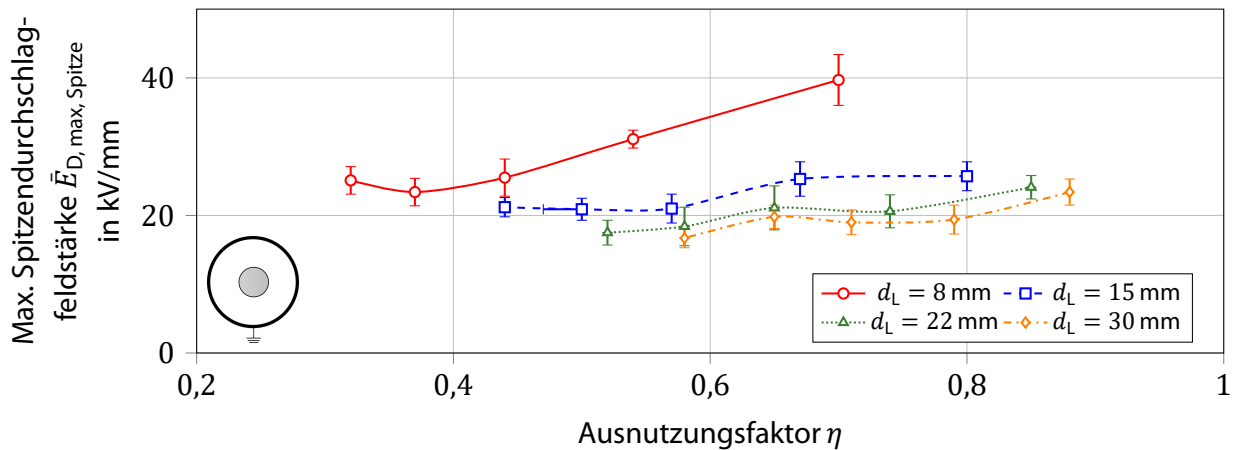


Abbildung 3.36: Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ von LN_2 in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η .

Der Ausnutzungsfaktor der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen umfasst einen größeren Wertebereich von 0,88 bis ca. 0,32 und verdeutlicht, dass diese Anordnungen inhomogener ausfallen. Auch bei der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung überlagert sich die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ der Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 15, 22 und 30 mm wieder weitestgehend, auch wenn im Mittel etwas differenzierter. Einzig der Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 8 mm unterscheidet sich signifikant von den anderen Leiterelektroden-Durchmessern. Somit zeigt sich auch bei zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen eine größere Abhängigkeit der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ vom Nominalabstand a als vom Leiterelektroden-Durchmesser d_L . So scheint der Schwaiger'sche Ausnutzungsfaktor zur optimalen Auslegung zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff ebenfalls nur für größere Abstands-Durchmesser-Verhältnisse anwendbar.

Als Nächstes werden die Durchschlagergebnisse der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen nach dem Volumen- und Flächeneffekt ausgewertet und in Abbildung 3.37 und 3.38 graphisch dargestellt.

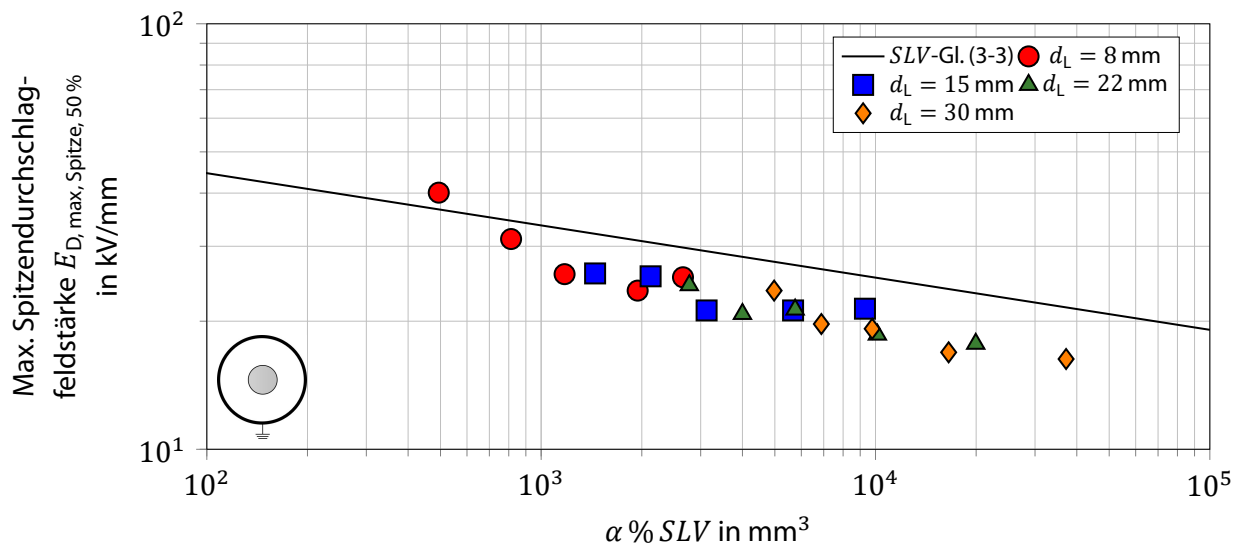


Abbildung 3.37: Darstellung der berechneten maximalen Spitzenfeldstärken $E_{D,max,Spitze,50\%}$ und numerisch ermittelten entscheidend belasteten Volumen $\alpha \% SLV$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes.

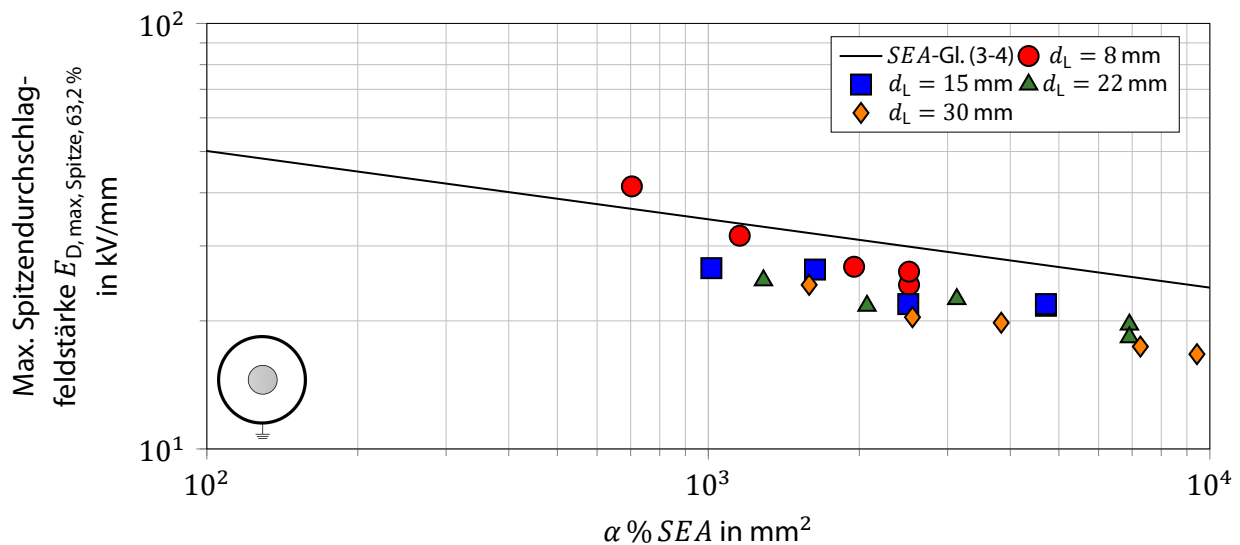


Abbildung 3.38: Darstellung der berechneten maximalen Spitzenfeldstärken $E_{D,max,Spitze,63,2\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidend belasteten Flächen $\alpha \% SEA$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Flächeneffektes.

Hier zeigt sich erneut, dass auch die elektrischen Durchschlagfeldstärken in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen entsprechend der Theorie der Vergrößerungsgesetze mit zunehmendem SLV und SEA abnehmen.

Im direkten Vergleich zur Gleichung 3-3 für den Volumen- und nach Gleichung 3-4 für den Flächeneffekt fallen die elektrischen Durchschlagfeldstärken erneut geringer aus. Jedoch ist die mittlere Abweichung sowie zugehörige absolute Standardabweichung der Stichprobe beim SLV mit $-20\% \pm 9\%$ und beim SEA mit $-21\% \pm 10\%$ um ca. zehn Prozentpunkte geringer als zuvor bei den parallel-zylindrischen Leiteranordnungen.

Ein möglicher Grund könnte sein, dass sich die Isolierstrecke des Flüssigstickstoffs im Inneren der geerdeten Rohrelektrode der waagerechten zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen befindet. Dadurch könnte der festigkeitsmindernde Einfluss von zusätzlichen N_2 -Gasblasen,

die insbesondere am Boden des EPP-Behälters entstehen und bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung direkt durch die Isolierstrecke aufsteigen, deutlich verringern.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 erwähnt werden zur Be- oder Widerlegung dieser Hypothese in den Hauptuntersuchungen, unter Kapitel 5, elektrische Durchschlaguntersuchungen in einem LN₂-Badkryostaten durchgeführt.

LI-Durchschlagfestigkeit

Wie auch zuvor bei den parallel-zylindrischen Leiteranordnungen werden die Ergebnisse der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung, ermittelt nach der Versuchsdurchführung aus Abschnitt 3.2.3, in den Abbildungen 3.39 und 3.40 dargestellt. Da es sich bei der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung um eine asymmetrische Anordnung handelt, wird sowohl die positive als auch negative Stoßpolarität untersucht.

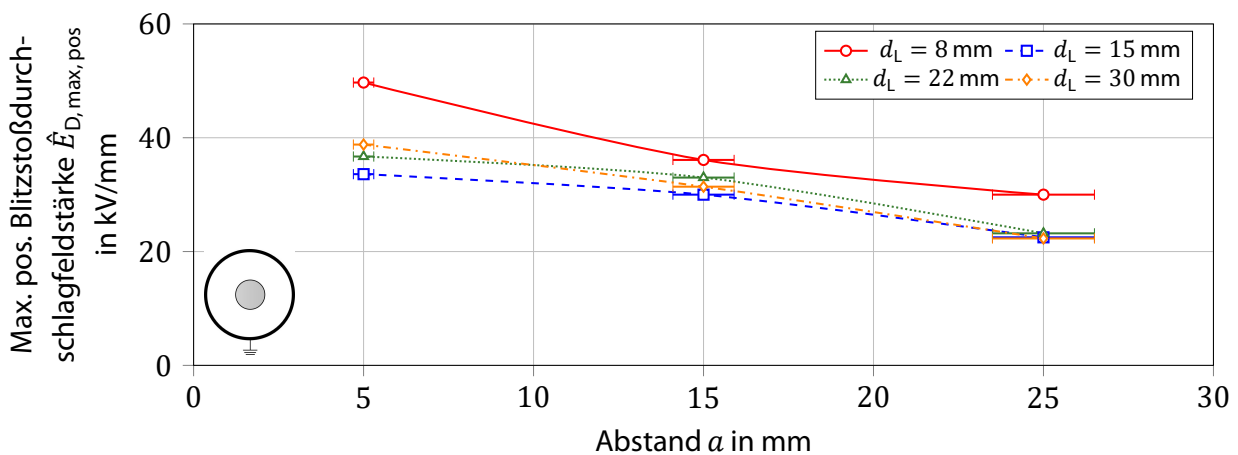


Abbildung 3.39: Verläufe der maximalen positiven Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D,max,pos}$ von LN₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

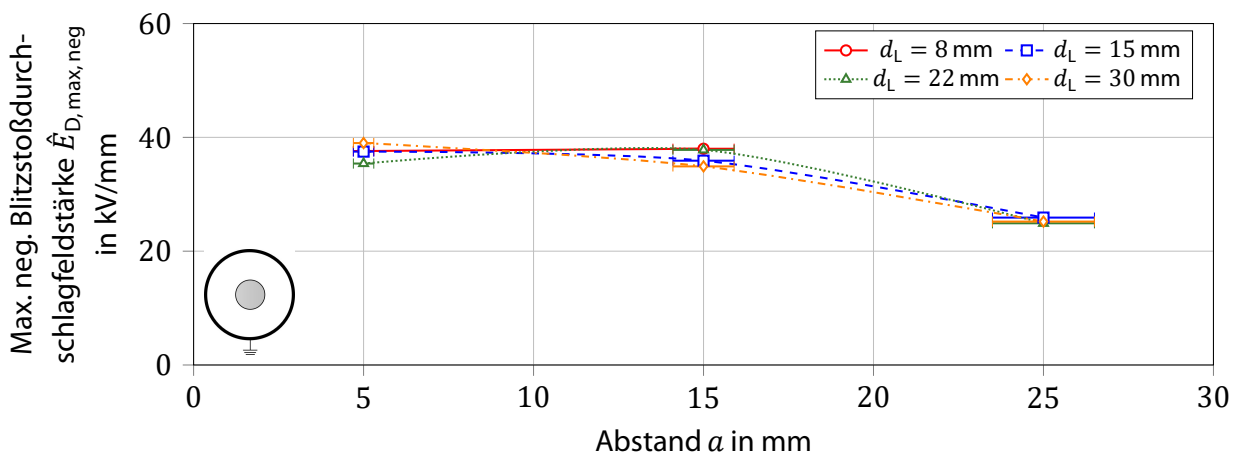


Abbildung 3.40: Verläufe der maximalen negativen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D,max,neg}$ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Bei den Festigkeitsverläufen den Abbildungen 3.39 und 3.40 zeigt sich ein teilweise anderes Verhalten als in Abschnitt 3.3.1 zur elektrischen Blitzstoßfestigkeit von Flüssigstickstoff in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Hierzu sind zuvor jedoch auch zwei wesentliche Unterschiede

zu berücksichtigen. Zum einen wird in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung ein größerer Nominalabstand a , mit bis zu 25 mm untersucht und zum anderen fällt der Ausnutzungsfaktor η mitunter deutlich geringer aus, woraus eine größere Inhomogenität des elektrischen Feldes rührt. Diese beiden Unterschiede nehmen einen signifikanten Einfluss auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff.

Bei Betrachtung der maximalen positiven und negativen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke in den Abbildungen 3.39 und 3.40 wird ersichtlich, dass diese mit zunehmendem Nominalabstand a abnimmt und nicht konstant verläuft, wie es aus den Untersuchungsergebnissen zu parallel-zylindrischen Leiteranordnungen aus Abschnitt 3.3.1 zu entnehmen ist.

Eine Beeinflussung durch die Stoßpolarität lässt sich nicht anhand der Messwerte, die sich bei beiden Stoßpolaritäten innerhalb desselben Wertebereichs befinden, ausmachen. Höchstens anhand des Verlaufs der Festigkeitswerte über den Abstand kann ein Unterschied ausgemacht werden, da dieser bei positiver Stoßpolarität linear abfällt während bei negativer Stoßpolarität ein degressiver Verlauf vorliegt. Was der Grund für diese Verläufe in Abhängigkeit der Stoßpolarität sein kann, ist unbekannt.

Auch die Auswertung der Verhältnisse aus maximaler positiver und negativer Blitzstoßdurchschlagfeldstärke zur AC-Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, AC\text{-Spitze}}$, dargestellt in den Abbildungen 3.41 und 3.42, zeigt demnach ein anderes Verhalten.

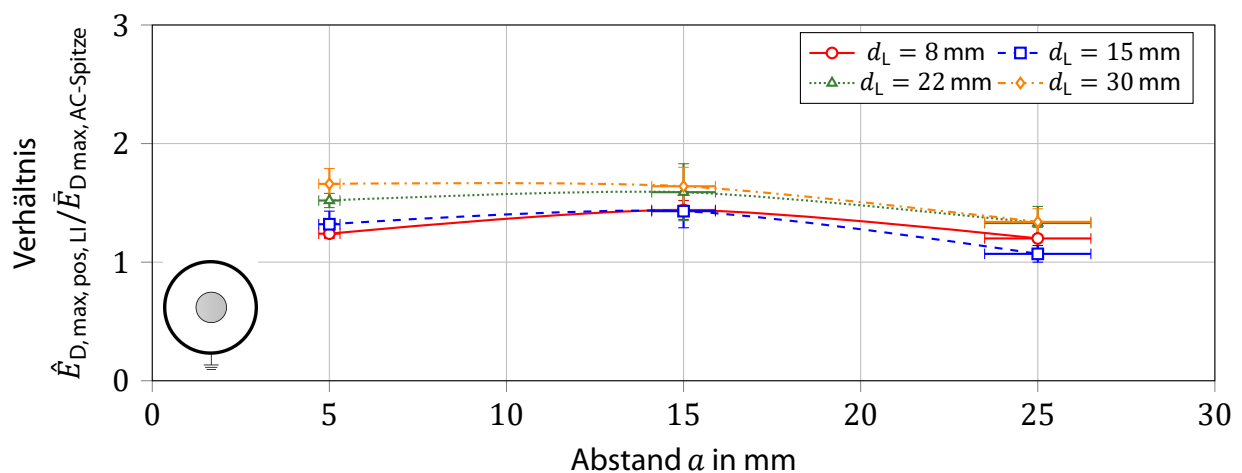


Abbildung 3.41: Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D, \max, pos, LI} / \bar{E}_{D, \max, AC\text{-Spitze}}$ von LN_2 in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

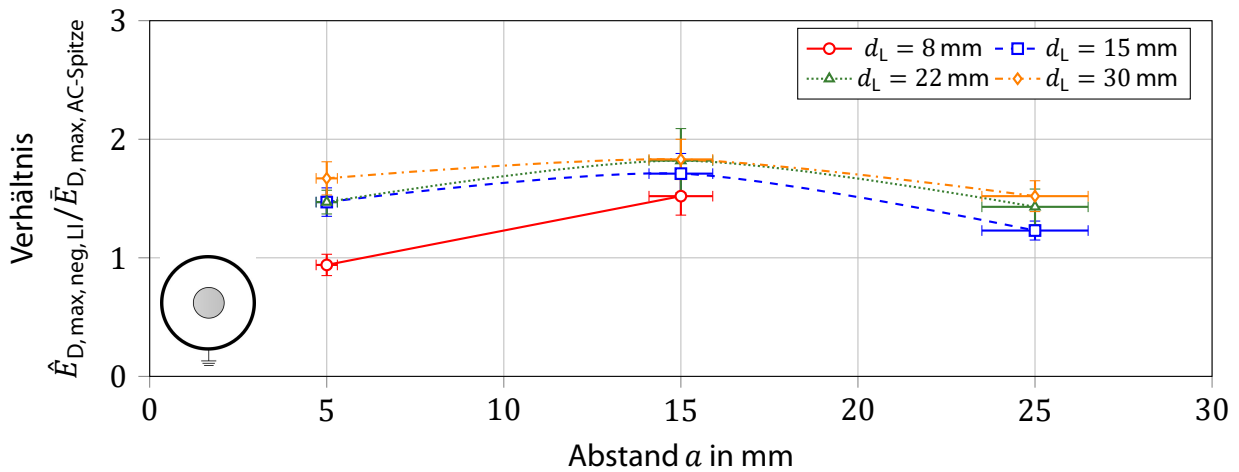


Abbildung 3.42: Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D,max,neg,Ll}/\bar{E}_{D,max,AC-Spitze}$ von LN_2 in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Abstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

Beide Verhältnisse verlaufen, in Abhängigkeit vom zunehmenden Nominalabstand a , im Bereich von 5 bis 15 mm konstant bis leicht ansteigend und im Bereich von 15 bis 25 mm leicht absteigend.

Generell liegt die elektrische Blitzstoßdurchschlagfeldstärke von Flüssigstickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen, wie in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen, immer noch über der AC-Durchschlagfeldstärke, jedoch nur noch um den Faktor 1 bis 2 und nicht mehr um den Faktor 1,5 bis 3 (Abschn. 3.3.1).

Die allgemeingültige Theorie zur erhöhten elektrischen Durchschlagfestigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen ist die Gleiche wie die für parallel-zylindrische Leiteranordnungen in Abschnitt 3.3.1. Allerdings zeigen die Verläufe der Ergebnisse in den Abbildungen 3.39 bis 3.42, dass auch die elektrische Durchschlagfestigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung abzunehmen scheint. Diese vermeintliche elektrische Festigkeitsabnahme rührt wahrscheinlich daher, dass mit steigendem Nominalabstand a die Feldstärkeverteilung vor der Leiterelektrode bzw. auf der belasteten Fläche und / oder im belasteten Isoliervolumen nicht durchweg gleich bleibt oder gar abnimmt sondern zunimmt. Welches der beiden Vergrößerungsgesetze hierbei mehr Einfluss auf die elektrische Festigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung nimmt, ist dabei nicht differenzierbar. Ab einem Nominalabstand a von 15 mm scheint die Belastung durch die, den inneren Leiter umschließende, äußere geerdete Rohrelektrode zuzunehmen und einen größer werdenden Beitrag zum entscheidend belasteten Volumen bzw. zur Fläche zu liefern, sodass die elektrische Festigkeit abnimmt.

3.4.2 AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben

Überschlagproben in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse unterschiedlicher vereinfachter Überschlagproben in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung in Flüssigstickstoff dargestellt. Ziel ist es herauszufinden, inwieweit abgeleitete geometrische Eigenschaften von Stützisolatoren Einfluss auf die Durch- bzw. Überschlageigenschaften von Flüssigstickstoff unter elektrischer Leiter-Erd-Belastung bei dreiphasiger Wechselspannungsbeanspruchung nehmen.

Für Untersuchungen der Variation des Nominalabstandes a werden ebenfalls wieder gerade Überschlagproben für die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung hergestellt, wie in Abbildung 3.43 dargestellt. Der Nominalabstand a beträgt bei diesen 5, 10, 15, 20 und 25 mm. Der Verrundungsradius der Überschlagprobe am Innenleiter R_{vi} beträgt (analog zur parallel-zylindrischen Anordnung) 11 mm. Aufgrund der geerdeten Rohrelektrode und dessen Innenradius ergibt sich ein äußerer Verrundungsradius R_{va} an der Überschlagprobe von 36 mm. Die Überschlagproben werden ebenfalls aus PE-HD gefertigt, mit einer Materialstärke s von 8 mm.

Da während der Versuche ein Austausch der Überschlagproben im Inneren der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung nicht möglich ist, wird nur eine Probe untersucht. Um bei einem Probenausfall Ersatz bereitzuhalten, werden fünf Stück je Nominalabstand a hergestellt.

Weiterhin werden geneigte Überschlagproben für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung hergestellt. Hierbei wird sich an den geraden Überschlagproben mit variierendem Nominalabstand für die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung orientiert und die geometrischen Eigenschaften, wie Materialstärke und Verrundungsradien, beibehalten. Als Nominalabstand a werden 5, 15 und 25 mm und als Neigungswinkel α (in Bezug zum lichten Abstand) 30° und 60° gewählt. In Abhängigkeit des Neigungswinkels erhöht sich somit die Überschlagstrecke entlang der Grenzfläche vom Nominalabstand a auf die Strecke b . Von jedem Nominalabstand a mit jedem Neigungswinkel α wird je eine Überschlagprobe aus PE-HD untersucht, da diese während der Untersuchungen in Flüssigstickstoff nicht gewechselt werden können. Jedoch werden für den Fall einer Zerstörung von jeder geneigten Überschlagprobe drei Stück hergestellt.

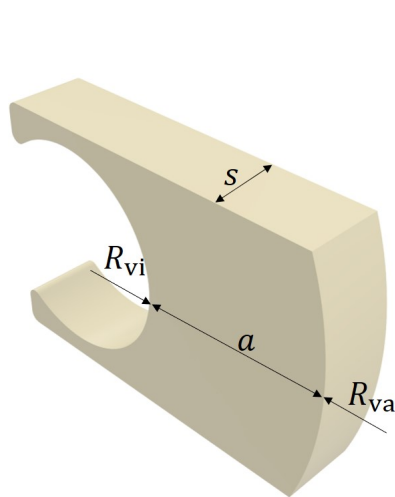


Abbildung 3.43: Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.

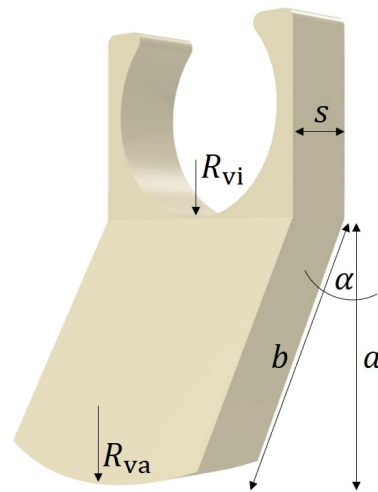


Abbildung 3.44: Modell der geneigten Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und Neigungswinkel für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.

Die Fertigungsgenauigkeit aller Überschlagproben wird mittels eines digitalen Messschiebers mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm ermittelt und ist tabellarisch in Anhang A.5 dargestellt. Grundsätzlich kann zur Fertigungsgenauigkeit, bezogen auf den Nominalabstand a , aller geraden Überschlagproben festgehalten werden, dass diese $\pm 0,05$ mm und bei den geneigten Überschlagproben $\pm 0,3$ mm beträgt.

Fotografische Aufnahmen sind ebenfalls in Anhang A.4 dargestellt.

Gerade Überschlagproben bei unterschiedlichem Abstand

Zur Untersuchung der geometrischen Beeinflussungen der elektrischen Überschlagfeldstärke in Flüssigstickstoff werden gerade Überschlagproben für den Nominalabstand a von 5, 10, 15, 20 und 25 mm, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, hergestellt und in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung, bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.45 dargestellt.

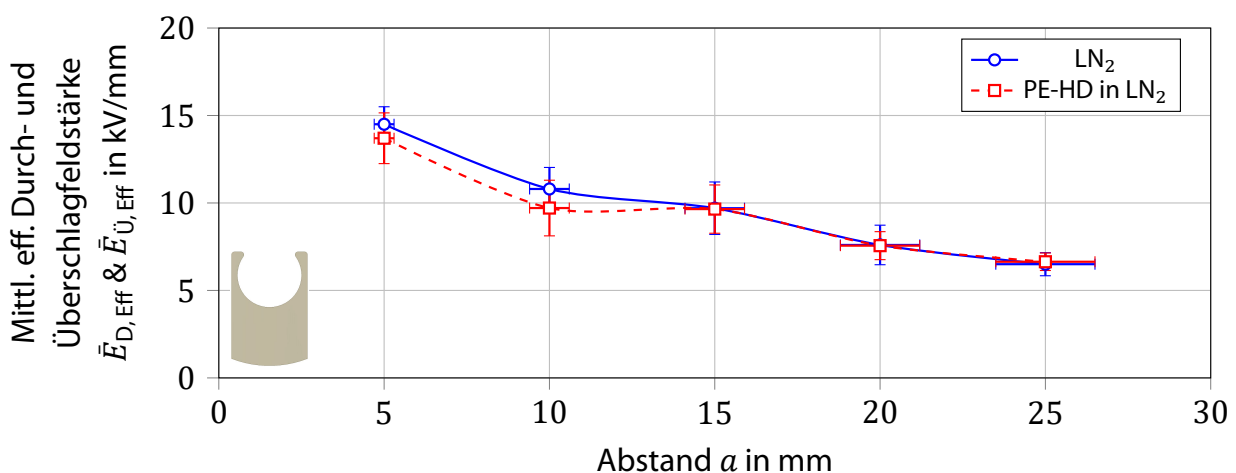


Abbildung 3.45: Darstellung der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{U, \text{Eff}}$ von PE-HD Überschlagproben in LN₂ (rot) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN₂ (blau) in Abhängigkeit vom Nominalabstand a .

Wie Abbildung 3.45 zu entnehmen ist, erfolgt durch das Einbringen gerader Überschlagproben mit variablem Nominalabstand a von 5 bis 25 mm keine Beeinträchtigung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen.

Geneigte Überschlagproben bei unterschiedlichem Neigungswinkel

Zur Untersuchung der geometrischen Beeinflussungen der elektrischen Überschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff werden geneigte Überschlagproben für den Nominalabstand a von 5, 15 und 25 mm sowie dem Neigungswinkel 30 und 60°, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, hergestellt und nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.2.2, in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung bei einem Leiterelektroden-Durchmesser d_L von 22 mm untersucht.

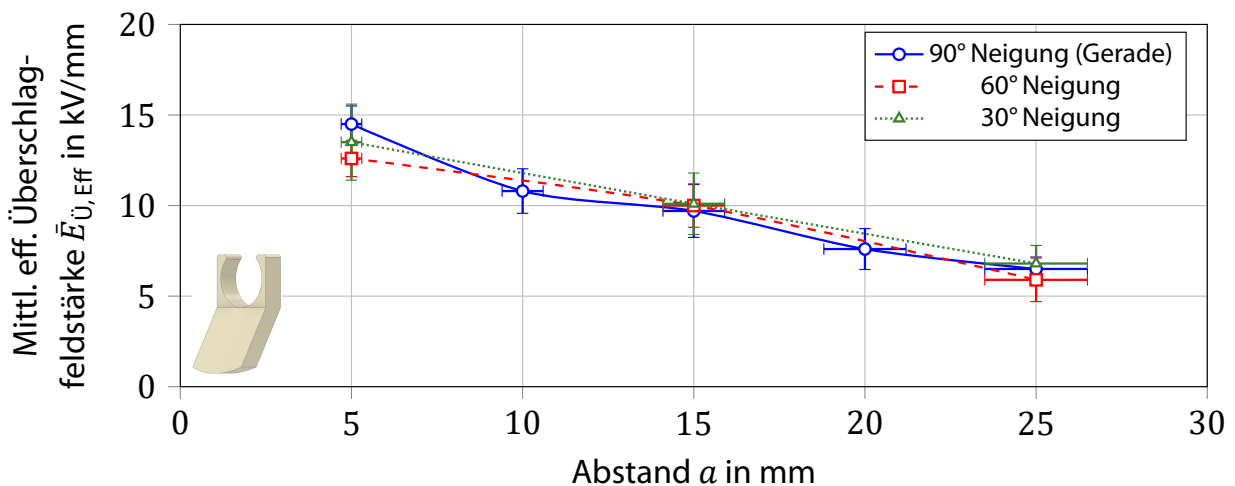


Abbildung 3.46: Darstellung der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{E}_{U, \text{Eff}}$ von PE-HD Stützerproben in LN_2 mit verschiedenen Neigungswinkeln (rot & grün) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{Eff}}$ von LN_2 (blau) und in Abhängigkeit vom Nominalabstand a .

Aus Abbildung 3.46 kann entnommen werden, dass die Variation des Neigungswinkels α von 30, 60 bis 90° (Gerade) bei geneigten Überschlagproben, anders als bei den Untersuchungsergebnissen in Abschnitt 3.4.2, keinerlei Einfluss auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen nimmt.

Allgemein lässt sich aus den ermittelten Ergebnissen zur Überschlagfestigkeit der Überschlagproben in Flüssigstickstoff in erster Näherung schlussfolgern, dass Material, Abstand, Spalte, Taillierung und Neigung einen individuellen Einfluss nehmen können aber nicht müssen.

So zeigen die Ergebnisse zur Überschlagfestigkeit verschiedener Materialien keine direkte kausale Korrelation zur relativen Permittivität ε_r auch wenn Unterschiede in dieser existieren. Was die Ursache der variierenden Überschlagfestigkeit letztlich ist, lässt sich abschließend nicht eindeutig klären. Auch weil eine Vielzahl an nicht-quantifizierbaren Faktoren, wie bspw. der Eisanteil, der Füllstand, die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit, etc., Einfluss auf die Ermittlung der elektrischen Überschlagfestigkeit nehmen können.

Auch der betrachtete Nominalabstand von 5 bis 25 mm zeigt, im Vergleich zur Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff, nur bei kleinem Nominalabstand a von 5 mm und auch nur in der parallel-zylindrischen Leiteranordnungen eine Beeinflussung der Überschlagfestigkeit. Entweder kann angenommen werden, dass Überschlagproben erst bei kleinem Nominalabstand a in Kombination mit einer homogeneren elektrischen Feldverteilung einen signifikanten Einfluss,

bspw. durch die Oberflächenrauheit, nehmen oder aber es handelt sich erneut um den Einfluss nicht-quantifizierbarer Faktoren.

Spaltradien von einem Millimeter am Tripel-Punkt direkt vor den Leiterelektroden führen indes bereits zu einer signifikanten Reduzierung der Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff. Somit gilt es diese so gut wie möglich zu vermeiden, was in einem industriellen Herstellungsprozess am besten mittels Spritzgussverfahren realisierbar wäre, indem ein Stützisolator direkt um eine Leiteranordnung extrudiert würde.

Ebenfalls haben Taillierungen einen signifikanten Einfluss auf die Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff. Nun sind Taillierungen aber essentiell für Stützisolatoren mit möglichst geringer Querschnittsfläche. Um dennoch Taillierungen einsetzen zu können, sind individuelle FEM-Analysen notwendig. Je näher die Taillierungen an den Leiterelektroden in hochbelasteten elektrischen Feldbereichen verlaufen, umso größer wird die negative Beeinflussung der Überschlagfestigkeit. Umgekehrt werden demnach erhöhte Hülsenwandstärken, die die Grenzschicht in Bereiche mit geringerer Feldstärke verschieben, eine positive Beeinflussung der Feldverteilung hervorrufen und dazu führen, dass Taillierungen zur Reduzierung der Querschnittsfläche möglich werden.

Neigungen von Überschlagproben, wie sie bei Isolatoren für Isoliertgase eingesetzt werden, um dem Grenzflächenphänomen durch eine verlängerte Kriechwegstrecke entgegenzuwirken, zeigen indes in Flüssigstickstoff keinen Einfluss auf die Überschlagfestigkeit von Überschlagproben. Insgesamt lässt sich aus den Voruntersuchungsergebnissen zur Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff die Erkenntnis gewinnen, dass eine eindeutige oder gar extreme Beeinflussung dieser, im Vergleich zur Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff, nicht besteht. Daher scheinen dreiphasige Stützisolatoren mit geringer Querschnittsfläche, unter der Beachtung weniger Kriterien, wie der Vermeidung geringer Abstände sowie von Spalten und Taillierungen nahe der Leiterelektrode und elektrisch hochbelasteter Feldstärkebereiche, für den Einsatz in Flüssigstickstoff entwickel-, konstruier- und einsetzbar.

4 Simulationen und Modellierung eines optimierten Stützisulators

Im vorangegangenen Kapitel 3 sind die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff sowie die Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff in parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen ermittelt worden. Anhand dieser Erkenntnisse wird in diesem Kapitel ein Stützisulator entworfen, dessen geometrische Eigenschaften die elektrische Durch- und Überschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in dreiphasigen LN_2 -isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystemen nicht beeinträchtigt und dennoch einen möglichst großen Durchfluss an Flüssigstickstoff ermöglicht.

Dazu müssen zu Beginn die Voraussetzungen und Randbedingungen für ein grundlegendes Simulationsmodell, bestehend aus der geometrischen Anordnung der drei einzelnen Leiter und dem umgebendem Rohrkryostat, definiert werden, innerhalb dessen die elektrischen Feldstärke-simulationen stattfinden. Des Weiteren werden die als relevant erachteten geometrischen Designeigenschaften eines dreiphasigen Stützisulators definiert, woraufhin diese in unterschiedlichen zweidimensionalen Finite-Elemente-Methode-Simulationen (kurz: 2D-FEM) dezidiert auf ihren Einfluss auf die elektrische Feldstärkeverteilung untersucht werden. Abschließend wird, in Abhängigkeit der Erkenntnisse der einzeln untersuchten geometrischen Designeigenschaften, ein dreidimensionales Gesamtmodell eines dreiphasigen Stützisulator konstruiert und dessen Einfluss auf die elektrische Feldstärkeverteilung in finalen dreidimensionalen Finite-Elemente-Methode-Simulationen (kurz: 3D-FEM) untersucht.

4.1 Voraussetzungen und Randbedingungen des Simulationsmodells

Einem grundlegenden Simulationsmodell gehen eine Reihe von Vorüberlegungen voraus, die letztlich allesamt Einfluss auf dieses sowie die darauffolgende Auslegung eines dreiphasigen Stützisulators nehmen.

Die Erkenntnisse der Voruntersuchungen zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff lieferten, unter Betrachtung des Volumen- und Flächeneffektes, eine bis zu 30 % geringer ausfallende elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff (Abschn. 3.3.1) im Vergleich zu den empirischen Formalismen (Gl. 3-3 und 3-4). Daher sind finale elektrische Festigkeitsuntersuchungen obligatorisch um nachzuweisen, ob es sich um äußere festigkeitsreduzierende Einflüsse, wie erhöhte thermische Verluste und somit erhöhte Gasblasenbildung, oder um anordnungscharakteristische elektrische Festigkeitswerte handelt.

Dazu müssen Untersuchungen in einem LN_2 -Badkryostaten (Abschn. 5.2) mit einem LN_2 -Füllvolumen von 1.000 Litern und einem Überdruck von bis zu 4 bar durchgeführt werden. Dabei ist das Ziel, dass nicht nur gezeigt wird, dass ein dreiphasiger Stützisulator in Flüssigstickstoff einer gewissen elektrischen Spannungsbeanspruchung standhält, sondern auch ab wann es zu einem elektrischen Durch- bzw. Überschlag kommt. Zudem folgt aus der Variation des Überdruckes bis 4 bar noch die Erkenntnis, ob eine Überlagerung von Flächen- und Volumeneffekt existiert. Die Experimente im LN_2 -Badkryostaten führen jedoch zu elektrischen und geometrischen Begrenzungen einer Gesamtversuchs-anordnung, welche schon in der Auslegung des zugrunde-

liegenden Simulationsmodell berücksichtigt werden müssen, da dieses in Abhängigkeit der Vergrößerungsgesetze dimensioniert wird.

Der LN₂-Badkryostat besitzt eine einphasige kapazitiv-gesteuerte RIP-Durchführung, durch die die Hochspannung ins Innere des metallischen Kryostaten eingeführt wird. Diese Durchführung ist für eine maximale Wechselspannungs- sowie Blitzstoßspannungsbeanspruchung von 276 kV und 605 kV ausgelegt. Gleichzeitig begrenzt der sich im Inneren des LN₂-Badkryostaten befindliche Teil der RIP-Durchführung den effektiv nutzbaren Innenraum. Die reinen Innenabmessungen des LN₂-Badkryostaten betragen etwa 2.100 mm in der Höhe und 840 mm im Durchmesser. Abzüglich der Länge des inneren Teils der Durchführung von 940 mm verbleiben in der Höhe somit noch ca. 1.300 mm für eine Gesamtversuchsanordnung. Die maximale Höhe der Gesamtversuchsanordnung gilt es zu berücksichtigen, da diese entscheidenden Einfluss auf die elektrische Festigkeit nimmt. Mit der Höhe im Kryostaten ist die Länge des grundlegenden Simulationsmodells definiert, mit dem die entscheidende Fläche bzw. das entscheidende Volumen, herrührend aus der elektrisch belasteten parallelen Leiterlänge, berechnet wird. Aufgrund benötigter elektrischer und mechanischer Kontaktierungs-, Fixierungs- und Absteuerkomponenten sowie Isolierabstände in allen drei räumlichen Dimensionen der Versuchsanordnung, wird die Höhe bzw. Länge der Versuchsanordnung bzw. des grundlegenden Simulationsmodells noch um einen Teil reduziert.

Aus den zuvor beschriebenen Voraussetzungen werden für das grundlegende Simulationsmodell folgende allgemeine elektrische und geometrische Randbedingungen definiert:

- Da der Prüfwechselspannungspegel auf 276 kV limitiert ist, es aber während der Experimente in Abhängigkeit des relativen Druckes zu einem sicheren elektrischen Durch- bzw. Überschlag in Flüssigstickstoff kommen soll, wird das grundlegende Simulationsmodell für eine Wechselspannungsfestigkeit von 125 kV, bei einem Überdruck von 0 bar, ausgelegt. Aufgrund der Wahl der effektiven Wechselspannung von 125 kV wird erwartet, dass auch unter steigendem Druck die Durchschlagfestigkeitswerte von Flüssigstickstoff ermittelt werden.

In Anbetracht der Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen, wonach die Blitzstoßspannungsfestigkeit das bis zu Zweifache der Wechselspannungsfestigkeit erreichen kann, ermöglicht die Wahl der Wechselspannung von 125 kV, dass es bei einem Überdruck von 0 bar (und ggfs. höher), ebenfalls zum Durch- bzw. Überschlag in Flüssigstickstoff kommt.

- Da der LN₂-Badkryostat nur über eine kapazitiv-gesteuerte RIP-Durchführung verfügt, kann auch nur eine einphasige elektrische Prüfung der dreiphasigen Versuchsanordnung durchgeführt werden. Allerdings entspricht das den normativen Verfahren zur einphasigen Prüfung von dreiphasigen elektrischen Betriebsmitteln. Dazu werden zwei der drei Leiter der dreiphasigen Leiteranordnung sowie der umgebende Rohrkryostat auf Erdpotential gelegt. Somit gilt im grundlegenden Simulationsmodell, dass die Leiter-Leiter-Spannungsbeanspruchung der Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung entspricht.

- Aufgrund der Annahme, dass bei einer dreiphasigen Leiteranordnung mit umgebenden Rohrkryostaten der Flächeneffekt einen größeren Einfluss als der Volumeneffekt hat, wird das grundlegende Simulationsmodell nach dem Flächeneffekt ausgelegt. Die Annahme begründet sich damit, dass derartige Versuchsanordnungen in Experimenten stets dem Flächeneffekt zugeordnet werden [81] [82]. Gleichzeitig ist es aber auch sekundär, da die erzielten Ergebnisse dies be- oder widerlegen werden und nachträglich nach dem Volumeneffekt ausgewertet werden können.

Weiterhin wird, ungeachtet der im Vergleich um bis zu 30 % reduzierten AC-Durchschlagfestigkeiten von Flüssigstickstoff in parallel- und zentrisch zylindrischen Leiteranordnungen, der analytische Formalismus zum Flächeneffekt nach Gleichung 3-4 zur elektrischen Auslegung angewendet.

- Durch den vorgegebenen Innenraum des LN₂-Badkryostaten, der Komponenten der Gesamtversuchsanordnung zur Untersuchung der dreiphasigen Leiteranordnung, ausreichende Isolierabstände zur Umgebung, Hochspannungskontaktierungen und feldstärkevergleichmäßige Schirmungen, wird die elektrisch belastete parallele Leiterlänge L für das grundlegende Simulationsmodell auf 500 mm ausgelegt.

Aufgrund der vorangegangenen allgemeinen elektrischen und geometrischen Randbedingungen für das grundlegende Simulationsmodell kann nun in Abschnitt 4.2 die geometrische dreiphasige Leiteranordnung, bestehend aus den drei einzelnen Leitern und dem umgebenden Rohrkryostat, auf einer Länge L von 500 mm elektrisch ausgelegt werden.

4.2 Feldstärkeoptimierte Simulation der Leiteranordnung

Um die geometrischen Abmessungen einer elektrisch optimalen dreiphasigen Leiteranordnung, bestehend aus drei Leitern und dem umgebenden Rohrkryostaten über eine elektrisch belastete parallele Leiterlänge von 500 mm herzuleiten, wird die Theorie des Flächeneffekts verwendet. Der Theorie zum Flächeneffekt nach, hängt die elektrische Gesamtfestigkeit, wie in Abschnitt 2.5.2 bereits beschrieben, von der entscheidend belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ ab. Die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA$ ist der Teil der gesamten Leiteroberfläche, an dem die lokale Spitzenfeldstärke $E_{\text{Spitze, Lokal}}$ größer oder gleich dem Produkt aus maximaler Spitzenfeldstärke $E_{\text{max, Spitze}}$ und Feldfaktor α ist. Der entscheidende Feldfaktor α wiederum ist maßgeblich abhängig von der Oberflächenrauheit und liegt für die, aus der Oberflächenkonditionierungsmethodik nach Abschnitt 3.2.4 herrührende, arithmetische Mittenrauheit R_a von kleiner 1 μm bei 0,82. Die Feldstärkebeanspruchungen und -verteilungen auf den Leiteroberflächen hängen wiederum von der Spannungsbeanspruchung, der Leiter- und Kryostatradien sowie -abständen ab.

Damit zeigt sich, dass mittels eines iterativen Analyseverfahrens, bei dem je Iteration die Radien und Abstände einer dreiphasigen Leiteranordnung variiert werden, die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA$ bestimmt und die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 63,2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit nach Gleichung 3-4 ermittelt werden kann. Damit es nun, wie im vorherigen Abschnitt 4.1 bereits definiert, bei einem Überdruck von 0 bar höchstwahrscheinlich zu einem Durchschlag kommt, wird mittels der bereits eingeführten Gleichung 3-1 zur zweiparametrischen Weibullverteilung die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit berechnet. Fällt nun die anordnungsspezifische maximale Spitzenfeldstärke,

in Abhängigkeit der effektiven Leiter-Leiter- oder Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung im Experiment, größer aus als die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit, kommt es durch den Überlastungsfall zum elektrischen Durchschlag innerhalb der dreiphasigen Leiteranordnung. Wird zudem darauf geachtet, dass – wie in Gleichung 4-1 – dargestellt die Feldstärkeverhältnisse von maximaler Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit zu maximaler Spitzenfeldstärke sowohl bei Leiter-Leiter- als auch Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung dieselben sind, ist das elektrische Anordnungsoptimum erzielt, da es theoretisch bei derselben elektrischen Belastung zum elektrischen Durchschlag im Flüssigstickstoff kommt.

$$\left(\frac{E_{\max, \text{Spitze, LE}}}{E_{D \max, \text{Spitze, 99 \% LE}}} \approx 1 \right) \wedge \left(\frac{E_{\max, \text{Spitze, LL}}}{E_{D \max, \text{Spitze, 99 \% LL}}} \approx 1 \right) \quad (4-1)$$

Das iterative Analyseverfahren zur Ermittlung der optimalen geometrischen dreiphasigen Leiteranordnung wird mittels eines selbst entwickelten *Python*-Programms realisiert. Das *Python*-Programm verfügt über das Zusatzpaket *PyFEMM* zur direkten Anbindung an das 2D-FEM-Berechnungsprogramm *FEMM* und führt somit 2D-Finite-Elemente-Berechnungen zur Ermittlung der Feldstärkeverteilung durch.

Sie grundsätzliche Funktionalität des Programms wird in Abbildung 4.1 mittels eines Ablaufdiagramms dargestellt und darauffolgend erörtert. Der *Python*-Programmcode befindet sich in Anhang C.1.

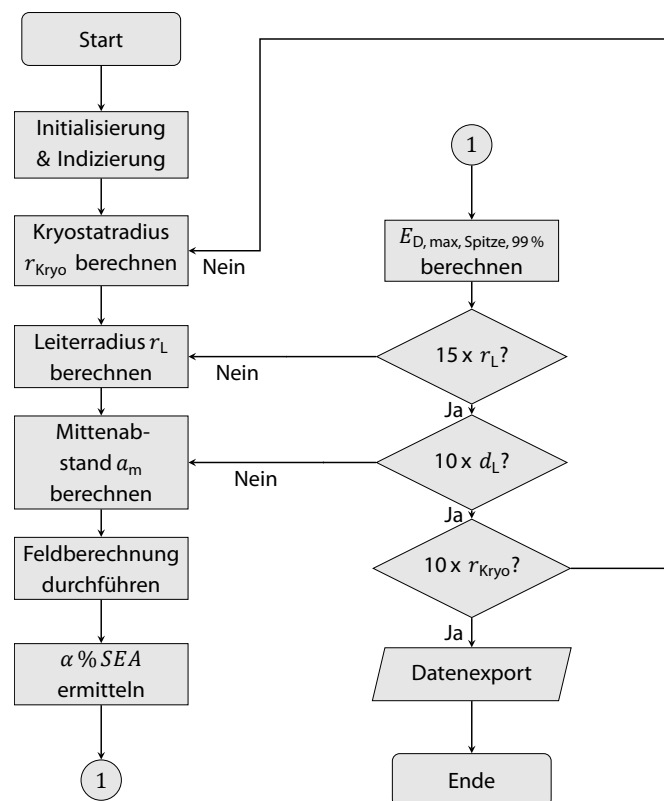


Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm zur grundsätzlichen Darstellung des Python-Programms zur Ermittlung der entscheidend belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ und zugehöriger maximaler Spitzendurchschlagfeldstärke $E_{D, \max, \text{Spitze, 99 \%}}$.

Zu Beginn des Programms erfolgt die Initialisierung und Deklaration aller grundlegend benötigter *FEMM*- und *Python*-Programmvariablen und Speicherorte. Daraufhin wird in der ersten Iterationsschleife der Radius des umgebenden Rohrkryostaten, in einem Bereich von 30 bis 70 mm, für zehn Iterationen berechnet. In der darauffolgenden Iterationsschleife wird die Berechnung des Leiterradius für die dreiphasige Leiteranordnung, innerhalb des umgebenden Rohrkryostaten, durchgeführt. Der Radius für die Leiter wird in einem Bereich von 3,0 bis 23,5 mm definiert. Innerhalb dessen finden fünfzehn iterative Radiusberechnungen statt. In der letzten Iterationsschleife erfolgt die Berechnung des Leiterabstandes vom Mittelpunkt der Anordnung. Dieser berechnet sich in Abhängigkeit vom Leiter- und Rohrkryostatradius, sodass sich die, um 120° versetzten Leiter gegenseitig und mit dem umgebenden Rohrkryostaten nicht überschneiden. Der Leiterabstand wird für zehn Iterationen individuell berechnet. Die angenommenen Wertebereiche für den Leiter- und Rohrkryostatradius liegen in etwa im Abmessungsbereich konventioneller 123 kV Hochspannungskabelsysteme und werden daher als repräsentativ erachtet. Somit ergeben sich für die genannten Radius- und Abstandswertebereiche insgesamt 1.500 individuelle FEM-Berechnungen zur Ermittlung der optimalen geometrischen Anordnung, was zur Erörterung als Beispiel in Abbildung 4.2 dargestellt wird.

Für jede der 1.500 FEM-Berechnungen wird, nach numerischer Berechnung der jeweiligen Feldstärkeverteilung mit einer 2D-Vernetzungsauflösung von 0,01 mm (linke Hälfte Abb. 4.2), nacheinander die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA$ für den Belastungsfall unter Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Spitzenbeanspruchung von 176 kV ($125 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}$) ermittelt. Dabei ergibt sich die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA_{LL}$ unter Leiter-Leiter-Spitzenbeanspruchung aus den drei zueinander zeigenden Leiteroberflächen von L_1 , L_2 und L_3 . Der relevante Betrachtungsbereich der Leiteroberflächen umfasst dabei nur die halbe Leiteroberfläche. Die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA_{LE}$ unter Leiter-Erd-Spitzenbeanspruchung ergibt sich aus der Betrachtung der äußeren halben Leiteroberfläche von L_1 zum umgebenden geerdeten Rohrkryostaten. Zu den Halbierungen der betrachteten Leiteroberflächen muss gesagt werden, dass es sich um eine idealisierte aber notwendige Aufteilung handelt. Alle Leiteroberflächen werden, zur Berechnung der entscheidend belasteten Flächen $\alpha \% SEA$, mit einer Winkelauflösung je Bogenelement von $0,01^\circ$ analysiert und damit das jeweilige Leiterumfangsegment, vor dem das Feldstärkekriterium $E_{\text{Spitze, Lokal}} \geq E_{\text{max, Spitze}} \cdot 0,82$ erfüllt ist, für eine Flächenelementlänge von 1 mm berechnet. Die finale belastete Fläche $\alpha \% SEA$ in mm^2 ergibt sich durch Multiplikation mit der elektrisch belasteten parallelen Leiterlänge von 500 mm. Mittels der finalen entscheidend belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ folgt, mit dem bereits verwiesenen empirischen Formalismus nach Gleichung 3-4, die Berechnung der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke bei 63,2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit. Aus diesem Wert kann mittels der zweiparametrischen Weibullverteilung nach Gleichung 3-1 wiederum die maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit berechnet werden. Hierbei wird für den benötigten Formfaktor k der zweiparametrischen Weibullverteilung ein mittlerer Wert von 12 aus den ausgewerteten Ergebnissen der Voruntersuchungen aus Kapitel 3 verwendet, der sich mit dem Wertebereich von Koxialanordnungen in Flüssigstickstoff aus der Literatur von 11 bis 13 deckt [81].

Die geometrischen und elektrischen Ergebnisse werden für weitere Berechnungen in eine EXCEL-Datei exportiert. Darin werden die Feldstärkeverhältnisse von maximaler Spitzenfeldstärke zur maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit sowohl bei Leiter-Leiter- als auch Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung gebildet. Entsprechen beide Verhältnisse dem gewählten Normierungsfaktor von etwa eins, ist das Anordnungsoptimum, wie in Gleichung 4-1 dargestellt, gefunden. Somit ist die optimale (kleinstmögliche) dreiphasige Leiteranordnung in Abhängigkeit der 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit nach dem Flächeneffekt für Flüssigstickstoff bei einer effektiven Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung von 125 kV ermittelt.

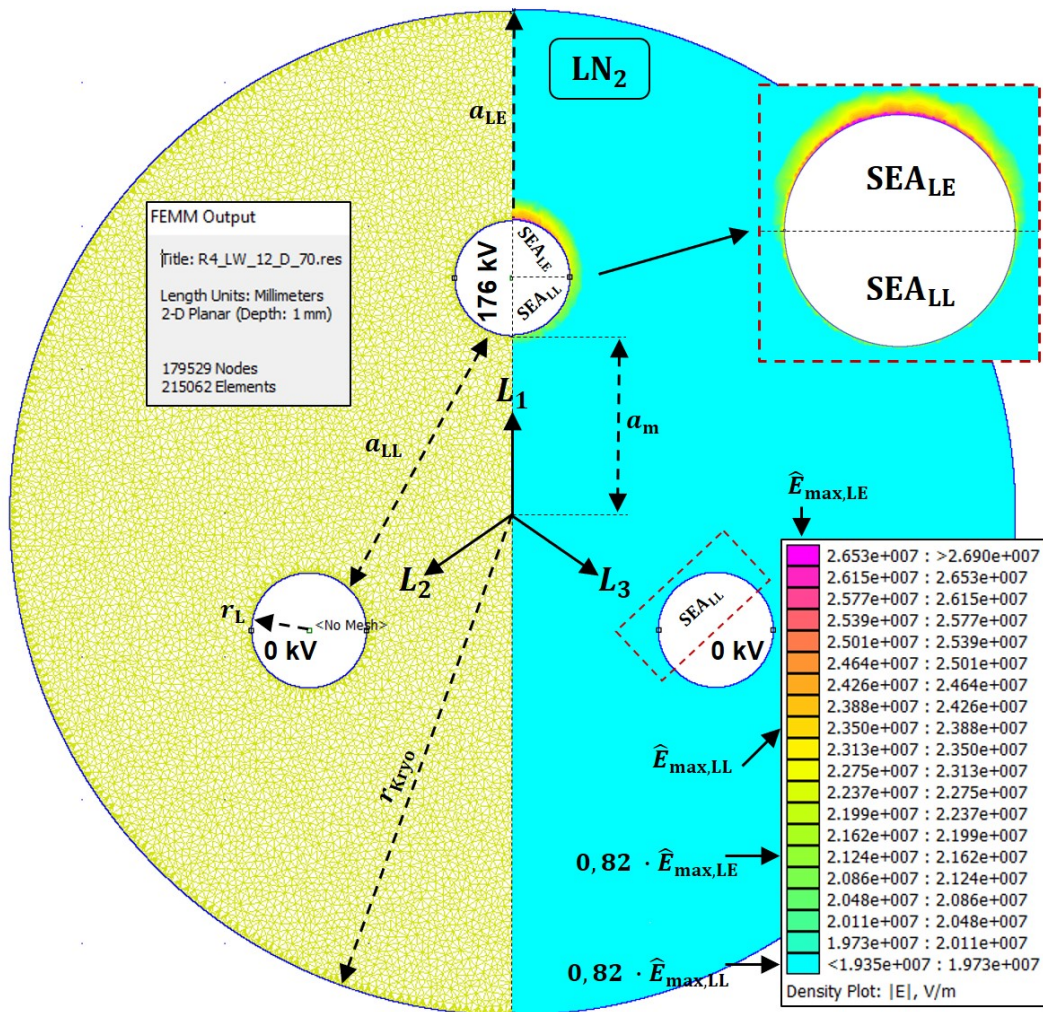


Abbildung 4.2: Exemplarische Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in FEMM zur Ermittlung der optimalen geometrischen dreiphasigen Leiteranordnung in Abhängigkeit des Flächeneffektes.

Abbildung 4.2 stellt den zuvor beschriebenen Ablauf exemplarisch dar. Gleichzeitig handelt es sich hierbei um die final ermittelte optimale geometrische dreiphasige Leiteranordnung aus den insgesamt 1.500 FEM-Berechnungen, deren Eigenschaften in Tabelle 4.1 aufgeführt sind.

Tabelle 4.1: Finale elektrische und geometrische Eigenschaften der optimalen dreiphasigen Leiteranordnung in Abhängigkeit der 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit nach dem Flächeneffekt für Flüssigstickstoff bei einer effektiven Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung von 125 kV.

Elektrische Eigenschaften	
Effektive Spannung U_{eff}	125 kV
Spitzenspannung U_{Spitze}	176 kV
Maximale Spitzenfeldstärke Leiter-Leiter $E_{\text{max, Spitze, LL}}$	23,6 kV/mm
Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke Leiter-Leiter $E_{\text{D, max, Spitze, 63,2 \% LL}}$	23,0 kV/mm
Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke Leiter-Leiter $E_{\text{D, max, Spitze, 99 \% LL}}$	26,1 kV/mm
$\frac{E_{\text{max, Spitze, LL}}}{E_{\text{D, max, Spitze, 99 \% LL}}}$	0,90
Ausnutzungsfaktor η_{LL}	0,36
Entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA_{\text{LL}}$	12.750 mm ²
Maximale Spitzenfeldstärke Leiter-Erde $E_{\text{max, Spitze, LE}}$	26,5 kV/mm
Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke Leiter-Erde $E_{\text{D max Spitze, 63,2 \% LE}}$	23,0 kV/mm
Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke Leiter-Erde $E_{\text{D max Spitze, 99 \% LE}}$	26,1 kV/mm
$\frac{E_{\text{max, Spitze, LE}}}{E_{\text{D, max, Spitze, 99 \% LE}}}$	1,01
Ausnutzungsfaktor η_{LE}	0,45
Entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA_{\text{LE}}$	12.750 mm ²
Geometrische Eigenschaften	
Leiterlänge L	500 mm
Leiterradius r_{L}	4,0 mm
Leitermittenabstand a_{m}	12,4 mm
Nominalabstand Leiter-Leiter a_{LL}	20,3 mm
Nominalabstand Leiter-Erde a_{LE}	14,6 mm
Rohrkryostat-Innenradius r_{Kryo}	35 mm

Den elektrischen und geometrischen Eigenschaften der optimalen dreiphasigen Leiteranordnung können zwei Aspekte entnommen werden. Zum einen ist aus den Werten in Tabelle 4.1 ersichtlich, dass keine dreiphasige Leiteranordnung mit dem Feldstärkeverhältnis von exakt eins in beiden Beanspruchungsfällen ermittelt wird, da es diese in den definierten geometrischen Abmessungsbereichen nicht gibt. Daher wird eine dreiphasige Leiteranordnung gewählt, die am nächsten am Optimum ist. Zum anderen ist den Werten aus Tabelle 4.1 der interessante Aspekt zu entnehmen, dass die beiden entscheidend belasteten Flächen $\alpha \% SEA$ gleich groß sind. Das ist darauf zurückzuführen, dass die dreiphasige Leiteranordnung schlichtweg so inhomogen ist, dass die lokale maximale Spitzenfeldstärke, wie auch in Abbildung 4.2 zu erkennen, im Wesentlichen nur auf der Leiteroberfläche existiert. Gleichzeitig ist maximale Spitzenfeldstärke entlang des Leiterumfangs auf der gesamten Leiteroberfläche größer als der vom entscheidenden

Feldfaktor α definierte Minimalwert von 82 %. Das führt auch zu der abschließenden Erkenntnis, dass jede geometrische Leiteranordnung einen Punkt in Abhängigkeit der Inhomogenität besitzt, an dem die entscheidend belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ nur noch von der Länge L , nicht aber von der Leiteroberfläche A abhängt. Somit ändert sich die elektrische Festigkeit in Flüssigstickstoff zwar immer noch proportional zur Länge L , nicht aber überproportional durch weitere Einflussfaktoren.

4.3 Modellierung des optimierten Stützisolators mittels FEM-Simulationen

Begonnen wird bei der Modellierung des Stützisolators mit der Auslegung der umgebenen Traghülsen der drei Phasenleiter. Die Hülsenwandstärke s_H kann, aufgrund der Querschichtung der Dielektrika Flüssigstickstoff zu PE-HD, Einfluss auf die elektrische Feldverteilung und somit Festigkeit der Gesamtanordnung nehmen, da sich die Feldstärke im Bereich der Grenzfläche um das reziproke Verhältnis der relativen Permittivitäten erhöht (Abschn. 3.4.2). Daher werden numerische 2D-Berechnungen in *FEMM* bei unterschiedlichen Wandstärken s_H durchgeführt und der Einfluss auf die maximale Spitzenfeldstärke $E_{\max, Spitze}$ auf die optimale geometrische dreiphasige Leiteranordnung aus Abschnitt 4.2 untersucht. Die Hülsenwandstärke s_H wird iterativ von 0 bis 8 mm, in 0,5 mm-Schritten, variiert und die elektrische maximale Spitzenfeldstärkeverteilung entlang der Nominalabstände a_{LL} und a_{LE} , unter der Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV betrachtet. Die numerischen Berechnungen werden unter denselben Bedingungen, wie unter Abschnitt 4.2, durchgeführt.

Daraus ergibt sich, wie exemplarisch in Abbildung 4.3 dargestellt, die elektrische Feldverteilung bei einer Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV im PE-HD und Flüssigstickstoff bei einer Hülsenwandstärke s_H von 5 mm.

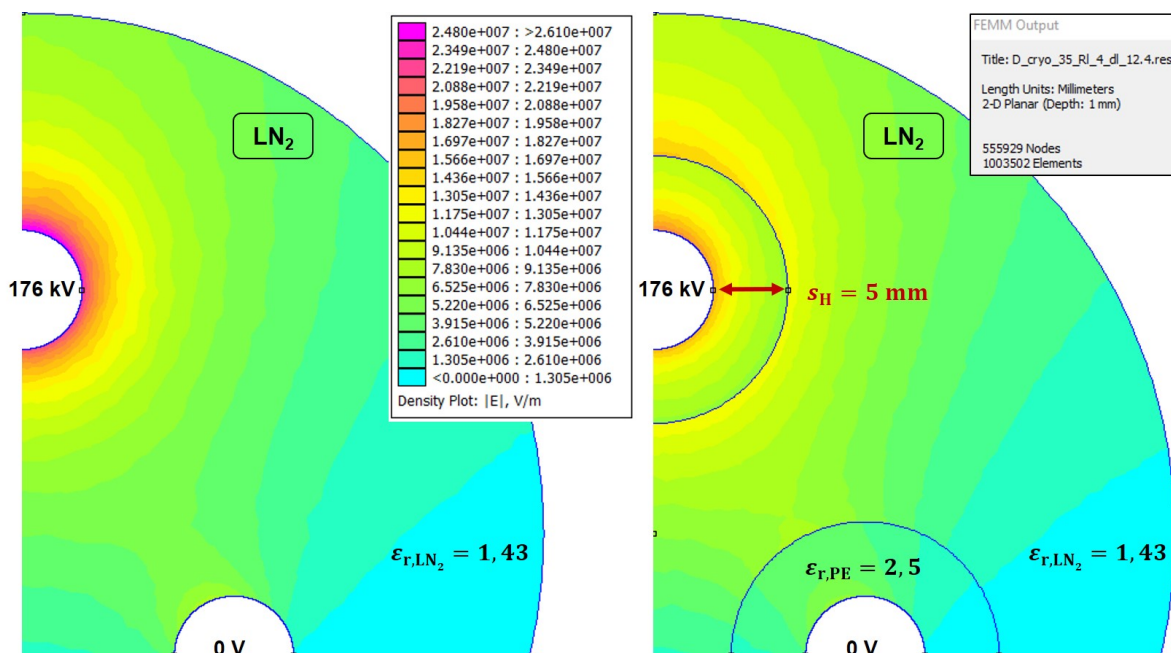


Abbildung 4.3: Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in *FEMM* zur Auslegung der Traghülsen eines Stützisolators mit der Hülsenwandstärke s_H von 5 mm.

Die Feldverläufe in Abbildung 4.4 zeigen die elektrischen maximalen Spitzenfeldstärken bei einer Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV in Abhängigkeit der variierenden Hülsenwandstärke s_H von 0 bis 8 mm, in 0,5 mm-Schritten.

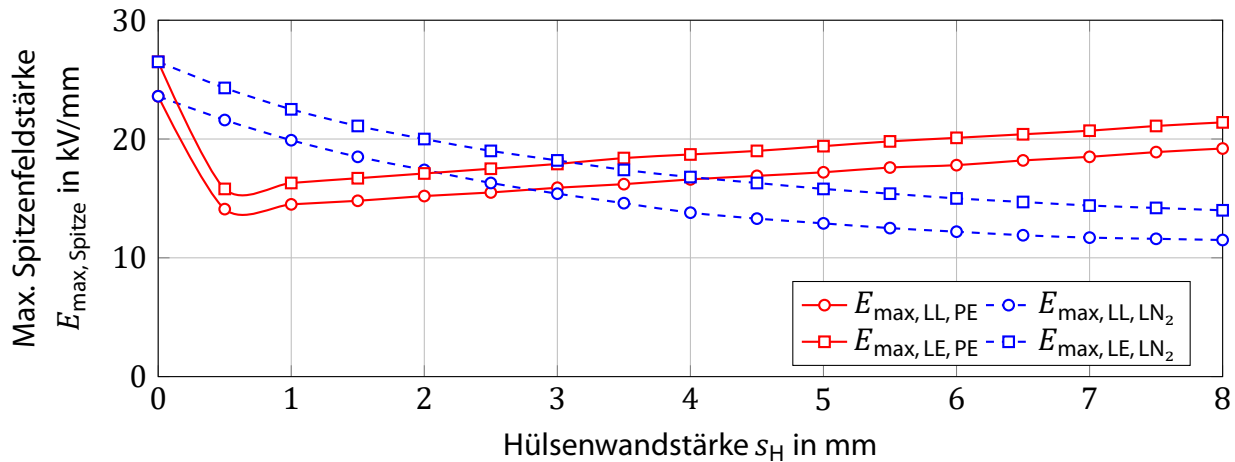


Abbildung 4.4: Maximale Spitzenfeldstärken in Abhängigkeit der variierenden Hülsenwandstärke s_H .

Durch Hinzufügen der Traghülse aus PE-HD, mit einer relativen Permittivität $\epsilon_{r, PE}$ von 2,5, kommt es zu einer Veränderung der elektrischen Feldverteilung entlang des Nominalabstandes. Dadurch wird die maximale Spitzenfeldstärke $\hat{E}_{\max, Spitze}$ auf der Oberfläche des Phasenleiters reduziert. Gleichzeitig wird am Übergang der Traghülse zum Flüssigstickstoff, mit einer relativen Permittivität ϵ_{r, LN_2} von 1,43, zwar die lokale Spitzenfeldstärke (im Vergleich zum Zustand ohne Traghülse-LN₂-Übergang) erhöht, jedoch nicht über die, in der optimalen Leiteranordnung auftretende maximale Spitzenfeldstärke ohne Traghülse ($s_H = 0$ mm). Mit zunehmender Hülsenwandstärke s_H nimmt die maximale Spitzenfeldstärke in der Traghülse zu und zugleich die maximale Spitzenfeldstärke in Flüssigstickstoff ab. Bei einer Hülsenwandstärke s_H von ca. 3 mm sind die maximalen Spitzenfeldstärken sowohl in der Traghülse aus PE-HD als auch im Flüssigstickstoff annähernd gleich. Dieser Punkt entspräche bei gleichen elektrischen Durchschlagfestigkeiten von PE-HD und Flüssigstickstoff der optimalen Hülsenwandstärke s_H . Da jedoch die elektrische Durchschlagfestigkeit von PE-HD größer als die von Flüssigstickstoff ausfällt, kann eine größere Hülsenwandstärke s_H , mit Inkaufnahme einer höheren elektrischen Feldstärkebeanspruchung im PE-HD, dazu verwendet werden, den Flüssigstickstoff weiter zu entlasten. Auf der anderen Seite ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine Vergrößerung der Hülsenwandstärke s_H wiederum zu einer größeren Querschnittsfläche und einem geringeren LN₂-Durchfluss des gesamten Stützisolators führt.

Da der Einfluss der Querschnittsfläche auf den LN₂-Massenstrom nicht explizit untersucht werden kann, aber diese dennoch so gering wie möglich ausfallen muss, wird letztlich, aus Gründen der mechanischen Bearbeitbarkeit und Stabilität, eine minimal nötige Hülsenwandstärke s_H von 5 mm definiert.

Bei der gewählten Hülsenwandstärke s_H von 5 mm ergeben sich, im Vergleich zur optimalen geometrischen dreiphasigen Leiteranordnung ohne Stützisolator, die in Tabelle 4.2 angegebenen maximalen elektrischen Spitzenfeldstärken in Abhängigkeit der Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Spitzenspannungsbeanspruchung. Hier sei nochmal der entlastende Effekt der Traghülse auf die elektrische Feldverteilung um den Stützisolator im Flüssigstickstoff hervorgehoben.

Tabelle 4.2: Resultierende elektrische maximale Spitzenfeldstärken $E_{\max, \text{Spitze}}$ in Abhängigkeit der Hülsenwandstärke s_H von 5 mm.

Beanspruchung	Ohne Traghülse	Mit Traghülse in	
	in LN ₂	PE-HD	LN ₂
Leiter-Leiter	23,6 kV/mm	17,2 kV/mm	12,9 kV/mm
Leiter-Erde	26,1 kV/mm	19,4 kV/mm	15,8 kV/mm

Die Gesamtlänge der Traghülse wird aus rein konstruktiven Gründen auf 50 mm festgelegt. Die Stirnflächen der Traghülsen erhalten am Übergang zur Traghülsenzyylinderfläche einen Verrundungsradius von 3 mm. Am Übergang der Traghülsenstirnfläche auf den Phasenleiter darf, wie aus den Voruntersuchungen zu Spalten aus Abschnitt 3.4.2 zu entnehmen ist, jedoch kein Verrundungsradius existieren.

Hierbei ist hervorzuheben, dass die Erkenntnisse zur Auslegung der Traghülse des Stützisolators für einen idealen Übergang zwischen Traghülse und Phasenleiter gelten. Das bedeutet, dass es zwischen beiden Komponenten zu keiner noch so kleinen Spaltbildung (Abschn. 3.4.2) kommen darf. Dies ist jedoch nicht zu verhindern, wenn beide Komponenten aus separat hergestellten Bauteilen zusammengefügt werden. Das ist in dieser Arbeit trotz mechanischer Passungen der Fall, da die Herstellung einer kombinierten Komponente, wie beispielsweise durch ein Spritzgussverfahren o. ä., nicht realisierbar ist.

Auch darf hier nicht unerwähnt bleiben, dass nicht nur metallische Oberflächenrauheiten einen Einfluss auf die mikroskopische Feldstärkeverteilung nehmen und die elektrische Gesamtfestigkeit vermindern können, sondern auch polymere Oberflächenrauheiten. Jedoch gibt es zu derartiger Beeinflussungen nur sehr wenig bis gar keine wissenschaftlichen Erkenntnisse. Auch konnten im Rahmen dieser Arbeit dazu keine fundierten experimentellen Untersuchungen angestellt werden. Daher werden derartige Effekte in der hier durchgeführten Auslegung von Stützisolatoren auch nicht berücksichtigt, sodass die elektrischen Festigkeitseigenschaften in der Realität dennoch geringer ausfallen können.

Als Nächstes sind die Abstützungen zwischen den Traghülsen und dem umgebenden Rohrkryostat auszulegen. Entsprechend der Erkenntnisse aus den Überschlaguntersuchungen nach Abschnitt 3.4.2 ist ein wesentlicher Anspruch an deren Auslegung, dass es zu keine quergeschichteten Dielektrika in hoch belasteten elektrischen Feldstärkebereichen kommt. Aber auch längsgeschichtete Dielektrika werden möglichst in hoch belasteten elektrischen Feldstärkebereichen vermieden und nur in geringer belasteten elektrischen Feldstärkebereichen vorgesehen, obwohl die Voruntersuchungen keine Erkenntnisse über signifikante Festigkeitsminderungen liefern.

Da die höchsten belasteten elektrischen Feldstärkebereiche zwischen den Phasenleitern sowie den einzelnen Phasenleitern und dem umgebenden geerdeten Rohrkryostat, entlang der Nominalabstände a_{LL} und a_{LE} existieren, dürfen zwischen diesen Bereichen keine direkten Verbindungen durch Abstützungen existieren. Bei der hiesigen 120°-versetzten Dreileiteranordnung handelt es sich aus geometrischer Sicht um eine Anordnung, deren Mittelsenkrechten spiegelsymmetrisch sind. Dadurch ergibt sich der optimale Geradenverlauf der Leiter-Erd-Ab-

stützungen entlang einer gedachten Verbindungsgeraden vom Mittelpunkt zweier Phasenleiter (bspw. L_1 & L_2) zum Schnittpunkt der Mittelsenkrechten des dritten Phasenleiters (bspw. L_3) mit dem umgebenden geerdeten Rohrkryostat. Durch die Verbindung der Leiter-Erd-Abstützungen im Bereich des Rohrkryostates mit einem gemeinsamen Stützfuß ergibt sich eine mechanisch stabile Verbindung, sodass neben den drei Leiter-Erd-Abstützungen keine weiteren Abstützungen mehr zwischen den Leitern benötigt werden. Für die Stegbreite b_S wird aus mechanischen Stabilitätsgründen wieder 5 mm gewählt. Aufgrund einer vergrößerten Stützfußbreite vom Stützisolator von ca. 10 mm am Übergang zum Rohrkryostaten wird eine leichte Abweichung von der gedachten Verbindungsgeraden akzeptiert. Die Länge der Abstützungen wird, wiederholt aus rein mechanischen Stabilitätsgründen, mit 20 mm angenommen.

In Abbildung 4.5 wird die konstruktive Ausführung der Abstützungen sowie der Einfluss der Abstützungen auf die elektrische Feldverteilung bei einer Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV mittels einer 2D-FEM-Berechnung in *FEMM* dargestellt. Zudem wird gezeigt das ein zusätzlicher Übergangsradius r_{H-A} von 6 mm zwischen Traghülse und Abstützung keinen signifikanten Einfluss auf die maximal auftretende Feldstärke nimmt.

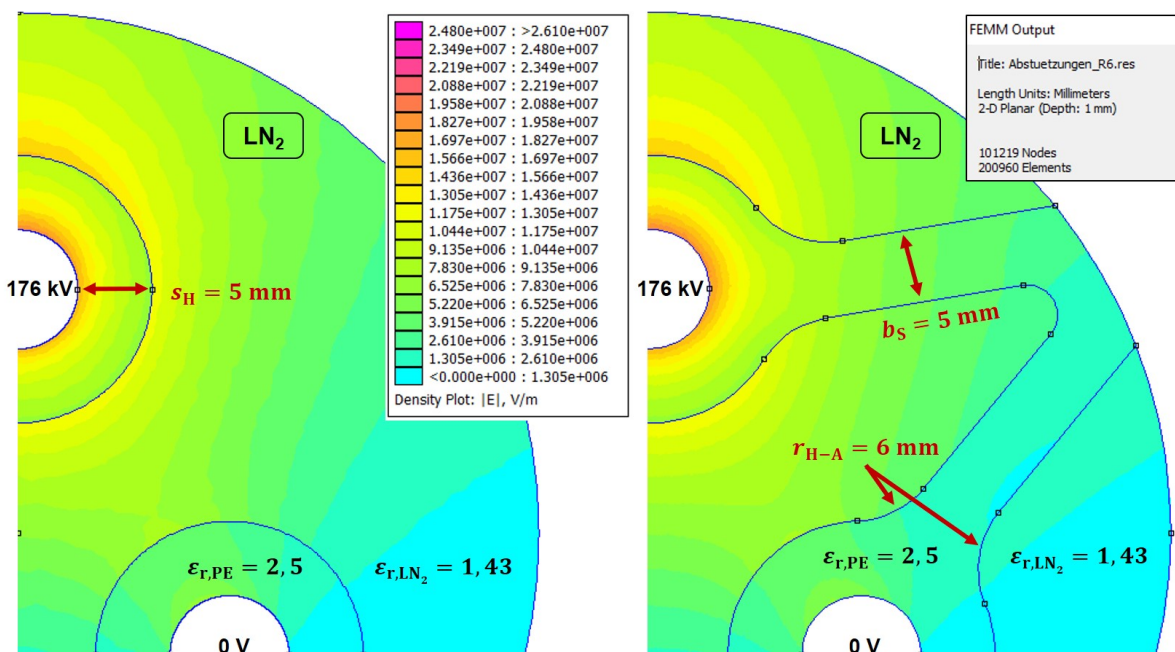


Abbildung 4.5: Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in *FEMM* zur Auslegung der Abstützung eines Stützisolators mit Stegbreite b_S von 5 mm sowie Übergangsradius r_{H-A} von 6 mm.

Abbildung 4.5 ist zu entnehmen, dass die Abstützungen und zusätzlichen Übergangsradien die elektrische Feldstärkeverteilung in den kritischen Bereichen nicht oder nur geringfügig beeinflussen, teilweise aber auch zu einer Entlastung führen.

Somit ist für die geometrisch optimale dreiphasige Leiteranordnung aus Abschnitt 4.2 ein zweidimensionaler Stützisolator hinsichtlich eines möglichst geringen Einflusses auf die elektrische Feldstärkeverteilung simuliert und modelliert. Dessen Querschnittsfläche bemisst sich inklusive der Phasenleiterquerschnittsfläche auf ca. 1.225 mm^2 woraus sich, bei einer Querschnittsfläche des umgebenden geerdeten Rohrkryostates von ca. 3.850 mm^2 , eine Bedeckung von ca. 33 % ergibt.

Abschließend werden noch, zur finalen Evaluierung des dreidimensional konstruierten Stützisolators, Untersuchungen hinsichtlich der Beeinflussung der elektrischen Feldverteilung bei einer Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV mittels 3D-FEM-Berechnungen in *Ansys Maxwell* durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

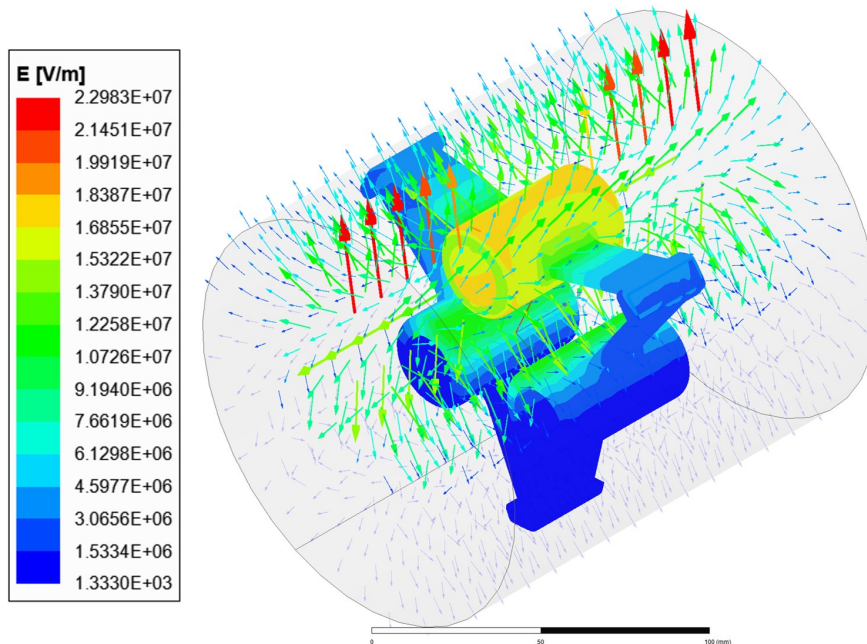


Abbildung 4.6: Darstellung der vektoriellen und oberflächlichen elektrischen 3D-Feldverteilung in LN_2 im Bereich des Stützisolators in *Ansys Maxwell*.

Die vektorielle Darstellung des elektrischen Feldverlaufs veranschaulicht den feldstärkereduzierenden Einfluss des Stützisolators auf die elektrische Feldstärkebeanspruchung in Flüssigstickstoff. Dabei stellt der Farbverlauf von blau nach rot die Feldstärkeintensität dar. Im Bereich des Stützisolators, in Richtung der umgebenden geerdeten Rohrelektrode, nimmt der Farbverlauf im qualitativen Vergleich von Rot nach Orange ab, was einer Verringerung der elektrischen Feldstärke entspricht. Abbildung 4.7 zeigt die Feldstärkebeanspruchung im Stützisolator sowie in Flüssigstickstoff unmittelbar vor der Oberfläche des Stützisolators.

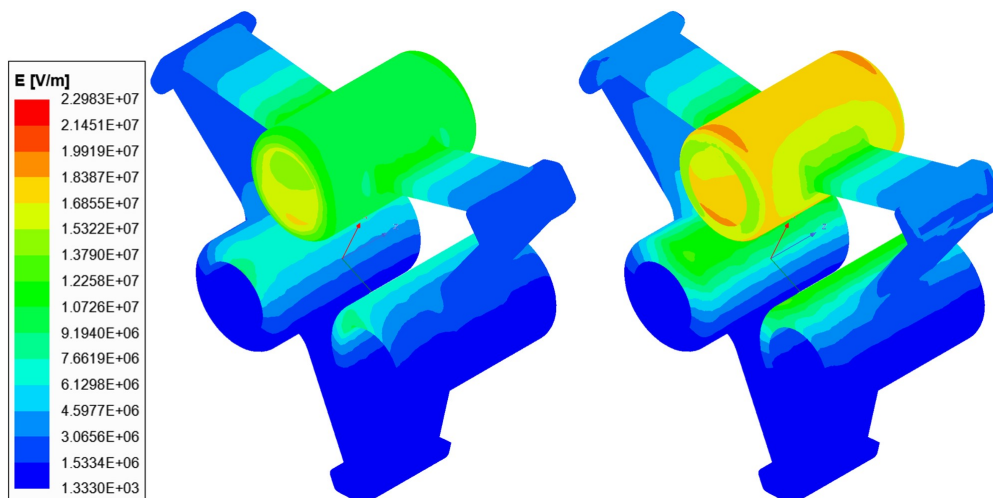


Abbildung 4.7: Darstellung der elektrischen 3D-Feldverteilung im Stützisolator (links) sowie in LN_2 unmittelbar vor der Oberfläche des Stützisolators (rechts) simuliert mit *Ansys Maxwell*.

Die 3D-FEM-Feldverlaufsbilder aus Abbildung 4.7 bestätigten ebenfalls den bereits erwähnten feldstärkereduzierenden Effekt in Flüssigstickstoff durch Einbringung des Stützisolators aus PE-HD. Aufgrund seiner relativen Permittivität und der daraus resultierenden Feldverdrängung kommt es zu einer Reduzierung der maximalen Feldstärke in Flüssigstickstoff innerhalb seines Einsatzbereiches.

Weitere 3D-FEM-Feldverläufe, CAD-Modelle und Modellbemaßungen sowie fotografische Aufnahmen finden sich in Anhang C.2 bis C.4.

4.4 Designkriterien des optimierten Stützisolators

Folgend werden die wesentlichen Designkriterien, die in dieser Arbeit zur Auslegung von Stützisolatoren für dreiphasige LN₂-isolierte supraleitende Hochspannungskabelsysteme untersucht, ermittelt und angewendet wurden, zusammengefasst:

- ① Bei der Auswahl des Stützisolatormaterials ist ein homogenes Polymer auszuwählen. Ein Kompositmaterial ist zu vermeiden.
- ② Die Traghülsenwandstärke muss so gewählt werden, dass die resultierende maximale Spitzenfeldstärke auf der Traghülsenoberfläche im Flüssigstickstoff geringer als ohne Traghülse auf der Leiteroberfläche ausfällt.
- ③ Spalte zwischen dem Phasenleiter und der Traghülse müssen vermieden werden, da ansonsten Vorentladungen am Tripel-Punkt entstehen.
- ④ Die Stirnflächen der Traghülse müssen senkrecht auf den Leiter auftreffen. Das verhindert erhöhte Feldstärken am Tripel-Punkt zwischen den Stirnflächen und der Leiteroberflächen im Flüssigstickstoff. Sie dürfen nach außen auf die Mantelfläche der Traghülse aber mit einem Verrundungsradius auslaufen.
- ⑤ Es dürfen keine Abstützungen direkt zwischen den Traghülsen der Phasenleiter vorhanden sein.
- ⑥ Die Abstützungen zwischen den Traghülsen und dem umgebenden geerdeten Rohrkryostaten sind außerhalb der Bereiche maximaler Feldstärken vorzusehen.
- ⑦ Die Abstützungen zwischen den Traghülsen und dem umgebenden geerdeten Rohrkryostaten dürfen nur senkrecht auf der Traghülse stehen. Neigungen sind grundsätzlich zu vermeiden.

In Abbildung 4.8 sind zur besseren Vorstellung die einzelnen Kriterien graphisch am Modell des Stützisolators veranschaulicht.

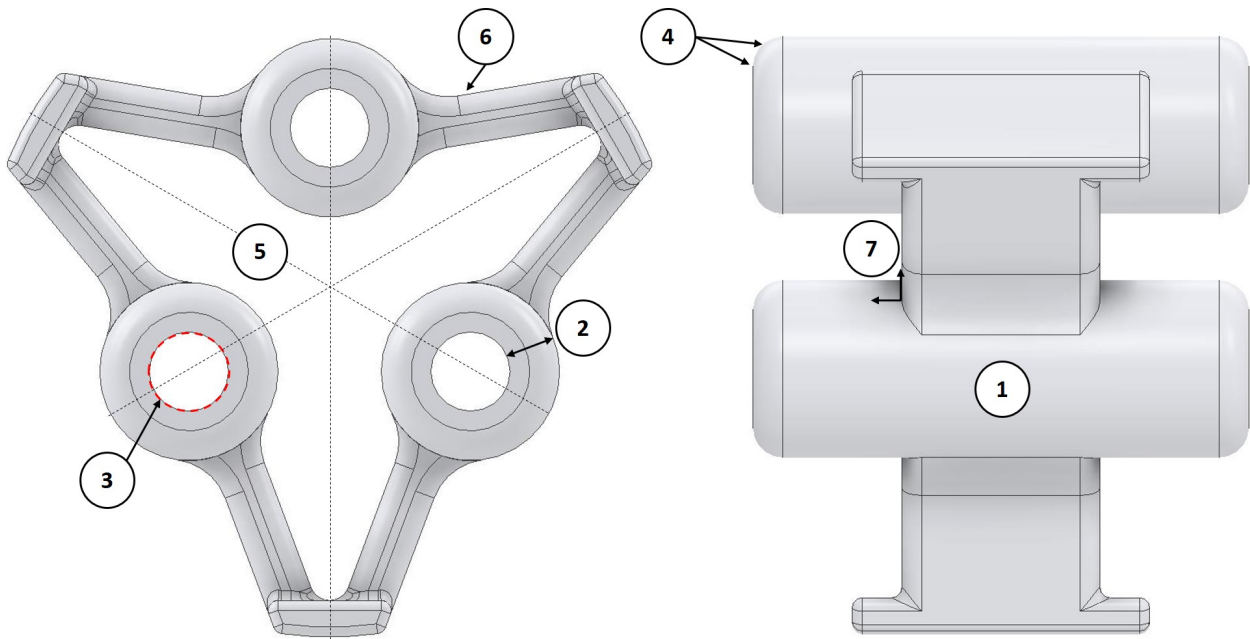


Abbildung 4.8: Graphische Darstellung der Designkriterien am Modell des Stützisolators.

5 Elektrische Festigkeit dreiphasiger Leiteranordnungen

In diesem Kapitel werden zwei Untersuchungen durchgeführt. Es wird ermittelt, ob die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen auch unter erhöhtem Druck gleichbleibende Abweichungen zu den Vergrößerungsgesetzen von Volumen- und Flächeneffekt, wie in den Untersuchungen in Kapitel 3, zeigen. Das führt zu der Erkenntnis, dass die Abweichungen anordnungsspezifisch sind oder von den individuellen Untersuchungen in offenen Behältnissen herrühren. Zudem wird deutlich, welches das Vergrößerungsgesetz zur Auslegung dreiphasiger LN₂-isolierter supraleitender Hochspannungskabelsysteme ist.

Des Weiteren wird der modellierte und hergestellte dreiphasige Stützisolator aus Kapitel 4 auf seine elektrische Überschlagfestigkeit untersucht. Damit wird experimentell nachgewiesen, dass der Stützisolator die elektrische Festigkeit von Flüssigstickstoff nicht beeinflusst und somit die definierten Designkriterien verifiziert und validiert.

In den folgenden Abschnitten sollen die dreiphasigen Leiteranordnungen zur Untersuchung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff und des Stützisolators für den Einsatz in einem LN₂-Badkryostaten konzipiert und konstruiert werden. Daraufhin folgt eine Erklärung des Gesamtversuchsaufbaus in Kombination mit dem LN₂-Badkryostaten sowie die Versuchsdurchführung. Abschließend werden die experimentell ermittelten Untersuchungsergebnisse dargestellt und ausgewertet.

5.1 Konstruktion des Gesamtversuchsaufbaus

Da der zur Verfügung stehende LN₂-Badkryostat nur für einphasige Spannungsuntersuchungen bestimmt ist und somit nur über eine Hochspannungsdurchführung verfügt, ergeben sich in der Hauptuntersuchung insgesamt drei zu untersuchende dreiphasige Leiteranordnungen (kurz: LA) in einem Gesamtversuchsaufbau zusammengefasst, der sich im LN₂-Badkryostaten befindet:

- 1. Leiteranordnung: Untersuchung der Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in einer dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung ohne umgebende geerdete Rohrelektrode in Abhängigkeit des relativen Drucks bis 4 bar.
- 2. Leiteranordnung: Untersuchung der Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in einer dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung mit umgebender geerdeter Rohrelektrode in Abhängigkeit des relativen Drucks bis 4 bar.
- 3. Leiteranordnung: Untersuchung der Überschlagfestigkeit des Stützisolators in Flüssigstickstoff in einer dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung mit umgebender geerdeter Rohrelektrode in Abhängigkeit des relativen Drucks bis 4 bar.

Mit der ersten Leiteranordnung wird die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in einer dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung untersucht, indem sich eine Leiterelektrode mit einem Durchmesser von 8 mm auf Hochspannungspotential und die zwei weiteren Leiterelektroden, ebenfalls mit einem Durchmesser von 8 mm, auf Erdpotential befinden. Um die Elektroden befindet sich keine geerdete Rohrelektrode, sodass in dieser Leiteranordnung

die elektrische Leiter-Leiter-Beanspruchung des dreiphasigen LN₂-isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystems nachgebildet wird.

Bei der zweiten Leiteranordnung wird die Leiter-Erd-Beanspruchung eines dreiphasigen LN₂-isolierten supraleitenden Hochspannungskabelsystems nachgebildet, indem sich erneut eine 8 mm-Leiterelektrode auf Hochspannungspotential befindet, die zwei weiteren 8 mm-Leiterelektroden sowie die umgebende geerdete Rohrelektrode, mit einem Innendurchmesser von 70 mm, auf Erdpotential befinden.

Die dritte Leiteranordnung entspricht der zweiten, wird jedoch um den Stützisolator ergänzt, sodass untersucht wird, ob und wie der Stützisolator die Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff beeinflusst bzw. wie dessen Überschlagfestigkeit in Flüssigstickstoff ausfällt.

Um die drei dreiphasigen Leiteranordnungen elektrisch zu untersuchen, wird ein Gesamtversuchsaufbau – wie in Abbildung 5.1 dargestellt – konstruiert, welcher aus zwei 25 mm dicken PVC-Platten mit einem Durchmesser von je 800 mm besteht. Der Abstand zwischen den Platten beträgt 900 mm und wird durch zehn PVC-Stangen mit einem Durchmesser von 50 mm realisiert.

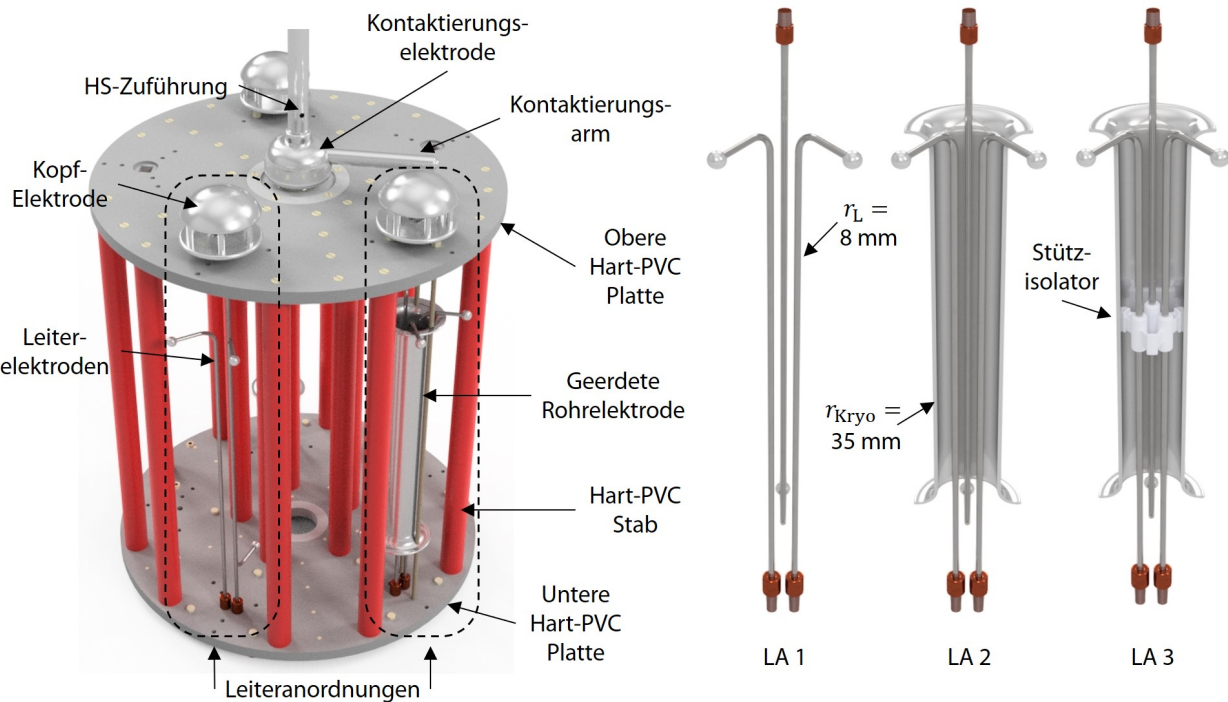


Abbildung 5.1: Darstellung des konstruierten Gesamtversuchsaufbaus der Hauptuntersuchung als CAD-Modell (links) und der drei dreiphasigen Leiteranordnungen (rechts).

In der oberen PVC-Platte befindet sich konzentrisch angeordnet eine bewegliche Kontaktierungselektrode aus Aluminium, die mittels eines, in der PVC-Platte eingelegten Kugellagers um 360° rotieren kann. Durch ein mehrteiliges, ca. 2.300 mm langes Aluminiumrohr, welches koaxial auf die Kontaktierungselektrode trifft, wird einerseits die Hochspannung zur Kontaktierungselektrode zugeführt und andererseits ermöglicht, dass im verschlossenen Zustand des LN₂-Badkryostaten am offenen Kopf der Hochspannungsdurchführung die Kontaktierungselektrode rotiert werden kann.

Von der Kontaktierungselektrode stellt der ca. 300 mm lange Kontaktierungsarm (über Kopfelektroden) Kontakt zu den drei Leiteranordnungen her. Diese sind in der oberen PVC-Platte auf

einem Radius von ca. 320 mm angeordnet. Insgesamt besteht die Möglichkeit fünf Positionen, je um 72° versetzt, in der oberen PVC-Platte zu bestücken, von denen hier nur drei benötigt werden.

An der Unterseite der Kopfelektroden werden die auf Hochspannungspotential befindlichen Leiterelektroden eingeschraubt. Denen gegenüber werden die zwei auf Erdpotential befindlichen Leiterelektroden, durch Verschraubung mittels einer gekonterten Mutter in der unteren PVC-Platte, befestigt. Der definierte Abstand zwischen den Leiterelektroden wird durch exakte Bohrungen in der Unterseite der Kopfelektrode sowie durch Passbohrungen in der unteren PVC-Platte garantiert.

Die umgebenden geerdeten Rohrelektroden wiederum werden über GFK-Gewindestäbe an ihren Positionen fixiert. Deren Führungsbohrungen garantieren ebenfalls die exakte Positionierung der geerdeten Rohrelektroden gegenüber der drei Leiterelektroden.

Zur Ermittlung der Abstandsgenauigkeit der drei dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen werden die Ist-Abstände zwischen den Leiterelektroden und den umgebenden geerdeten Rohrelektroden mit einem digitalen Messschieber mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen. Die Messwerte sind in Anhang D.1 dargestellt. Insgesamt liegt die Fertigungsgenauigkeit zum nominalen Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Abstand a_{LL} und a_{LE} maximal bei $\pm 11\%$.

Fotografische Aufnahmen des Gesamtversuchsaufbaus sind in Anhang D.2 dargestellt.

5.2 Versuchsdurchführung im Badkryostaten

Die Untersuchung der Durch- und Überschlagfestigkeit unter 50 Hz Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung der dreiphasigen Versuchsanordnungen im LN_2 -Badkryostat wird, wie in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben, ebenfalls im 300 kV- und 1 MV-Prüffeld durchgeführt. Anstelle der parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen (Pos. (A) und (B)) in Abbildung 3.3 und 3.4 wird stattdessen der LN_2 -Badkryostat angeschlossen, in dem sich der Gesamtversuchsaufbau, bestehend aus den Leiteranordnungen 1 bis 3, befindet.

Beim LN_2 -Badkryostaten der Fa. CryoVAC handelt es sich um zwei ineinander befindliche Edelstahlbehälter. Der äußere Edelstahlbehälter misst eine Höhe von 2.096 mm und einen Außendurchmesser von 1.250 mm. Er dient der thermischen Isolierung, welche mittels eines Isoliervakuum von bis zu 10^{-6} mbar realisiert wird. Der innere Edelstahlbehälter misst eine Höhe etwa 2.200 mm bei einem Innendurchmesser von 902 mm im Deckelbereich und 842 mm im Innenbehälterbereich.

Sein LN_2 -Füllvolumen beträgt ca. 1.000 Liter. Er ist von außen zusätzlich mit metallbedampften Folien umwickelt, um die thermische Isolierung zu verbessern. Der Deckel des Innenbehälters verfügt über eine Vielzahl an Flanschanschlüssen in verschiedenen Größen sowie der zentrischen Öffnung für die Hochspannungsdurchführung. Auf der Innenseite des Innenbehälterdeckels befinden sich noch dünne hochglanzpolierte Aluminiumscheiben, die als Strahlungsschilde fungieren und ebenfalls die thermischen Verluste des Deckels mindern. Der Innenbehälter ist für einen absoluten Druck von 5 bar konzipiert. Der Druckaufbau erfolgt durch Heliumgas, welches sich in einer externen Gasflasche befindet und über einen Metallschlauch mit dem Deckel des LN_2 -Badkryostaten verbunden wird. Es wird Heliumgas verwendet, da es sich beim Kontakt mit Flüssigstickstoff nicht verflüssigt.

Eine Besonderheit des LN₂-Badkryostaten stellen die insgesamt sechs Doppelfenster dar, die es ermöglichen das Experiment im Inneren des Innenbehälters zu beobachten.

Bei der Hochspannungsdurchführung der Fa. HSP handelt es sich um eine kapazitiv-gesteuerte RIP-Prüfdurchführung für eine Wechselspannungsbeanspruchung von 230 kV und eine Blitzstoßspannungsbeanspruchung 605 kV. Sie ist insgesamt 2.355 mm lang, wovon 1.415 mm dem äußeren Teil in Luft und 940 mm dem inneren Teil in Flüssigstickstoff entsprechen. Sie besitzt keinen Innenleiter sondern einen ersten kapazitiven Steuerbelag auf Hochspannungspotential durch direkte Kontaktierung an der Kopfelektrode. Dadurch können beliebige Innenleiter bis zu einem Durchmesser von 72 mm eingesetzt werden, da sich diese im elektrisch feldfreien Raum befinden. Die Kopfelektrode ist mit einem abnehmbaren Edelstahldeckel verschraubt, wodurch zwischen den Experimenten das Innere der Hochspannungsdurchführung zugänglich ist. Die Hochspannungsdurchführung ist für einen relativen Druck von 4 bar konzipiert.

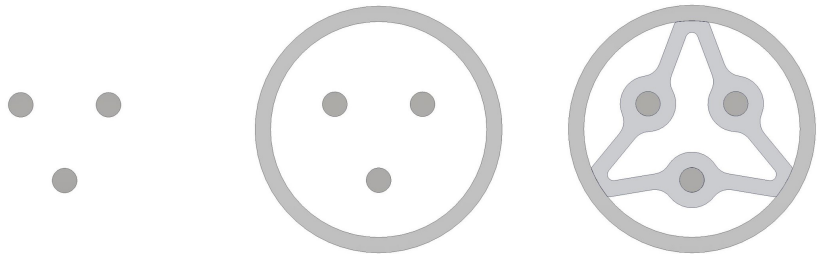
Die Durchführung der Untersuchung der drei zylindrischen Leiteranordnungen erfolgt vom Grundsatz her wie in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 bereits beschrieben, jedoch in kombinierter Durchführung. Den kombinierten Messabläufen wird in den Hauptuntersuchungen eine iterative Druckerhöhung von 0 bar bis 4 bar in 1 bar-Schritten nach jeder Durch- bzw. Überschlagfestigkeitsuntersuchung ergänzt. Während der Messungen wird der relative Druck über Anzeigeelemente manuell erfasst, um eine Aussage über die Genauigkeit des Überdrucks machen zu können.

Die Kombination der Messabläufe erfolgt dadurch, dass nach der Untersuchung der elektrischen Wechselspannungsfestigkeit und Erreichen des relativen Drucks von 4 bar der LN₂-Badkryostat an den Blitzstoßspannungsgenerator angeschlossen und im Wechsel der Stoßpolaritäten vom höchsten relativen Druck bis zum Umgebungsdruck die Blitzstoßspannungsfestigkeit ermittelt wird. Zwischen dem Umbau der Leiteranordnungen muss der LN₂-Badkryostat mit flüssigem Stickstoff nachgefüllt werden.



Abbildung 5.2: LN₂-Badkryostat und Hochspannungsdurchführung.

Tabelle 5.1: Versuchsplanung zur Darstellung der durchzuführenden Durch- und Überschlagexperimente, im Rahmen der Untersuchungen der drei dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen und des Stützisolators bis 4 bar_{rel} in LN₂.



Untersuchung	LA 1	LA 2	LA 3
AC-Durchschlagfestigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
LI-Durchschlagfestigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AC-Überschlagfestigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
LI-Überschlagfestigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Der reine Durchführungszeitraum der Untersuchungen belief sich auf zwei Arbeitswochen und umfasste insgesamt über 1.050 ermittelte Messpunkte. Eine Auswahl an fotografischen Aufnahmen vom Zusammenbau des Gesamtversuchsaufbaus mit dem LN₂-Badkryostaten finden sich in Anhang D.3.

5.3 Ergebnisse und Auswertung der Festigkeitsuntersuchung

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des Hauptexperimentes zur Durch- und Überschlagfestigkeit dreiphasiger zylindrischer Leiteranordnungen mit und ohne Stützisolator in Flüssigstickstoff unter Wechselspannungs- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung dargestellt und ausgewertet.

5.3.1 Wechselspannungsfestigkeit der dreiphasigen Leiteranordnungen

Aus zehn einzelnen effektiven Durch- und Überschlagspannungswerten $U_{\text{Eff}} = \hat{U}/\sqrt{2}$ werden die arithmetischen Mittelwerte $\bar{U}_{D,\text{Eff}}$ und $\bar{U}_{Ü,\text{Eff}}$ sowie die absoluten Standardabweichungen σ der Stichprobe, dargestellt als Antennen, ermittelt. In Abbildung 5.3 sind diese Werte über den relativen Druck p_{rel} , mit einer Abweichung von bis zu $\pm 0,1$ bar, ebenfalls als Antennen dargestellt, aufgetragen.

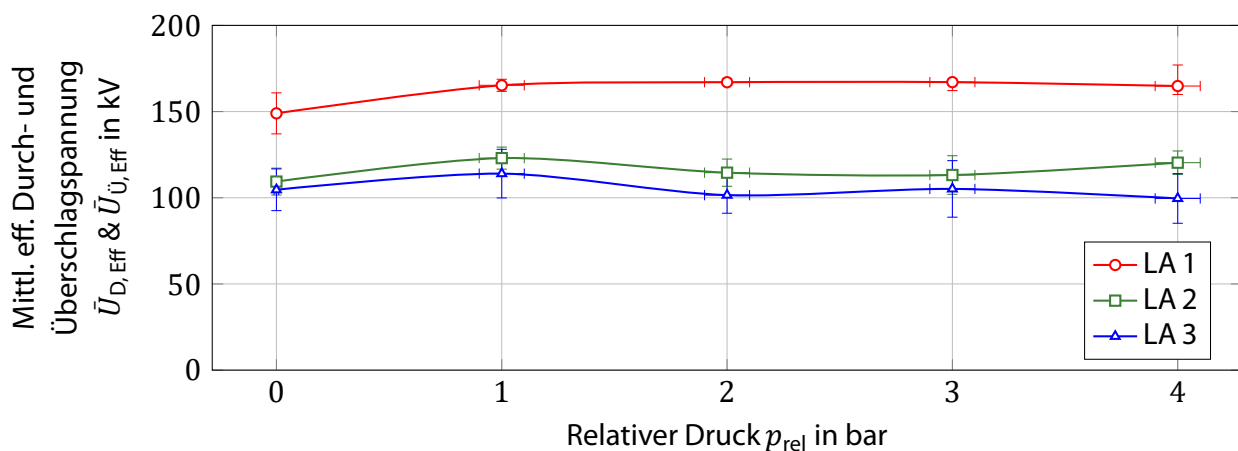


Abbildung 5.3: Verläufe der mittleren effektiven Durchschlagsspannungen $\bar{U}_{D,\text{Eff}}$ von LN_2 (rot & grün) und Überschlagsspannung $\bar{U}_{Ü,\text{Eff}}$ vom Stützisolator in LN_2 (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel} .

Im Vergleich der mittleren effektiven Durch- und Überschlagsspannungen $\bar{U}_{D,\text{Eff}}$ und $\bar{U}_{Ü,\text{Eff}}$ in Abbildung 5.3 bei einem relativen Druck p_{rel} von 0 bar zeigt sich bereits der erwartete Unterschied der Durchschlagspannungswerte von Leiteranordnung 1 zu den beiden anderen Leiteranordnungen. Wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben, handelt es sich nicht um die ideale optimale dreiphasige Leiteranordnung, sondern um eine Anordnung mit einer um 10 % höheren Durchschlagwahrscheinlichkeit unter Leiter-Erd- als Leiter-Leiter-Beanspruchung. Deshalb muss sich unter Leiter-Leiter-Beanspruchung eine höhere Durchschlagspannung ergeben. Diese liegt mit ca. 148 kV bei 0 bar rund 18 % über der erwarteten Durchschlagspannung von 125 kV.

Die gemessenen Durchschlagspannungswerte für LA 2 und LA 3, bei einem relativen Druck p_{rel} von 0 bar, stimmen sehr gut mit der Soll-Durchschlagspannung von 125 kV überein. Die Werte liegen bei 109 kV (LA 2) und 105 kV (LA 3), was in Anbetracht der Abstundungenauigkeiten von ± 11 % vertretbaren Abweichungen von 13 % und 16 % entspricht.

Werden die theoretischen Durchschlagspannungswerte nach der empirischen Gleichung 2-9 aus Abschnitt 2.4 zur Abschätzung einer effektiven Kurzzeit-Durchschlagspannung von Flüssigstickstoff berechnet, ergeben sich in Abhängigkeit der Abstände (LA 1: $a_{\text{LL}} = 20,3$ mm; LA 2: $a_{\text{LE}} = 14,6$ mm) effektive Durchschlagspannungen von 228 kV und 175 kV. Im Vergleich zu den

gemessenen ermittelten effektiven Durchschlagspannungswerte von LA 1 und LA 2 bei einem relativen Druck von 0 bar fallen diese aber um 34 % und 37 % geringer aus. Dieser Unterschied unterstreicht noch einmal, dass eine räumliche Ausdehnung eines elektrischen Isoliersystems zusätzlichen festigkeitsmindernden Einflüssen unterliegt.

Weiterhin liefern die Ergebnisse die Erkenntnis darüber, welches Vergrößerungsgesetz dreiphasige zylindrische Leiteranordnungen dominiert. Bei einer Druckerhöhung von 0 auf 1 bar zeigt sich bei allen Leiteranordnungen eine leichte Festigkeitssteigerung um ca. 10 %, die allerdings ab 1 bar bis 4 bar nicht mehr stattfindet. Die anfängliche Festigkeitssteigerung wird vom Volumeneffekt herrühren, der ab einem Druck von 1 bar keinen Einfluss mehr auf die elektrische Festigkeit hat. Ab einem relativen Druck von 1 bar hängt die elektrische Festigkeit der dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen im Wesentlichen nur noch vom Flächeneffekt ab, wonach die Leiteranordnungen ausgelegt wurden. Dadurch wird auch ein noch höherer Systemdruck von bis zu 16 bar, wie er in supraleitenden Betriebsmitteln durchaus vorkommt (Abschn. 2.5.1), keinen weiteren festigkeitssteigernden Effekt mit sich bringen.

Mit dem Vergleich der Spannungswerte von LA 2 und LA 3 wird der Einfluss des Stützisolators untersucht. Die Überschlagspannung $\bar{U}_{\text{Ü, Eff}}$ von LA 3 liegt immer leicht unterhalb der Durchschlagspannung $\bar{U}_{\text{D, Eff}}$ von LA 2. Bei einem relativen Druck von 0 bar und den Spannungswerten von 109 kV (LA 2) zu 105 kV (LA 3) liegt die Abweichung bei ca. 4 %. Dieser geringe Unterschied muss nicht vom Stützisolator herrühren, da auch Abstausungenauigkeiten eine Abweichung in dieser Größenordnung hervorrufen.

Mit zunehmendem relativen Druck bis 4 bar nimmt die Differenz zwischen den Spannungswerten jedoch zu und erreicht, mit 120 kV (LA 2) zu 100 kV (LA 3), eine relative Abweichung von rund 17 %. Die stetige Zunahme der relativen Abweichung wird wahrscheinlich damit zusammenhängen, dass die Vielzahl an Überschlägen nahe des Stützisolators diesen beschädigen, wodurch eine Herabsetzung der elektrischen Überschlagfestigkeit durch irreversible materielle Degradation erfolgt. Dass Durchschläge nahe des Stützisolators aus PE-HD auftreten können, wurde bereits bei den Untersuchungen von geraden Überschlagproben in Abschnitt 3.4.2 nachgewiesen. Als Grund für die Entladungen nahe des Stützisolators wird angenommen, dass die endlich gute Fertigungsgenauigkeit sowie die prozessbedingten Oberflächenrauheiten des Stützisolators auf der Oberfläche entlang der Grenzfläche elektrische Feldverzerrungen erzeugen, die das Versagen der Isolierfähigkeit des Isoliersystems initiieren.

Die gemessenen mittleren effektiven Durch- und Überschlagspannungen sind in Anhang D.4 dargestellt. Zudem werden mittels numerischer 2D-FEM-Berechnungen die maximalen Spitzendurch- und -überschlagfeldstärken $\bar{E}_{\text{D, max, Spitze}}$ und $\bar{E}_{\text{Ü, max, Spitze}}$ der dreiphasigen Leiteranordnungen 1 bis 3 unter Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Beanspruchung ermittelt. Ergänzend erfolgt noch die Auswertung der Ergebnisse nach der zweiparametrischen Weibullverteilung aus Kapitel 3.3.1 zur Bestimmung der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{\text{D, max, Spitze, 63,2 \%}}$ und $E_{\text{D, max, Spitze, 99 \%}}$ bei 63,2 % und 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit je Beanspruchungsfall.

5.3.2 Blitzstoßspannungsfestigkeit der dreiphasigen Leiteranordnungen

In den Abbildungen 5.4 und 5.5 wird die positive und negative Blitzstoßdurch- sowie -überschlagspannung $\hat{U}_{D, \text{pos}}$ und $\hat{U}_{\ddot{U}, \text{pos}}$ sowie $\hat{U}_{D, \text{neg}}$ und $\hat{U}_{\ddot{U}, \text{neg}}$ in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel} , dargestellt. Die relative Abweichung von bis zu $\pm 0,1$ bar des relativen Drucks wird als Antennen dargestellt.

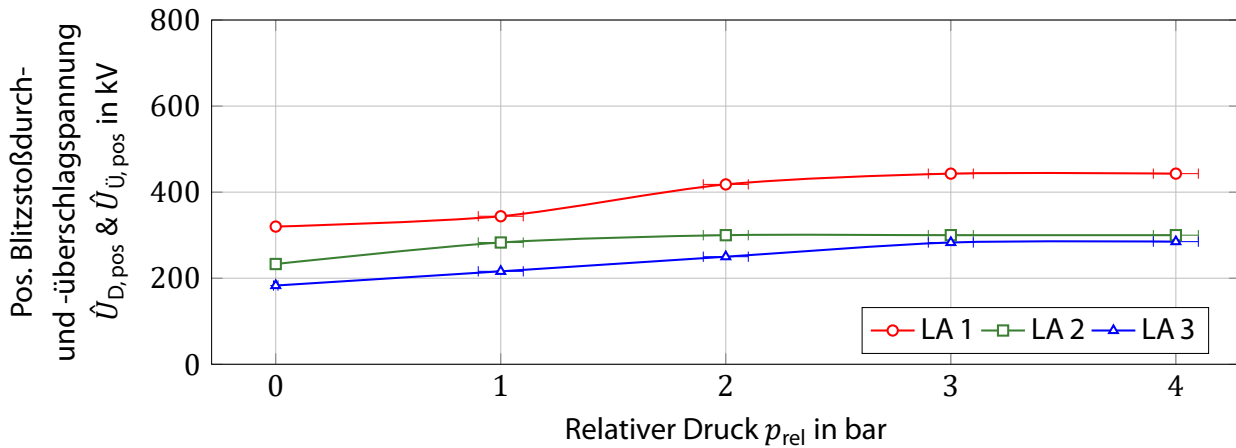


Abbildung 5.4: Verläufe der positiven Blitzstoßdurchschlagspannungen $\hat{U}_{D, \text{pos}}$ in LN₂ (rot & grün) und Blitzstoßüberschlagspannung $\hat{U}_{\ddot{U}, \text{pos}}$ vom Stützisolator in LN₂ (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel} .

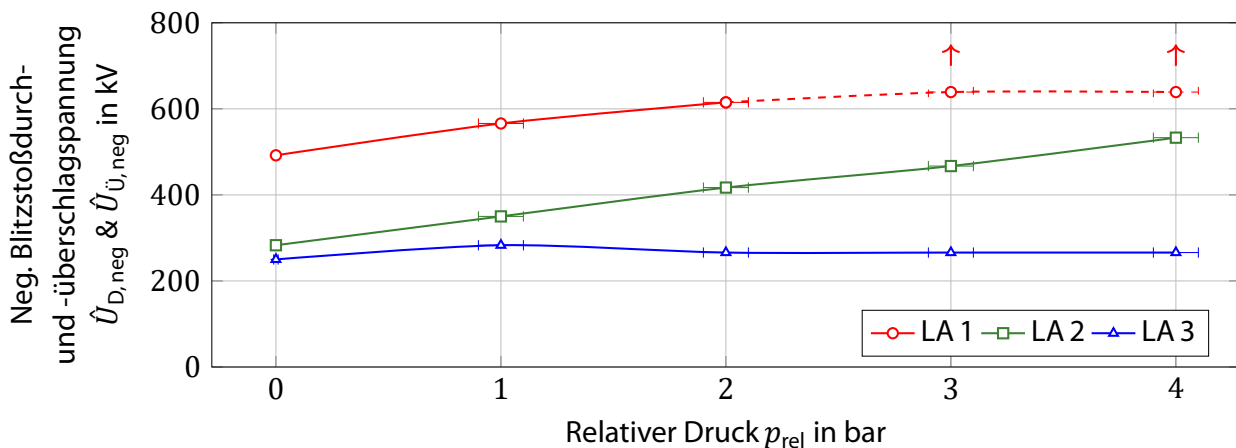


Abbildung 5.5: Verläufe der negativen Blitzstoßdurchschlagspannungen $\hat{U}_{D, \text{neg}}$ in LN₂ (rot & grün) und Blitzstoßüberschlagspannung $\hat{U}_{\ddot{U}, \text{neg}}$ vom Stützisolator in LN₂ (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel} .

Beim Vergleich der positiven und negativen Blitzstoßdurchschlagspannungen zeigt sich, wie zuvor in Abschnitt 5.3.1, eine höhere Durchschlagspannung von LA 1 gegenüber LA 2, was wieder von der statistisch höheren elektrischen Festigkeit von LA 1 abhängt. Weiterhin fällt im Vergleich der Ergebnisse von LA 1 und LA 2 auf, dass die positiven Blitzstoßdurchschlagspannungen über den gesamten relativen Druckbereich p_{rel} deutlich geringer als die negativen Blitzstoßdurchschlagspannungen ausfallen.

Die Ursache für den polaritätsabhängigen Unterschied der Blitzstoßdurchschlagspannungen von LA 1 und LA 2 in Flüssigstickstoff ist auf den Polaritätseffekt zurückzuführen, der hier wesentlich deutlicher als in den Untersuchungen in Abschnitt 3.3.1 ausfällt. Der Unterschied zwischen den Experimenten liegt im Wesentlichen darin, dass diese in einem größeren LN₂-Volumen unter kontrollierteren Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden.

Unter positiver Polarität baut sich vor der Hochspannungselektrode eine positive Raumladungs-

zone auf und die negativen Elektronen werden über die Elektrode abgeleitet. Aufgrund der positiven Raumladungszone folgt eine Verlagerung der Ionisationsgrenze in Richtung der Gegenelektrode, was letztlich eine Reduzierung des isolierenden Abstandes zur Folge hat und somit einen früheren elektrischen Durchschlag begünstigt. Bei der negativen Polarität hingegen verursacht die entstehende positive Raumladungszone vor der negativen Elektrode eine Abschirmung dieser, wodurch zwar die elektrische Feldstärke im Bereich vor der negativen Elektrode zunächst stark anwächst aber mit zunehmendem Abstand zur Gegenelektrode überproportional abnimmt. Somit wird eine höhere negative Spannung benötigt, um einen elektrischen Durchschlag zu erzielen [13] [68].

Werden die Verläufe der positiven und negativen Blitzstoßdurchschlagspannungen von LA 1 und LA 2 über den relativen Druck p_{rel} betrachtet, so zeigt sich ein anderes Verhalten wie bei den Ergebnissen in Abschnitt 5.3.1. Bei den positiven Blitzstoßdurchschlagspannungen kommt es bis ca. 2 bar zu einem degressiven Anstieg der elektrischen Durchschlagspannung, die ab dort bis 4 bar nahezu konstant ist. Bei den negativen Blitzstoßdurchschlagspannungen tritt dieser asymptotische Verlauf nicht auf und die Durchschlagspannungen nehmen mit zunehmendem Druckanstieg weiter zu. Bei LA 1 werden ab 3 bar Stehspannungswerte von mehr als 630 kV (rot gestrichelt dargestellt) erreicht, die von den maximalen elektrischen Eigenschaften der Hochspannungsdurchführung limitiert sind, kommt es daher nicht mehr zu einem Durchschlag. Des Weiteren ist das Verhältnis von Blitzstoß- zu AC-Festigkeit auszuwerten. Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 erklärt, hängt der Unterschied mit dem Zündverzug beim Entladungsprozess zusammen, sodass die elektrische Festigkeit bei einer Blitzstoßspannung größer ausfällt. In den Untersuchungen unter Abschnitt 3.3.1 liegt das Verhältnis insgesamt zwischen 1 und 3. In den Untersuchungen der dreiphasigen Leiteranordnungen beträgt dieses Verhältnis (ungeachtet LA 3) zwischen der geringsten AC-Festigkeit (Abb. 5.3) und der geringsten positiven Blitzstoßfestigkeit (Abb. 5.4) von LA 2 ca. 1,5 bis 1,7. Bei Betrachtung der höheren negativen Blitzstoßfestigkeit fällt das Verhältnis größer aus und erreicht einen Wertebereich von ca. 1,8 bis 3,1. Es zeigt sich, dass zwar das maximale Verhältnis nicht größer ausfällt, dafür aber das minimale Verhältnis um mindestens das 1,5-fache steigt.

Werden die positiven und negativen Blitzstoßspannungswerte der Leiteranordnung 1 und 2, gemessen bei 0 bar und in Abhängigkeit der Nominalabstände (LA 1: $a_{LL} = 20,3$ mm; LA 2: $a_{LE} = 14,6$ mm) in den Wertebereich in Abbildung 2.11 (Abschn. 2.4) eingeordnet, so liegen diese in guter Übereinstimmung in einem Wertebereich von 400 kV bis 600 kV.

Vergleicht man abschließend die Ergebnisse der Blitzstoßdurch- und -überschlagspannungen $\hat{U}_{D, pos}$ und $\hat{U}_{Ü, pos}$ von LA 2 und LA 3, fallen deutlichere Unterschiede als zuvor bei den AC-Festigkeitswerten in Abschnitt 5.3.1 auf. Bei der grundlegend geringer ausfallenden positiven Polarität liegt die Blitzstoßüberschlagspannung von LA 3 mit maximal -10 % im ganzen Druckbereich leicht unter der Blitzstoßdurchschlagspannung von LA 2. Bei der negativen Polarität verweilt die Blitzstoßüberschlagspannung indes über den gesamten Druckbereich bei ca. 220 kV und liegt mit maximal -44 % bei 4 bar unter der Blitzstoßdurchschlagspannung von LA 2. Grund für die zunehmend starken Abweichungen der positiven und negativen Blitzstoßüberschlagspannung von LA 3 zu den Blitzstoßdurchschlagspannungen von LA 2 ist der Einfluss des Stützisolators, der durch die Vielzahl von über 220 elektrischen Überschlägen bereits eine massive irreversible materielle Degradationen davongetragen hat, wie Abbildung 5.6 darstellt.



Abbildung 5.6: Fotografische Aufnahme des zerstörten Stützisolators nach den experimentellen Untersuchungen unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung.

Trotz starker Degradation beträgt das kleinste Verhältnis zwischen geringster positiver Blitzstoßüberschlagspannung von ca. 200 kV bei 0 bar und Spitzenüberschlagspannung unter Wechselspannungsbeanspruchung von ca. 140 kV (ebenfalls 0 bar) immer noch ca. 1,4.

Hierbei ist zu betonen, dass lediglich nur ein einziger dreiphasiger Stützisolator untersucht werden konnte, wodurch die Ergebnisse nicht überinterpretiert werden dürfen, da diese keiner statistischen Auswertung unterliegen.

Die gemessenen positiven und negativen Blitzstoßdurch- und -überschlagspannungen \hat{U}_{pos} und \hat{U}_{neg} sowie die, aus numerischen 2D-FEM-Simulationen ermittelten maximalen positiven und negativen Blitzstoßdurch- und überschlagfeldstärken $\hat{E}_{D, \text{max}, \text{pos}}$ und $\hat{E}_{D, \text{max}, \text{neg}}$ der Leiteranordnungen 1 bis 3 sind in Anhang D.5 in einer Übersichtstabelle dargestellt.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die elektrische Festigkeit von flüssigem Stickstoff (LN_2) als elektrisches Isoliersystem für kompakte supraleitende Hochspannungskabelsysteme zu untersuchen. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung eines dreiphasigen Stützisolators, sodass die drei zylindrischen Phasenleiter innerhalb des umgebenden geerdeten Rohrkryostaten auf ihren optimalen Positionen stabilisiert werden. Gleichzeitig musste die geometrische Querschnittsfläche des Stützisolators einen möglichst großen LN_2 -Massenstrom zulassen, da dieser permanent durch das Kabelsystem fließen muss.

Zur Erreichung der Zielsetzung wurde Folgendes in dieser Arbeit betrachtet:

- Elektrische Festigkeit einphasiger parallel-zylindrischer Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff bei 77 K und 0 bar_{rel}
 - AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit vom Leiterdurchmesser und -abstand
 - AC-Durchschlagfestigkeit dünner Isolierfolien und -papiere in Flüssigstickstoff
 - AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff
- Elektrische Festigkeit einphasiger zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Flüssigstickstoff bei 77 K und 0 bar_{rel}
 - AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit vom Leiterdurchmesser und -abstand
 - AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben in Flüssigstickstoff
- FEM-Simulation und Modellierung einer dreiphasigen Leiteranordnung und eines Stützisolators
 - Feldstärkeoptimierte dreiphasige Leiteranordnung
 - Modellierung eines Stützisolators mittels FEM-Simulationen
- Elektrische Festigkeit dreiphasiger zylindrischer Leiteranordnungen und dem Stützisolator in Flüssigstickstoff bei 77 K bis 4 bar_{rel}
 - AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff in Abhängigkeit vom relativen Druck
 - AC- & LI-Überschlagfestigkeit des Stützisolators in Abhängigkeit vom relativen Druck

Festigkeit einphasiger parallel-zylindrischer Leiteranordnungen

AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

Der Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke aller Leiterelektroden-Durchmesser nimmt bei einem Abstand von 5 mm von ca. 26 auf ca. 20 kV/mm asymptotisch ab und verläuft ab 15 mm auf einem Festigkeitsplateau von etwa 16 kV/mm. Der Einfluss des Leiterelektroden-Durchmessers zeigt sich am deutlichsten beim kleinsten Abstand von 5 mm, bei dem die 8 mm Leiterelektrode die höchste Festigkeit mit ca. 26 kV/mm erzielt. Ab einem Abstand von 10 mm zeigt sich kein wesentlicher Unterschied in Abhängigkeit vom Leiterelektroden-Durchmesser mehr und der Einfluss des Abstandes nimmt überproportional ab.

Die Messergebnisse der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, ausgewertet in Abhängigkeit vom Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor, zeigen eine ansteigende Festigkeit mit zunehmendem Ausnutzungsfaktor im Bereich von ca. 0,65 bis 0,95. Der Einfluss des Durchmessers und des Abstandes auf die Homogenität des elektrischen Feldes ist hierbei deutlich zu erkennen. Während die Messwerte der 8 mm Leiterelektrode noch über den Bereich von ca. 0,56 bis 0,85 verteilt liegen, befinden sich die Werte der 30 mm Leiterelektrode im Bereich von etwa 0,83 bis 0,95. Der Vergleich zeigt, dass das elektrische Feld in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung mit zunehmendem Leiterelektroden-Durchmesser homogener wird, da zunehmend höhere Ausnutzungsfaktoren erreicht werden. Weiterhin zeigt sich anhand der kontinuierlich kleiner werdenden Spannweiten des Ausnutzungsfaktors (8 mm: $\approx 0,29$; 15 mm: $\approx 0,19$; 22 mm: $\approx 0,17$; 30 mm: $\approx 0,12$), dass der Einfluss des Abstandes auf die Homogenität des elektrischen Feldes bei steigendem Leiterelektroden-Durchmesser ebenfalls abnimmt.

Weiterhin wurden die ermittelten Messwerte nach dem Volumen- und Flächeneffekt ausgewertet und mit den jeweiligen empirischen Formalismen verglichen. Bei Betrachtung der Messwerte nach dem Volumeneffekt liegen die berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken bei einer 50 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit zwischen 16 und 27 kV/mm in einem entscheidend belasteten Volumenbereich von 600 mm³ bis 1.000 mm³. Dabei zeigt sich bei den ermittelten Festigkeitswerten im Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes eine im Mittel um ca. 33 % reduzierte elektrische Festigkeit. Betrachtet man die Messwerte nach dem Flächeneffekt, zeigt sich ein vergleichbares Verhalten. Die berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken bei einer 63,2 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit von 16 bis 28 kV/mm liegen in einem entscheidend belasteten Flächenbereich von 800 mm² bis 3.300 mm². Die reduzierte mittlere Abweichung zum empirischen Formalismus des Flächeneffektes beträgt hierbei ca. 35 %. Die Abweichung der gemessenen zu den berechneten Festigkeiten kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann die reduzierte elektrische Festigkeit der tatsächlichen elektrischen Festigkeit der parallel-zylindrischen Leiteranordnung entsprechen, da Messwerte derartiger Leiteranordnungen bei der Herleitung der empirischen Formalismen nicht berücksichtigt wurden. Zum anderen könnte auch die Durchführung der Messungen in offenen Behältnissen zu einer Beeinflussung geführt haben, da hier ein vergleichsweise kleines Flüssigstickstoffvolumen einer großen Behälterfläche gegenübersteht, wodurch der Wärmeeintrag zu einer erhöhten Verdampfungsrate führt. Daraus ergibt sich letztlich eine erhöhte Gasblasenbildung innerhalb der Isolierstrecke, wodurch die elektrische Festigkeit herabgesetzt wird.

Die Auswertung der Messergebnisse zur elektrischen Festigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung erfolgte über die Ermittlung der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke in Abhängigkeit vom Abstand. Da es sich bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung um eine symmetrische Anordnung handelt, wurde ausschließlich die positive Stoßpolarität untersucht. Die maximale Blitzstoßdurchschlagfeldstärke zeigt im Abstandsbereich von 5 bis 15 mm einen annähernd konstanten Verlauf zwischen ca. 30 und 40 kV/mm. Beim Abstand von 2,5 mm liegt die elektrische Festigkeit aller Leiterelektroden-Durchmesser bei nahezu 40 kV/mm. Erst ab einem Abstand von 5 mm zeigt sich ein Durchmesserereinfluss, wobei die höchste Festigkeit weiterhin von der 8 mm Leiterelektrode mit ca. 40 kV/mm erreicht wird, während die 30 mm Leiterelektrode etwa 30 kV/mm erzielt. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Festigkeit nur noch unwesentlich ab. Bei einem Abstand von 15 mm liegen die Festigkeitswerte im Bereich von ca. 29 bis 38 kV/mm.

Bei den Ergebnissen zur Stoßfestigkeit ist zu betonen, dass diese Untersuchungen ebenfalls in offenen Behältnissen durchgeführt wurden und somit eine Beeinflussung, analog zur Wechselspannungsbeanspruchung, nicht auszuschließen ist.

Das Verhältnis aus positiver Blitzstoßdurchschlagfeldstärke und AC-Spitzendurchschlagfeldstärke der Messergebnisse der parallel-zylindrischen Leiteranordnung zeigt einen konstanten bis leicht linear ansteigenden Verlauf. Dabei fällt die positive Blitzstoßdurchschlagfeldstärke um das 1,5- bis 3-fache höher aus.

Die generell höher ausfallenden elektrischen Festigkeiten unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Flüssigstickstoff sind auf den Einfluss des sogenannten Zündverzuges zurückzuführen, wodurch es aufgrund des unwahrscheinlicheren Vorhandenseins eines Startelektrons zu einer verzögerten Initiierung des Entladungsprozesses kommt.

AC-Durchschlagfestigkeit dünner Isolierfolien und -papiere

Der Einfluss dünner Isolierfolien und -papiere auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff wurde unter Wechselspannungsbeanspruchung bei Abständen von 5, 10 und 15 mm untersucht. Dazu wurden die Leiterelektroden der parallel-zylindrischen Leiteranordnung mit einem Durchmesser von 22 mm ein- und zweilagig mit einer 50 %-Überlappung mit dünnen Isolierfolien und -papieren umwickelt. Als Isolierfolien bzw. Isolierpapiere wurden die für Flüssigstickstoff geeigneten Materialien Polyimid (PI), Polypropylen laminiertes Papier (PPLP) sowie Kraftisolierpapier (KIP) mit einer Materialstärke von 160 μm bis 220 μm ausgewählt. Die Messungen erfolgten erneut in offenen Behältnissen und umfassten insgesamt 90 Einzelmesswerte.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte durch die Ermittlung der mittleren effektiven Durchschlagspannung sowie der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke in Abhängigkeit vom Abstand. Die Festigkeitswerte wurden mit denen von Flüssigstickstoff verglichen.

Betrachtet man den Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke bei einem Abstand von 5 mm, so zeigt sich bei einzelnen Konfigurationen sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der elektrischen Festigkeit. Im Vergleich zu flüssigem Stickstoff mit 24 kV/mm erzielen einlagiges PI mit 26 kV/mm, zweilagiges PPLP mit 28 kV/mm sowie ein- und zweilagiges KIP mit 37 bzw. 39 kV/mm erhöhte elektrische Festigkeiten. Zweilagiges PI mit 20 kV/mm und einlagiges PPLP mit 21 kV/mm erreichen hingegen geringere Festigkeitswerte.

Unter Berücksichtigung der bis zu $\pm 50\%$ betragenden Standardabweichungen zeigt sich, dass ausschließlich die beiden KIP-Konfigurationen mit 37 und 39 kV/mm im Vergleich zu flüssigem Stickstoff mit 24 kV/mm zu einer signifikanten Verbesserung führen.

Die größte Verbesserung im Vergleich zu flüssigem Stickstoff mit 19 kV/mm wird erneut von beiden KIP-Konfigurationen mit 27 und 28 kV/mm erzielt, gefolgt vom einlagigen PI mit 26 kV/mm. Bei den übrigen Konfigurationen liegt der Mittelwert zwar jeweils oberhalb der LN_2 -Festigkeit von 19 kV/mm, jedoch überlappen sich die jeweiligen Standardabweichungsbereiche. Beim Abstand von 10 mm sinken die maximalen Standardabweichungen mit Werten unter ca. $\pm 30\%$ deutlich im Vergleich zu denen bei einem Abstand von 5 mm.

Beim Abstand von 15 mm wird die größte Verbesserung nun vom einlagigen PPLP mit 22 kV/mm sowie von beiden PI-Konfigurationen mit 19 und 20 kV/mm erzielt. Bei den maximalen Standardabweichungen ist erneut eine Reduzierung auf nur noch ca. $\pm 25\%$ zu verzeichnen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass analytisch keine Material-Lagen-Abstands-Konfiguration

eindeutig identifiziert werden konnte, durch die die elektrische Festigkeit systematisch verbessert wird. Als Hauptursache für die starke Varianz der Ergebnisse wird der komplexe Herstellungsprozess der umwickelten Leiterelektroden angesehen. Insbesondere die Überlappung nimmt einen signifikanten Einfluss, da sie die materielle Bedeckung maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund wird in weiteren Untersuchungen darauf verzichtet, Leiterelektroden mit dünnen Feststoffen zu umwickeln und zu untersuchen.

AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben

Um den Einfluss fester Isolierstoffe auf die elektrische Überschlagfestigkeit in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung für Leiterelektroden mit einem Durchmesser von 22 mm zu untersuchen, wurden gerade Überschlagproben mit einem Abstand von 20 mm konstruiert. Diese wurden aus den fünf unterschiedlichen Polymeren Polyethylen (PE-HD), Polypropylen (PP-H), Polyoxymethylen (POM-C), Polytetrafluorethylen (PTFE) sowie zwei glasfaserverstärkten Kunststoffen (EGS102 und G11) hergestellt. Anhand der Messergebnisse zeigt sich im Vergleich zum Mittelwert der mittleren Durchschlagfeldstärke von flüssigem Stickstoff mit 8,84 kV/mm eine signifikante Festigkeitsminderung beim glasfaserverstärkten Kunststoff G11 um bis zu 26 % auf 6,48 kV/mm. Als Ursache wird angenommen, dass kleine Gaseinschlüsse und Grenzflächenphänomene im Inneren des Materials frühzeitige Entladungen initiieren. Die weiteren untersuchten Materialien zeigen im Mittelwertvergleich ebenfalls geringe bis mäßige Reduzierungen der elektrischen Überschlagfestigkeit, deren Standardabweichungsbereiche sich jedoch noch mit denen von flüssigem Stickstoff überlappen. Die Überschlagfeldstärke beträgt bei POM-C 8,40 kV/mm, bei PP-H 8,00 kV/mm, bei EGS102 7,90 kV/mm und bei PTFE 7,35 kV/mm. Bei PE-HD wird mit 9,40 kV/mm die höchste Überschlagfestigkeit erreicht. Daher wurde PE-HD als Material für alle weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Zur Untersuchung der abstandsabhängigen Beeinflussung der elektrischen Überschlagfestigkeit wurden in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung für Leiterelektroden mit einem Durchmesser von 22 mm gerade Überschlagproben aus PE-HD in den Abständen 5, 10 und 20 mm hergestellt. Hierbei zeigt sich im Vergleich zum Mittelwert der mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke von Flüssigstickstoff von 15,49 kV/mm bei einem Abstand von 5 mm eine Reduzierung der elektrischen Überschlagfestigkeit um rund 26 % auf 11,45 kV/mm. Dieser Einfluss schwindet ab einem Abstand von 10 mm, wobei die Überschlagfestigkeit mit 12,95 kV/mm oberhalb der Durchschlagfestigkeit von 11,27 kV/mm liegt. Bei einem Abstand von 20 mm liegt die Überschlagfestigkeit mit 9,40 kV/mm nahezu auf dem Niveau der Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff mit 8,84 kV/mm.

Inwieweit halbrunde Spalte in Bereichen höchster elektrischer Feldstärken einen Einfluss auf die elektrische Überschlagfestigkeit nehmen, wurde anhand von Überschlagproben mit halbrundem Spalt direkt am Elektrodenübergang in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung untersucht. Als Spaltradius wurden 1,0 und 1,5 mm gewählt. Die Messergebnisse zeigen bei einem Spaltradius von 1,0 mm eine elektrische Überschlagfestigkeit von 7,75 kV/mm und bei einem Spaltradius von 1,5 mm einen Wert von 7,69 kV/mm. Im Vergleich zur Überschlagfestigkeit von 9,40 kV/mm bei geraden Überschlagproben ohne Spalt entspricht dies einer Reduzierung von bis zu 18 %. Die Variation des Spaltradius zeigt dabei keinen wesentlichen Einfluss auf die Überschlagfestigkeit. Eine Ursache für die Reduzierung der elektrischen Überschlagfestigkeit durch den vergleichswei-

se kleinen Spalt ist dessen Lage im Bereich der höchsten elektrischen Feldstärke am Tripel-Punkt des geschichteten Dielektrikums. Die Feldstärke wird entsprechend dem Verhältnis der relativen Permittivitäten im flüssigen Stickstoff erhöht, sodass eine verfrühte Entladung initiiert wird. Somit gilt bei der Auslegung von Stützisolatoren für den Einsatz in flüssigem Stickstoff, wie allgemein für elektrische Isolieranordnungen, dass kleine Spalte konsequent zu vermeiden sind.

Da ein maßgeblicher Anspruch an den Stützisolator eine möglichst geringe Querschnittsfläche ist, wurden zwei unterschiedliche Taillierungen hinsichtlich ihres Einflusses auf die elektrische Überschlagfestigkeit in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung untersucht. Hierzu wurden gerade Überschlagproben aus PE-HD für einen Leiterelektroden-Durchmesser von 22 mm bei einem Abstand von 20 mm sowohl rund als auch eckig tailliert, sodass mittig ein Steg von 4 mm verbleibt. Die Messergebnisse zeigen im Vergleich zur Überschlagfestigkeit von 9,40 kV/mm bei geraden Überschlagproben ohne Taillierung, dass Taillierungen innerhalb hoher elektrischer Feldstärkeverteilungen zu einer Reduzierung der elektrischen Überschlagfestigkeit um bis zu 16 % führen. Dabei verursacht die eckige Taillierung mit 7,83 kV/mm eine etwas stärkere Reduzierung als die runde Ausführung mit 8,20 kV/mm. Die Taillierungen führen zu einer Feldverdrängung und zu einer Erhöhung des belasteten Isolierolumens, woraus eine Reduzierung der elektrischen Durch- bzw. Überschlagwahrscheinlichkeit resultiert. Bei der Auslegung von Stützisolatoren mit geringer Querschnittsfläche ist daher darauf zu achten, Taillierungen in Bereichen der Feldverteilung anzuordnen, in denen deren Einfluss keine signifikante Erhöhung des entscheidend belasteten Isolierolumens hervorruft.

Festigkeit einphasiger zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen

AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

Grundsätzlich gleichen die Festigkeitsverläufe von flüssigem Stickstoff in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen denen in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Der Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke aller Leiterelektroden-Durchmesser nimmt, bei 5 mm beginnend, asymptotisch ab und verläuft ab 15 mm auf einem Festigkeitsplateau von etwa 19 kV/mm. Der Einfluss des Leiterelektroden-Durchmessers zeigt sich ebenfalls, jedoch wesentlich deutlicher, beim kleinsten Abstand von 5 mm, bei dem die 8 mm Leiterelektrode die höchste Festigkeit mit ca. 40 kV/mm erreicht, während die Festigkeiten der 15-, 22- und 30 mm Leiterelektroden bei ca. 25 kV/mm liegen. Mit zunehmendem Abstand bis 25 mm nimmt die Differenz der elektrischen Festigkeit der 8 mm Leiterelektrode überproportional auf etwa 23 kV/mm ab. Generell verlaufen die Festigkeiten der 15-, 22- und 30 mm Leiterelektroden über den gesamten Betrachtungsbereich deutlich flacher von ca. 25 kV/mm auf etwa 19 kV/mm, als es bei der 8 mm Leiterelektrode der Fall ist.

Die Auswertung der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke in Abhängigkeit vom Ausnutzungsfaktor verdeutlicht, dass die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung generell inhomogener ist als die parallel-zylindrische Leiteranordnung. Dies zeigt sich an der Spannweite von 0,32 bis 0,88, welche damit inhomogener ausfällt als bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung mit 0,56 bis 0,95. Ebenfalls ist erneut gut zu erkennen, dass mit zunehmendem Leiterelektroden-Durchmesser höhere Ausnutzungsfaktoren erreicht werden.

Der Einfluss des Abstandes auf die Spannweite der Festigkeitsergebnisse über dem Ausnutzungsfaktor ist hingegen nicht mehr eindeutig erkennbar.

Die Auswertung der Messergebnisse nach dem Volumen- und Flächeneffekt sowie der Vergleich mit den empirischen Formalismen zeigen eine insgesamt größere Übereinstimmung. Beim Volumeneffekt liegen die berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken bei einer 50 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit zwischen 16 und 40 kV/mm in einem deutlich größeren entscheidend belasteten Volumenbereich von 500 mm³ bis 30.000 mm³. Im Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes beträgt die mittlere Abweichung der Festigkeitswerte nur noch ca. -20 %. Hinsichtlich des Flächeneffektes liegen die berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken bei einer 63,2 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit zwischen 16 und 42 kV/mm ebenfalls in einem größeren entscheidend belasteten Flächenbereich von 700 mm² bis 10.000 mm². Auch hierbei verringert sich die Abweichung zum empirischen Formalismus auf ca. -21 %.

Als Ursache für die im Vergleich zu den empirischen Formalismen niedriger ausfallenden Festigkeitswerte wird auch hier angenommen, dass die Untersuchungen der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in offenen Behältnissen durchgeführt wurden und dies zu einer Reduzierung der elektrischen Festigkeit führte.

Auch bei der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung erfolgte die Ermittlung der elektrischen Festigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Abstand. Da es sich bei der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung um eine asymmetrische Leiteranordnung handelt, wurde die elektrische Festigkeit sowohl bei negativer als auch bei positiver Stoßpolarität untersucht.

Die Messergebnisse zeigen ein grundsätzlich anderes Verhalten als bei der parallel-zylindrischen Leiteranordnung. Die positive elektrische Festigkeit weist einen annähernd linear abfallenden Verlauf auf. Bei einem Abstand von 5 mm liegt die elektrische Festigkeit zwischen 35 und 50 kV/mm, wobei der höchste Wert erneut mit der 8 mm Leiterelektrode erreicht wird. Mit zunehmendem Abstand sinkt die Festigkeit und erreicht bei 15 mm einen Wertebereich von 30 bis 40 kV/mm sowie bei 25 mm einen Wertebereich von 22 bis 30 kV/mm. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Wertebereiche der Festigkeit in Abhängigkeit vom Leiterelektroden-Durchmesser mit zunehmendem Abstand abnehmen.

Die negative elektrische Festigkeit unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung verhält sich demgegenüber grundsätzlich anders. Bei einem Abstand von 5 mm liegt die elektrische Festigkeit bei ca. 40 kV/mm und verbleibt bis zu einem Abstand von 15 mm nahezu konstant auf diesem Niveau. Ab 15 mm nimmt die Festigkeit linear ab und erreicht bei einem Abstand von 25 mm einen Wert von ca. 22 kV/mm. Über den gesamten Abstandsbereich verlaufen die Messwerte unabhängig vom Leiterelektroden-Durchmesser.

Die Verläufe der Verhältnisse aus positiver bzw. negativer Blitzstoßdurchschlagfeldstärke und AC-Spitzendurchschlagfeldstärke der Messergebnisse der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung zeigen ebenfalls ein abweichendes Verhalten. Das Verhältnis bei positiver Polarität liegt bei einem Abstand von 5 mm bei etwa 1,2 bis 1,8, das bei negativer Polarität bei 1,0 bis 1,8. Mit zunehmendem Abstand bis 15 mm zeigen beide Polaritäten einen konstanten bis leicht zunehmenden Verlauf. Die Messwerte unter positiver Polarität erreichen dabei einen Wertebereich von 1,5 bis 1,8 und unter negativer Polarität von 1,5 bis 1,9. Ab einem Abstand von 15 mm nehmen

beide Verhältnisse jedoch ab und erreichen bei positiver Polarität einen Bereich von 1,0 bis 1,4 sowie bei negativer Polarität einen Bereich von 1,2 bis 1,5.

AC-Überschlagfestigkeit von Überschlagproben

In der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung wurde, wie zuvor in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung, der abstandsabhängige Einfluss auf die elektrische Überschlagfestigkeit mithilfe gerader Überschlagproben untersucht. Dazu wurden für Leiterelektroden mit einem Durchmesser von 22 mm gerade Überschlagproben aus PE-HD in den Abständen 5, 10, 15, 20 und 25 mm hergestellt. Bei einem Abstand von 5 mm zeigt sich im Vergleich zum Mittelwert der mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke von Flüssigstickstoff von 14,53 kV/mm mit 13,7 kV/mm keine wesentliche Reduzierung der elektrischen Überschlagfestigkeit. Mit zunehmendem Abstand sinken sowohl die Durch- als auch die Überschlagfestigkeit auf rund 9,7 kV/mm bei 15 mm. Dieser Trend setzt sich bis zu einem Abstand von 25 mm unvermindert fort und erreicht eine Durch- bzw. Überschlagfestigkeit von rund 6,5 kV/mm.

Weiterhin wurde in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung der Einfluss geneigter Überschlagproben aus PE-HD untersucht. Dazu wurden Überschlagproben für einen Leiterelektroden-Durchmesser von 22 mm mit Neigungswinkeln von 30° und 60° sowie für die Abstände 5, 15 und 25 mm gefertigt. Bei einem Abstand von 5 mm liegt die elektrische Festigkeit zwischen 12 und 14 kV/mm und nimmt mit zunehmendem Abstand bei 15 mm auf etwa 10 kV/mm ab. Bei einem Abstand von 25 mm liegt die elektrische Festigkeit sowohl der geneigten als auch der geraden Überschlagproben bei rund 7 kV/mm. Somit zeigt sich keine Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit von der Neigung der Überschlagproben.

FEM-Simulation dreiphasiger Leiteranordnungen und eines Stützisolators

Auf Basis der vorangegangenen Erkenntnisse aus den differenzierten elektrischen Festigkeitsuntersuchungen in parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen sowie an herunterskalierten Überschlagproben wurde daraufhin eine feldstärkeoptimierte dreiphasige zylindrische Leiteranordnung mit Stützisolator entwickelt, konstruiert und hergestellt. An dieser wurde in finalen experimentellen Untersuchungen nachgewiesen, nach welchem empirischen Formalismus und nach welchen Designkriterien supraleitende dreiphasige LN₂-isolierte Hochspannungskabelsysteme sowie feldstärkeoptimierte Stützisolatoren allgemeingültig ausgelegt werden können. Zur Modellierung wurde angenommen, dass der Flächeneffekt das dominante Vergrößerungsgesetz darstellt.

Feldstärkeoptimierte dreiphasige Leiteranordnung

Die Auslegung der optimierten dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung erfolgte so, dass bei einer Spitzenspannung von 176 kV die 99 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit von LN₂ nach dem Flächeneffekt sowohl unter Leiter-Leiter- als auch unter Leiter-Erd-Spitzenspannungsbeanspruchung für eine aktive Leiterlänge von 500 mm erreicht wird. Hierzu wurde ein Programmcode in *Python* verfasst, der die geometrischen Eigenschaften, wie Leiterelektroden Durchmesser, Leiterelektrodenabstand und Rohrelektroden Durchmesser, innerhalb vordefinierter Grenzen iterativ variiert und in *FEMM* die Feldstärkeverteilung sowie die entscheidend belastete Fläche $\alpha \% SEA$ mit einem α -Faktor von 0,82 numerisch berechnet.

Dabei ist zu betonen, dass die den einzelnen Leiterelektroden zugewiesenen Spannungen nicht den verketteten Spannungen einer dreiphasigen Leiteranordnung entsprachen, wie sie im Nennbetrieb elektrischer Netze auftreten, sondern den normativen Vorgaben einer einphasigen Prüfung dreiphasiger Betriebsmittel. So wurde einer Leiterelektrode Hochspannungspotenzial zugewiesen, während den beiden anderen Leiterelektroden sowie der umgebenden Rohrelektrode Erdpotenzial zugeordnet wurde. Als Auswahlkriterium für die optimierte Leiteranordnung galt, dass unter beiden Spitzenspannungsbeanspruchungen die jeweils maximale Spitzenfeldstärke $E_{\max, \text{Spitze}}$ mindestens der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke bei einer 99 %-Durchschlagwahrscheinlichkeit $E_{D, \max, \text{Spitze}, 99\%}$ entsprechen muss.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden aus den resultierenden Spitzenfeldstärken Verhältnisse gebildet, die idealerweise beide einen Wert von mindestens 1,0 annehmen müssen. Dieses Kriterium wurde lediglich für eine einzige sinnvolle dreiphasige zylindrische Leiteranordnung näherungsweise erfüllt. Während sich unter Leiter-Erd-Spitzenspannungsbeanspruchung ein Feldstärkeverhältnis von 1,01 ergab, betrug dieses unter Leiter-Leiter-Spitzenspannungsbeanspruchung 0,90. Dies resultiert allgemein in einem früheren elektrischen Durchschlag zwischen Leiterelektrode und Rohrelektrode als zwischen den Leiterelektroden.

Für die geometrischen Eigenschaften der optimierten dreiphasigen Leiteranordnung mit einer aktiven Leiterlänge von 500 mm ergeben sich für die Leiterelektroden ein Durchmesser von 8 mm sowie für die umgebende Rohrelektrode ein Durchmesser von 70 mm. Der Nominalabstand zwischen den Leiterelektroden beträgt 20,3 mm sowie zwischen den Leiterelektroden und der umgebenden Rohrelektrode 14,6 mm. Daraus ergeben sich bei einer Spitzenspannungsbeanspruchung von 176 kV zwischen den Leiterelektroden sowie zwischen der Leiterelektrode und der umgebenden Rohrelektrode maximale Spitzenfeldstärken von 23,0 kV/mm bzw. 26,5 kV/mm.

Modellierung des Stützisolators mittels FEM-Simulationen

Nachdem die optimierte Leiteranordnung ermittelt wurde, konnte darauf aufbauend der optimierte Stützisolator modelliert werden. Dessen Optimum gilt als erreicht, wenn die geringstmögliche maximal auftretende Feldstärke innerhalb der optimierten dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnung erzielt wird.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen, zusammengefasst zu allgemeingültigen Designkriterien für Stützisolatoren in Flüssigstickstoff, wurden 2D/3D-FEM-Berechnungen zur geometrischen Auslegung der Traghülsenwandstärke und der Abstützungen sowie deren Materialstärken und Verrundungsradien aus PE-HD in flüssigem Stickstoff durchgeführt. Das Ergebnis ist ein numerisch optimierter dreiphasiger Stützisolator, dessen geometrische Eigenschaften bei einer Querschnittsflächenbedeckung von 33 % nicht nur keinen negativen Einfluss auf die elektrische Feldverteilung zeigen, sondern zu einer Entlastung beziehungsweise Reduzierung der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke im flüssigen Stickstoff führen. Die maximale Spitzenfeldstärke zwischen den Leiterelektroden wird von 23,6 kV/mm auf 12,9 kV/mm reduziert, und die maximale Spitzenfeldstärke zwischen der Leiter- und der umgebenden Rohrelektrode wird von 26,1 kV/mm auf 15,8 kV/mm verringert.

Festigkeit dreiphasiger Leiteranordnungen und des Stützisolators

Abschließend wurden experimentelle elektrische Festigkeitsuntersuchungen unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung in einem LN₂-Badkryostaten mit einem Füllvolumen von 1.000 Litern bis zu einem relativen Druck von 4 bar durchgeführt. Dazu wurden insgesamt drei separate dreiphasige zylindrische Leiteranordnungen (kurz: LA) installiert. LA 1 bestand ausschließlich aus den drei einzelnen Leiterelektroden ohne umgebende Rohrelektrode und ohne Stützisolator. Es diente der Ermittlung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von flüssigem Stickstoff unter Leiter-Leiter-Beanspruchung. LA 2 bestand aus den drei einzelnen Leiterelektroden sowie der umgebenden geerdeten Rohrelektrode und diente der Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff unter Leiter-Erd-Beanspruchung. Anhand dieser Untersuchungen wird nachgewiesen, ob der Flächen- oder der Volumeneffekt das dominante Vergrößerungsgesetz für zylindrische Leiteranordnungen ist. Zudem dienen die Ergebnisse von LA 2 dem Vergleich mit der untersuchten dritten Leiteranordnung LA 3, in der sich der Stützisolator befindet.

AC- & LI-Durchschlagfestigkeit von Flüssigstickstoff

Die mittleren effektiven Durchschlagspannungswerte der ersten und zweiten Leiteranordnung zeigen im Vergleich, dass es über den gesamten betrachteten Druckbereich bei nahezu konstantem Spannungsabstand zu einem früheren Durchschlag unter Leiter-Erd-Beanspruchung (LA 2) als unter Leiter-Leiter-Beanspruchung (LA 1) kommt. Bei einem relativen Druck von 0 bar liegt die Durchschlagspannung von LA 1 bei ca. 150 kV, während die Durchschlagspannung von LA 2 bei ca. 110 kV liegt. Weiterhin verlaufen alle mittleren effektiven Durchschlagspannungswerte von LA 1 und LA 2 nach einem geringen elektrischen Festigkeitsanstieg im Druckbereich von 0 bis 1 bar, von ca. 150 kV auf ca. 165 kV sowie von ca. 110 kV auf ca. 120 kV, nahezu konstant über den gesamten weiteren Druckbereich. Damit erreicht LA 2 im Wesentlichen die erwartete mittlere effektive Durchschlagspannung von 125 kV. Der elektrische Festigkeitsanstieg deutet auf einen anfänglich noch vorhandenen geringen Einfluss des Volumeneffektes hin, der ab einem relativen Druck von 1 bar infolge der Druckerhöhung verschwindet. Dies spricht eindeutig dafür, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit von flüssigem Stickstoff in zylindrischen Leiteranordnungen, wie angenommen, durch den Flächeneffekt dominiert wird. Somit führt auch eine weitere Druckerhöhung, wie sie mit bis zu 16 bar in supraleitenden Kabelsystemen üblich ist, nicht zu einer weiteren Erhöhung der elektrischen Festigkeit. Kompaktere LN₂-isolierte Hochspannungskabelsysteme sind auf dieser Grundlage nicht realisierbar.

Des Weiteren wurden die Leiteranordnungen hinsichtlich ihrer elektrischen Festigkeit unter positiver und negativer Blitzstoßspannungsbeanspruchung untersucht, da diese nicht durch die Vergrößerungsgesetze für Flüssigstickstoff beschrieben werden. Bei Betrachtung der ersten und zweiten Leiteranordnung bestätigt sich erneut, wie zuvor unter Wechselspannungsbeanspruchung, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit von LA 1 mit +320 kV und -492 kV sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität über der von LA 2 mit +233 kV und -283 kV liegt.

Werden die elektrischen Festigkeiten bei unterschiedlicher Stoßpolarität verglichen, so fallen die negativen Blitzstoßfestigkeiten stets höher aus als die positiven Blitzstoßfestigkeiten, was eindeutig auf den Polaritätseffekt zurückzuführen ist. Die positiven Blitzstoßdurchschlagspannungen verlaufen degressiv und gehen in ein Festigkeitsplateau über. LA 1 erreicht dieses Plateau von

rund 420 kV ab einem Überdruck von ca. 2 bar, während LA 2 bereits ab einem Überdruck von ca. 1 bar ein Plateau von etwa 300 kV erreicht. Die negativen Blitzstoßfestigkeiten steigen hingegen kontinuierlich an. LA 1 erreicht ab einem Überdruck von 2 bar Messwerte von ca. -600 kV, die bei weiterer Druckerhöhung nicht mehr ermittelt werden konnten. LA 2 nimmt bis zu einem relativen Druck von 4 bar kontinuierlich zu und erreicht ca. -550 kV. Insgesamt ordnen sich die ermittelten Blitzstoßspannungswerte mit Beträgen im Bereich von 400 bis 600 kV plausibel in den Stand von Wissenschaft und Technik ein.

Beim Vergleich der positiven und negativen Blitzstoßspannungsfestigkeiten mit den Wechselspannungsfestigkeiten von LA 1 und LA 2 fallen die Blitzstoßfestigkeiten, wie erwartet, stets höher aus, da sich hier erneut der Einfluss des Zündverzuges im Entladungsprozess zeigt. Das geringste Verhältnis zwischen positiver bzw. negativer Blitzstoßdurchschlagsspannung und mittlerer Spitzendurchschlagspannung über den betrachteten Überdruckbereich wird von LA 2 bestimmt und liegt zwischen dem 1,5- bis 1,7-fachen sowie dem 1,8- bis 3,1-fachen der Wechselspannungsfestigkeit.

AC- & LI-Überschlagfestigkeit des Stützisolators

Werden die mittleren effektiven Durchschlagsspannungswerte von LA 2 und LA 3 ab einem Überdruck von 1 bar betrachtet, so erreichen diese mit ca. 110 kV in guter Übereinstimmung die erwartete mittlere effektive Durchschlagsspannung von 125 kV. Die geringe Abweichung der Spannungswerte zwischen LA 2 ohne Stützisolator und LA 3 mit Stützisolator von lediglich ca. 4 % bestätigt, dass der Stützisolator keinen signifikanten Einfluss auf die elektrische Durchschlagfestigkeit nimmt. Mit zunehmendem relativem Druck bis 4 bar steigt die relative Abweichung jedoch auf ca. 17 % an, was darauf zurückzuführen ist, dass der Stützisolator infolge der elektrischen Entladungsvorgänge zunehmend oberflächlich geschädigt wird.

Bei LA 3 mit eingebautem Stützisolator zeigt sich bei positiver Stoßpolarität im Vergleich zu LA 2 ein ähnlicher Trend mit geringfügig niedrigeren Festigkeitswerten von ca. +300 kV im Überdruckbereich von 0 bis 3 bar. Bei negativer Stoßpolarität tritt über den betrachteten Überdruckbereich hingegen kein weiterer Anstieg mehr auf, und die Blitzstoßüberschlagspannung verbleibt nahezu konstant bei ca. -220 kV. Als Ursache für die auffallend geringe Überschlagfestigkeit wird die bereits weit fortgeschrittene materielle Zerstörung des Stützisolators infolge der Vielzahl elektrischer Entladungen angesehen. Dennoch beträgt das geringste Verhältnis zwischen Blitzstoß- und Wechselspannungsbeanspruchung bei einem Überdruck von 0 bar weiterhin etwa 1,4 und führt somit trotz intensiver materieller Schädigung des Stützisolators nicht zu einer Festigkeitsreduzierung unterhalb der mittleren effektiven Wechselspannungsfestigkeit von 125 kV.

Abschließend ist zu den Ergebnissen dieser Arbeit zu sagen, dass kompakte supraleitende Hochspannungskabelsysteme mit reinem flüssigen Stickstoff als elektrischem Isoliersystem für den Einsatz in der Mittelspannungsebene grundsätzlich realisierbar sind. Zudem können die hierfür erforderlichen dreiphasigen Stützisolatoren mit geringer Querschnittsfläche für LN₂-Massenströme geometrisch so ausgelegt werden, dass sie keinen negativen Einfluss auf die elektrische Festigkeit des Isoliersystems ausüben.

Literaturverzeichnis

- [1] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme*. Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-21957-3.
- [2] VDE, *Isolationskoordination: Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen*, 10.2022. Adresse: https://www.normenbibliothek.de/vde-xaveropp/normenbibliothek/start.xav?start=%2F%2F%5B%40attr_id%3D%270100678%27%5D&origin=link&hlf=xaver.component.Hitlist_0&tf=xaver.component.Text_0&ssinst=673D0BF6&SID=
- [3] VDE, *CENELEC-Normspannungen*, 4.2012. Adresse: https://www.normenbibliothek.de/vde-xaveropp/normenbibliothek/start.xav?start=%2F%2F%5B%40attr_id%3D%270175004%27%5D&origin=link&hlf=xaver.component.Hitlist_0&tf=xaver.component.Text_0&ssinst=8D74A94F&SID=
- [4] BDEW, *Länge des deutschen Stromnetzes: Tabelle*, 2018. Adresse: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-184-millionen-kilometer/>
- [5] H. Seidl und R. Heuke, *Technologieübersicht. Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen*. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg., Berlin. Adresse: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/technologieuebersicht.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [6] TenneT, *SuedLink: Die Windstromleitung von Nord nach Süd - gemeinsam schaffen wir eine sichere Verbindung durch ganz Deutschland*, TenneT, Hrsg. Adresse: <https://www.tennet.eu/de/projekte/suedlink>
- [7] Oliver Wyman, Hrsg., *Blackout: E-Mobilität setzt Netzbetreiber unter Druck*, Oliver Wyman, 2018. Adresse: https://www.oliverwyman.de/content/dam/oliver-wyman/v2-de/publications/2018/Jan/2018_OliverWyman_E-MobilityBlackout.pdf
- [8] NKT cables GmbH, *Hoch- und Höchstspannungs-Kabelanlagen, Kabel und Garnituren bis 550 kV: Produktkatalog*, NKT cables GmbH, Hrsg., 2009. Adresse: <https://www.nkt.de/>
- [9] Siemens, Hrsg., *Kabel und Leitungen für Starkstrom, 4.*, überarb. Aufl. Berlin und München: Siemens-Aktienges. Abt. Verl., 1987, ISBN: 3800914727.
- [10] ETG, Hrsg., *Technische Innovation in Verteilnetzen: Moderne VPE Kabelsysteme im 110-kV Verteilnetz: neue Ansätze und innovative Techniken*, 2005. Adresse: <https://docplayer.org/24544109-Dr-johannes-kaumanns-sigurdur-a-hansen-moderne-vpe-kabelsysteme-im-110-kv-verteilnetz-neue-ansaezte-und-innovative-techniken.html>
- [11] S. Franke, A. Schmid, C. Humpert, M. Klankers, W. Reiser und S. Huwer, „Electric Field Investigations of a Compact Superconducting Three-Phase Single Conductor Cable Assembly“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 31, Nr. 5, S. 1–5, 2021, DOI: [10.1109/TASC.2021.3058933](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3058933)
- [12] J. Gerhold, „Properties of cryogenic insulants“, *Cryogenics*, Jg. 38, Nr. 11, S. 1063–1081, 1998, DOI: [10.1016/S0011-2275\(98\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00094-0)
- [13] A. Küchler, *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen* (VDI-Buch), 4. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, ISBN: 978-3-662-54700-7. DOI: [10.1007/978-3-662-54700-7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7)
- [14] M. Kahle, *Elektrische Isoliertechnik*, 1. Aufl. Berlin: Verlag Technik, 1988, ISBN: 3341004920.
- [15] A. Roth, *Hochspannungstechnik*. Vienna: Springer Vienna, 1950, ISBN: 978-3-7091-3906-6. DOI: [10.1007/978-3-7091-3905-9](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3905-9)
- [16] D. I. Doukas, „Superconducting Transmission Systems: Review, Classification, and Technology Readiness Assessment“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 29, Nr. 5, S. 1–5, 2019, DOI: [10.1109/TASC.2019.2895395](https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2895395)
- [17] B. Marchionini, S. Eckroad, L. Serri, G. Angeli, H. Ohsaki, D. Mosteller und L. Martini, „High Temperature Superconductivity Application Readiness Map - Energy Delivery - Transmission, Substation and Distribution“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 33, Nr. 5, S. 1–5, 2023, DOI: [10.1109/TASC.2023.3242226](https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3242226)
- [18] B. Holzapfel, *Supraleitung International: HTSL Materialien und Drähte für Energieanwendungen*, Berlin, 4.04.2022.
- [19] C. Räch, *Untersuchung von Wechselstromverlusten verschiedener hochtemperatursupraleitender Mehrleiterkonzepte für dreiphasige Hochstromanwendungen*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2024. DOI: [10.5445/IR/1000168809](https://doi.org/10.5445/IR/1000168809)
- [20] M. Noe, M. Wolf und W. Fietz, „Entwicklung von HTS Leiterkonzepten für Hochstromanwendungen“, in *Braunschweiger Energieseminar 2019*, Bd. 10.

- [21] C. Barth, D. C. van der Laan, N. Bagrets, C. M. Bayer, K.-P. Weiss und C. Lange, „Temperature- and field-dependent characterization of a conductor on round core cable“, *Superconductor Science and Technology*, Jg. 28, Nr. 6, S. 065 007, 2015, DOI: [10.1088/0953-2048/28/6/065007](https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/6/065007)
- [22] C. Summereder, „Dielektrische Untersuchungen an Tieftemperaturisolationssystemen“, Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 2003. Adresse: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=8087
- [23] WG D1.64, *Electrical Insulation Systems at Cryogenic Temperatures: D1 - Materials and emerging test techniques*. 2021, ISBN: 78-2-85873-551-8.
- [24] N. Hayakawa, S. Nishimachi, O. Maruyama, T. Ohkuma, J. Liu und M. Yagi, „A Novel Electrical Insulating Material for 275 kV High-Voltage HTS Cable with Low Dielectric Loss“, *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 507, Nr. 3, S. 032 021, 2014, DOI: [10.1088/1742-6596/507/3/032021](https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/3/032021)
- [25] N. Hayakawa, K. Yamakami, T. Masuda und H. Kojima, „Dielectric Characteristics of Liquid Nitrogen/Synthetic Paper Composite Insulation System for Extra High Voltage HTS Cable“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 31, Nr. 5, S. 1–4, 2021, DOI: [10.1109/TASC.2021.3058204](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3058204)
- [26] N. Hayakawa, K. Ishida, T. Matsuoka und H. Kojima, „Electrical Insulation Characteristics and Mechanisms of Low Dielectric Loss Materials for High-Voltage HTS Cables“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 27, Nr. 4, S. 1–4, 2017, DOI: [10.1109/TASC.2016.2645796](https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2645796)
- [27] Projektträger Jülich, Hrsg., *SuperLink: Innovatives Hochtemperatursupraleiter-Konzept in München*, BMWK-Fachportal Industrie-Energieforschung, 2023. Adresse: https://www.industrie-energieforschung.de/ueber_uns
- [28] E. Shabagin, C. Heidt, S. Strauß und S. Grohmann, „Modelling of 3D temperature profiles and pressure drop in concentric three-phase HTS power cables“, *Cryogenics*, Jg. 81, S. 24–32, 2017, DOI: [10.1016/j.cryogenics.2016.11.004](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.11.004)
- [29] D. Kottonau, E. Shabagin, Batista de Sousa, Wescley Tiago, J. Geisbüsch, M. Noe, H. Stagge, S. Fechner, H. Woiton und T. Küsters, *Bewertung des Einsatzes supraleitender 380-kV-Kabel*. KIT Scientific Publishing, 2019. DOI: [10.5445/KSP/1000093864](https://doi.org/10.5445/KSP/1000093864)
- [30] M. Noe, *Superconducting Cables: EUCAS Short Course Power Applications*, Genf, 2017. Adresse: https://indico.cern.ch/event/626654/attachments/1523851/2381785/Superconducting_Cables_-_Dr._Mathias_Noel.pdf
- [31] ENTSO-E, *Technology Readiness Levels*, ENTSO-E, Hrsg., 2023. Adresse: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/trls>
- [32] ENTSO-E, *High Temperature Superconductor (HTS) Cables*, ENTSO-E, Hrsg., 2023. Adresse: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/high-temperature-superconductor-hts-cables>
- [33] M. Yazdani-Asrami, S. Seyyedbarzegar, A. Sadeghi, W. T. B. de Sousa und D. Kottonau, „High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends“, *Superconductor Science and Technology*, Jg. 35, Nr. 8, S. 083 002, 2022, DOI: [10.1088/1361-6668/ac7ae2](https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac7ae2)
- [34] J. P. Stovall, J. A. Demko, P. W. Fisher, M. J. Gouge, J. W. Lue, U. K. Sinha, J. W. Armstrong, R. L. Hughey, D. Lindsay und J. C. Tolbert, „Installation and operation of the Southwire 30-meter high-temperature superconducting power cable“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 11, Nr. 1, S. 2467–2472, 2001, DOI: [10.1109/77.920363](https://doi.org/10.1109/77.920363)
- [35] S. Yamaguchi, Y. Ivanov, H. Watanabe, N. Chikumoto, H. Koshiduka, K. Hayashi und T. Sawamura, „Construction and 1st Experiment of the 500-meter and 1000-meter DC Superconducting Power Cable in Ishikari“, *Physics Procedia*, Jg. 81, S. 182–186, 2016, DOI: [10.1016/j.phpro.2016.04.046](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.04.046)
- [36] J. F. Maguire, J. Yuan, W. Romanosky, F. Schmidt, R. Soika, S. Bratt, F. Durand, C. King, J. McNamara und T. E. Welsh, „Progress and Status of a 2G HTS Power Cable to Be Installed in the Long Island Power Authority (LIPA) Grid“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 21, Nr. 3, S. 961–966, 2011, DOI: [10.1109/TASC.2010.2093108](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093108)
- [37] T. Masuda, H. Yumura, M. Ohya, Y. Ashibe, M. Watanabe, T. Minamino, H. Ito, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh und Y. Noguchi, „Test Results of a 30 m HTS Cable for Yokohama Project“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 21, Nr. 3, S. 1030–1033, 2011, DOI: [10.1109/TASC.2010.2093109](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093109)
- [38] S. Lee, J. Yoon, B. Lee und B. Yang, „Modeling of a 22.9kV 50MVA superconducting power cable based on PSCAD/EMTDC for application to the Icheon substation in Korea“, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Jg. 471, Nr. 21-22, S. 1283–1289, 2011, DOI: [10.1016/j.physc.2011.05.179](https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.179)

- [39] M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, T. Kawahara und S. Yamaguchi, „Status of a 200-Meter DC Superconducting Power Transmission Cable After Cooling Cycles“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 23, Nr. 3, S. 5 400 204, 2013, DOI: [10.1109/TASC.2012.2235510](https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2235510)
- [40] D. Zhang, S. Dai, Y. Teng, F. Zhang, N. Song, Z. Gao, Z. Zhu, X. Xu, T. Ma, Z. Zhang, W. Zhou, Y. Wang, Y. Lin, J. Zhang, G. Zhang, L. Xiao und L. Lin, „Testing Results for the Cable Core of a 360 m/10 kA HTS DC Power Cable Used in the Electrolytic Aluminum Industry“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 23, Nr. 3, S. 5 400 504, 2013, DOI: [10.1109/TASC.2012.2236812](https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2236812)
- [41] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe und A. Hobl, „AmpaCity — Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV cables“, in *2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Stemmler, Hrsg., IEEE, 2013, S. 323–326, ISBN: 978-1-4799-0070-1. DOI: [10.1109/ASEMD.2013.6780785](https://doi.org/10.1109/ASEMD.2013.6780785)
- [42] B. Yang, J. Kang, S. Lee, C. Choi und Y. Moon, „Qualification Test of a 80 kV 500 MW HTS DC Cable for Applying Into Real Grid“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 25, Nr. 3, S. 1–5, 2015, DOI: [10.1109/TASC.2015.2396683](https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2396683)
- [43] A. Marian, S. Holé, F. Lesur, M. Tropeano und C. E. Bruzek, „Validation of the superconducting and insulating components of a high-power HVDC cable“, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Jg. 34, Nr. 1, S. 26–36, 2018, DOI: [10.1109/MEI.2018.8246119](https://doi.org/10.1109/MEI.2018.8246119)
- [44] J. B. Na, H. G. Sung, C. Y. Choi, Y. Jang und Y. Hun, „Design of 23kV 50MVA class HTS Cable in South Korea“, *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 1054, S. 012 073, 2018, DOI: [10.1088/1742-6596/1054/1/012073](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1054/1/012073)
- [45] V. Sytnikov, A. Kashcheev, M. Dubinin, V. Karpov und T. Ryabin, „Test Results of the Full-Scale HTS Transmission Cable Line (2.4 Km) for the St. Petersburg Project“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 31, Nr. 5, S. 1–5, 2021, DOI: [10.1109/TASC.2021.3063067](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3063067)
- [46] W. Prusseit und R. Bach, „The Munich SuperLink project“, in *Transformer Magazine*, S. 10–15. Adresse: <https://transformers-magazine.com/magazine/the-munich-superlink-project/>
- [47] Vision Electric Super Conductors GmbH, *Das HighAmp Projekt*, VESC GmbH, Hrsg., 2023. Adresse: <https://highamp-project.de/de/future-engineered/>
- [48] N. Magnusson und A. Marian, Hrsg., *SCARLET: Superconducting Cables for sustainable Energy Transition*, 2022. Adresse: <https://scarlet-project.eu/>
- [49] N. Magnusson, A. Allais, G. Angeli, G. Bouvier, C. E. Bruzek, J. Candido, C. Creusot, M. Gammelsæter, E. Garofalo, F. Gömöry, E. Hodge, S. Holé, A. Marian, A. Morandi, W. Reiser und B. West, „SCARLET – A European Effort to Develop HTS and MgB₂ Based MVDC Cables“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, S. 1–5, 2023, DOI: [10.1109/TASC.2023.3340646](https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3340646)
- [50] M. Stiller, *Hochtemperatur Supraleiter: AmpaCity: Betriebserfahrungen*, Berlin, März 2020. Adresse: https://ivsupra.de/wp-content/uploads/2020/03/9_Stiller-ZIEHL-VII-Netzausbau-mit-Supraleitung-II.pdf
- [51] M. Watanabe, T. Masuda, H. Yumura, H. Takigawa, Y. Ashibe, H. Ito, C. Suzawa, M. Hirose, K. Yatsuka, K. Sato und S. Isojima, „Development of 22.9kV high-temperature superconducting cable for KEPCO“, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Jg. 463-465, S. 1132–1138, 2007, DOI: [10.1016/j.physc.2007.04.278](https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.04.278)
- [52] LS Cable & Systems, *LS SUPERCONDUCTING CABLE SYSTEM: 22.9 kV - 200 kV AC/DC HTS Cable Systems & Cryogenic Systems*, LS Cable & Systems, Hrsg. Adresse: https://www.lscns.co.kr/en/product/prod_view.asp?searchSeq=3102&searchCate=111
- [53] V. E. Sytnikov, S. E. Bemert, S. I. Kopylov, M. A. Romashov, T. V. Ryabin, Y. G. Shakaryan und V. V. Lobynstsev, „Status of HTS Cable Link Project for St. Petersburg Grid“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 25, Nr. 3, S. 1–4, 2015, DOI: [10.1109/TASC.2014.2373814](https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2373814)
- [54] C. Räch, *Ultra-compact and high-current power distribution cables with high-temperature superconductors: HighAmp*, Berlin, 10.04.2024.
- [55] C. E. Bruzek, T. Spina, U. Melaccio, M. Tropeano, A. Marian, A. Morandi, F. Gömöry, P. Kováč, W. Reiser, S. Holé, N. Lallouet, T. Iannaccone, J. Roudaut und N. Magnusson, „MgB₂ -Based MVDC Superconducting Power Cable in Liquid Hydrogen for Hybrid Energy Distribution“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 34, Nr. 3, S. 1–5, 2024, DOI: [10.1109/TASC.2023.3347216](https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3347216)
- [56] K. O. Papailiou und F. Schmuck, *Silikon-Verbundisolatoren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, ISBN: 978-3-662-64248-1. DOI: [10.1007/978-3-662-64249-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64249-8)

- [57] H. Koch, Hrsg., *Gas insulated substations*, Second edition. Hoboken, NJ und Piscataway, NJ: Wiley und IEEE Press, 2022, ISBN: 9781119623588.
- [58] C. i. g. r. Des électriciens, *Optimized gas-insulated systems by advanced insulation techniques*. [Paris] (21 rue d'Artois, 75008): CIGRÉ, 2014, ISBN: 978-2-85873-266-1.
- [59] M. Tenzer, „Funktionell gefüllte Isolierwerkstoffe für Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersysteme in kompakten gasisolierten Anlagen“, Dissertation, Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, Darmstadt, 2015.
- [60] C. i. g. r. Des électriciens, *Field grading in electrical insulation systems*. [Paris] (21 rue d'Artois, 75008): CIGRÉ, 2020, ISBN: 978-2-85873-496-2.
- [61] S. Zhu, P. Liu, A. Gong, R. Hu, Z. Wu, H. Wang und Z. Peng, „Optimization of Electric Field Distribution for Tri-Phase Tri-Post Insulator in 220kV GIL“, in *2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, IEEE, 2019, S. 259–262, ISBN: 978-1-7281-3121-4. DOI: [10.1109/CEIDP47102.2019.9010583](https://doi.org/10.1109/CEIDP47102.2019.9010583)
- [62] M. Kahle und W. Mosch, Hrsg., *Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid*. Heidelberg: Huethig, 1979, ISBN: 3-7785-0540-8.
- [63] B. Du, Z. Guo, H. Liang, L. Hao, B. Cui und Y. Chen, „Investigation on Breakdown of AC-GIL Tri-post Insulator with Surface Crack Defect“, in *2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, IEEE, 2023, S. 1–4, ISBN: 979-8-3503-3467-8. DOI: [10.1109/ICEMPE57831.2023.10138935](https://doi.org/10.1109/ICEMPE57831.2023.10138935)
- [64] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl, *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin und Heidelberg: Springer, 1986, ISBN: 3540160140.
- [65] J. Hoinkis und E. Lindner, *Chemie für Ingenieure*, 13., vollständig überarbeitete Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007, ISBN: 978-3527317981.
- [66] R. Arora und W. Mosch, *High voltage and electrical insulation engineering* (IEEE Press series on power and energy systems), Second edition. Piscataway (New Jersey) und Hoboken (New Jersey): IEEE Press und Wiley, 2022, ISBN: 9781119568872.
- [67] G. Hilgarth, *Hochspannungstechnik* (Leitfaden der Elektrotechnik). Stuttgart: Teubner, 1981, Bd. 6, ISBN: 3-519-06422-7.
- [68] D. Kind und H. Kärner, *Hochspannungs-Isoliertechnik für Elektrotechniker* (Programm Elektrotechnik). Braunschweig und Wiesbaden: Vieweg, 1982, ISBN: 3-528-03812-8.
- [69] D. Peier, „Untersuchung von Durchschlagsvorgängen in flüssigem Stickstoff bei hohen Spannungen“, Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 1975.
- [70] L. L. Alston, Hrsg., *High-voltage technology* (Harwell post-graduate series). London: Oxford Univ. Pr, 1968, ISBN: 0198517025.
- [71] M. Hara, T. Kaneko und K. Honda, „Thermal-bubble initiated breakdown characteristics of liquid helium and nitrogen at atmospheric pressure“, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Jg. 23, Nr. 4, S. 769–778, 1988, DOI: [10.1109/14.7351](https://doi.org/10.1109/14.7351)
- [72] A. Al-Taie, C. Park, P. Cheetham, C. H. Kim, L. Graber und S. V. Pamidi, „A New Representation of Paschen's Law Suitable for Variable Temperature Power Applications“, in *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, IEEE, 2019, S. 188–192, ISBN: 978-1-5386-7624-0. DOI: [10.1109/EIC43217.2019.9046533](https://doi.org/10.1109/EIC43217.2019.9046533)
- [73] E. Tuncer, *Strategic dielectric R&D for HTS and other DOE applications: Department of Energy Peer Review*, Alexandria (VA), USA, 2010.
- [74] C. i. g. r. Des électriciens, *Common characteristics and emerging test techniques for high temperature superconducting power equipment: [CIGRÉ], Working group D1.38*. Paris: CIGRÉ, 2015, ISBN: 978-2-85873-347-7.
- [75] C. i. g. r. Des électriciens, *Status of Development and Field Test Experience with High-Temperature Superconducting Power Equipment: [CIGRÉ], Working group D1.15*. Paris: CIGRÉ, 2010, ISBN: 978-2-85873-105-3.
- [76] N. Hayakawa, S. Nishimachi, H. Kojima und H. Okubo, „Size effect on breakdown strength in sub-cooled liquid nitrogen for superconducting power apparatus“, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Jg. 22, Nr. 5, S. 2565–2571, 2015, DOI: [10.1109/TDEI.2015.005089](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005089)

- [77] H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, K. Uchida und H. Okubo, „Statistical analysis of area and volume effects on breakdown voltage in liquid nitrogen using Weibull distribution“, in *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, 1994, S. 430–433, ISBN: 0-7803-1942-7. DOI: [10.1109/ELINSL.1994.401427](https://doi.org/10.1109/ELINSL.1994.401427)
- [78] N. Hayakawa, S. Nishimachi, T. Mastuoka, H. Kojima, M. Hanai und H. Okubo, „Breakdown characteristics and size effect in sub-cooled liquid nitrogen“, in *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, IEEE, 2014, S. 1–4, ISBN: 978-1-4799-2063-1. DOI: [10.1109/ICDL.2014.6893087](https://doi.org/10.1109/ICDL.2014.6893087)
- [79] S. Nishimachi, N. Hayakawa, H. Kojima, M. Hanai und H. Okubo, „Pressure and temperature dependence of breakdown characteristics of sub-cooled liquid nitrogen“, in *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 2012, S. 440–443, ISBN: 978-1-4673-1252-3. DOI: [10.1109/CEIDP.2012.6378814](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2012.6378814)
- [80] H. Okubo, M. Hikita, H. Goshima, H. Sakakibara und N. Hayakawa, „High voltage insulation performance of cryogenic liquids for superconducting power apparatus“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 11, Nr. 3, S. 1400–1406, 1996, DOI: [10.1109/61.517498](https://doi.org/10.1109/61.517498)
- [81] N. Hayakawa, H. Sakakibara, H. Goshima, M. Hikita und H. Okubo, „Mutual contribution of area and volume effects on breakdown strength in liquid nitrogen“, in *ICDL'96. 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, IEEE, 1996, S. 333–336, ISBN: 0-7803-3560-0. DOI: [10.1109/ICDL.1996.565502](https://doi.org/10.1109/ICDL.1996.565502)
- [82] N. Hayakawa, H. Sakakibara, H. Goshima, M. Hikita und H. Okubo, „Breakdown mechanism of liquid nitrogen viewed from area and volume effects“, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Jg. 4, Nr. 1, S. 127–134, 1997, DOI: [10.1109/94.590883](https://doi.org/10.1109/94.590883)
- [83] S.-M. Baek, J.-M. Joung, H.-J. Kim, J. W. Cho und S.-H. Kim, „Experimental Research on the Surface Discharge Characteristics for a HTS Cable Termination“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 20, Nr. 3, S. 2351–2355, 2005, DOI: [10.1109/TPWRD.2004.834872](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.834872)
- [84] H. G. Cheon, D. S. Kwag, J. H. Choi, C. H. Min, T. S. Park, H. H. Kim und S. H. Kim, „Insulation Design and Experimental Results for Transmission Class HTS Transformer With Composite Winding“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 18, Nr. 2, S. 648–651, 2008, DOI: [10.1109/TASC.2008.920837](https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920837)
- [85] X. Yang, Z. Liang, L. Zeng, X. Tang, W. Qiu, M. Song und N. Hu, „Polarity Effect on Standard Lightning Impulse Surface Flashover Under Extremely Nonuniform Electric Field in Liquid Nitrogen“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 29, Nr. 1, S. 1–7, 2019, DOI: [10.1109/TASC.2018.2856843](https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2856843)
- [86] J.-H. Koo, D.-H. Oh, J.-Y. Na, R. Hwang und B.-W. Lee, „Surface Flashover Characteristics of Ribbed Insulator in Cryogenic Environment“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 29, Nr. 5, S. 1–6, 2019, DOI: [10.1109/TASC.2019.2903461](https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2903461)
- [87] P. Cheetham, J. Wagner, T. Stamm, C. H. Kim, L. Graber und S. Pamidi, „Electric field analysis of insulating spacers for a superconducting gas-insulated transmission line“, in *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, IEEE, 2018, S. 185–189, ISBN: 978-1-5386-5788-1. DOI: [10.1109/ICPADM.2018.8401190](https://doi.org/10.1109/ICPADM.2018.8401190)
- [88] C. Humpert, C. Bauer, R. Bonin und R. Brustle, „Investigation of the flashover and breakdown voltage of thin polymer films in liquid nitrogen“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, S. 1, 2016, DOI: [10.1109/TASC.2016.2530863](https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2530863)
- [89] V. Hinrichsen, Hrsg., *Feldsteuernde Isoliersysteme: Werkstoffe, Design, Prüfung und Simulation ; Vorträge des ETG-Workshops vom 22. bis 23. November 2011 in Darmstadt* (ETG-Fachbericht). Berlin und Offenbach: VDE-Verl., 2011, Bd. 131, ISBN: 978-3-8007-3390-3.
- [90] C. Bauer, *Untersuchung der elektrischen Festigkeit von Gleitanordnungen in flüssigem Stickstoff als Dimensionierungsgrundlage für supraleitende Strombegrenzer in der Hochspannungsebene: Masterthesis*. Köln, 2014.
- [91] F. Senn, „Charakterisierung der nichtlinearen Widerstandseigenschaften von Endenglimmschutzsystemen rotierender Hochspannungsmaschinen“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Jg. 129, Nr. 5, S. 306–313, 2012, DOI: [10.1007/s00502-012-0031-2](https://doi.org/10.1007/s00502-012-0031-2)
- [92] B. Gänger, „Die Gleitentladung und ihre Gesetzmässigkeiten“, 1982. DOI: [10.5169/seals-904990](https://doi.org/10.5169/seals-904990)
- [93] VDE, *Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren: Teil 3: Zusätzliche Festlegungen für 1,2/50 µs Stoßspannungsprüfungen*, 9.2014. Adresse: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-60243-3/209085237>

- [94] DIN - Deutsches Institut für Normung, *DIN 4768:1990-05: Ermittlung der Rauheitskenngößen R_a , R_z , R_{pq} mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen*, 1990-05. Adresse: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-4768/1552484>
- [95] Curt Ronniger, *Grundlagen zur Weibull-Verteilung*. Adresse: <https://www.weibull.de/WeibullHTML.htm>
- [96] Thomas Reiter, *Weibullanalyse: Zensorisierung, Sudden Death, Einführung mit Beispielen*, Thomas Reiter, Hrsg., 2005. Adresse: <http://www.reiter1.com/Glossar/Glossar.htm>
- [97] David Meeker, *Finite Element Method Magnetics: User's Manual*, David Meeker, Hrsg., Online, 16.05.2020. Adresse: <file:///C:/Users/Andr%C3%A9/Downloads/manual-1.pdf>
- [98] A. Schmid und C. Humpert, „AC Breakdown Strength of Parallel Cylindrical Conductor Arrangements in LN 2“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 34, Nr. 3, S. 1–5, 2024, DOI: [10.1109/TASC.2024.3375272](https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3375272)
- [99] CMC Klebtechnik, *Materialdatenblatt Polyimid Klebeband*, CMC Klebtechnik, Hrsg. Adresse: <https://shop.cmc.de/documents/file/pdf/70105.pdf>
- [100] Tervakoski Film, *Materialdatenblatt PPLP: PDF: Erhältlich auf Anfrage beim Hersteller*, Tervakoski Film, Hrsg.
- [101] Ahlstrom-Munksjö, *Materialdatenblatt Kraftisolierpapier: PDF: Erhältlich auf Anfrage beim Hersteller*, Ahlstrom-Munksjö, Hrsg.
- [102] A. Schmid, S. Franke and C. Humpert, Hrsg., *Frequency-dependent permittivity and dissipation factor of solid insulation materials in liquid nitrogen*, Offenbach: VDE, 2022, ISBN: 978-3-8007-5978-1.
- [103] T. Kreuz, A. Schmid, R. Schumacher und C. Humpert, „Electrical Strength of Layered Insulation Systems in Liquid Nitrogen for Resistive Superconducting Fault Current Limiters“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 34, Nr. 3, S. 1–6, 2024, DOI: [10.1109/TASC.2024.3361872](https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3361872)
- [104] T. Kreuz, *HV-LN2-Bushing: Projektabschlussbericht: Fördervorhaben Progres.nrw-Research*. 2023.
- [105] D. Gromoll, R. Schumacher und C. Humpert, „Dielectric strength of insulating material in LN 2 with thermally induced bubbles“, *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 1559, Nr. 1, S. 012 087, 2020, DOI: [10.1088/1742-6596/1559/1/012087](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1559/1/012087)
- [106] A. Schmid, J.-H. Bitter und C. Humpert, „Influence of Tape Insulation on the AC Electrical Strength of Parallel-Cylindrical Conductors in Liquid Nitrogen“, in *2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*, IEEE, 2024, S. 1–5, ISBN: 979-8-3503-7498-8. DOI: [10.1109/ICHVE61955.2024.10676229](https://doi.org/10.1109/ICHVE61955.2024.10676229)
- [107] S-Polytec, *Materialdatenblatt PTFE*, S-Polytec, Hrsg. Adresse: <https://www.s-polytec.de/media/attachment/file/s/-/s-polytec-datenblatt-ptfe.pdf>
- [108] S-Polytec, *Materialdatenblatt PP*, S-Polytec, Hrsg. Adresse: https://www.s-polytec.de/media/attachment/file/d/a/data_sheet_pp-sheets.pdf
- [109] S-Polytec, *Materialdatenblatt PE*, S-Polytec, Hrsg. Adresse: https://www.s-polytec.de/media/attachment/file/d/a/data_sheet_pe-hd-sheets.pdf
- [110] Plast-X 24, *Materialdatenblatt POM-C*, Plast-X 24, Hrsg. Adresse: https://www.plastx24.de/shop/images/products/media/datenblatt_pom-c_natur.pdf?_gl=1_*eegznn*_up*_MQ_*_ga_*MTQxNTMyNTU4MC4xNzQyMjkwODk3*_ga_*B2Q31H85PR_*MTc0Mjl5MDg5Ni4xLjAuMTc0Mjl5MDg5Ni4wLjAuMA..
- [111] HZ GmbH, *Materialdatenblatt Vetronite G11*, HZ GmbH, Hrsg. Adresse: <https://www.hz-gmbh.com/flashartgewebe.html#G11>
- [112] HZ GmbH, *Materialdatenblatt Vetronite EGS 102*, HZ GmbH, Hrsg. Adresse: <https://www.hz-gmbh.com/flashartgewebe.html#EGS102>
- [113] DKE, *DIN EN IEC 62631-2-1:2018-12 - Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Elektroisierstoffe: Teil 2-1: Relative Permittivität und Verlustfaktor - Technische Frequenzen (0,1 Hz bis 10 MHz) – Wechselspannungsfahren (IEC 62631-2-1:2018); Deutsche Fassung EN IEC 62631-2-1:2018*, 12.2018. Adresse: <https://www.dke.de/normen-standards/dokument?id=7114038&type=dke%7Cdokument>
- [114] A. Schmid und C. Humpert, „Influence of Support Insulators on the AC Electrical Strength of Parallel-Cylindrical Conductors in Liquid Nitrogen“, in *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)*, IEEE, 2024, S. 1–5, ISBN: 979-8-3503-0897-6. DOI: [10.1109/ICD59037.2024.10613137](https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613137)
- [115] S. Tenbohlen und M. Kurrat, Hrsg., *VDE Hochspannungstechnik 2024: 5. ETG-Fachtagung 11.-13. November 2024 in Berlin (ETG-Fachbericht)*. Berlin und Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2024, Bd. 175, CD-ROM, ISBN: 978-3-8007-6466-2.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Modell eines möglichen LN ₂ -isolierten dreiphasigen supraleitenden Hochspannungskabelsystems. [11].....	3
Abbildung 1.2:	Modell einer möglichen feldstärkeoptimierten dreiphasigen Stützisolators. [11]	3
Abbildung 2.1:	Schematischer Aufbau eines REBCO-Bandleiters. Maßstab X / Z-Achse: 1:1; Y-Achse: 100:1. (modifiziert nach [19]).....	8
Abbildung 2.2:	Exemplarische Darstellung von PPLP als idealisierte umwickelte Isolierung eines Phasenleiters (links) und vom Lagenaufbau von PPLP (rechts). (modifiziert nach [22]).....	9
Abbildung 2.3:	Exemplarische Darstellung der drei unterschiedlichen Kabelaufbauten. (modifiziert nach [29])	10
Abbildung 2.4:	Häufig verwendete Bauformen von Zylinderisolatoren in gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen: (a) Scheibenisolator einphasig, (b) Scheibenisolator dreiphasig und (c) Konusisolator einphasig gasdurchlässig. (modifiziert nach [59])	15
Abbildung 2.5:	Äquipotentialverlauf in konzentrischen Leiteranordnungen. Links: Scheibenisolator (Abb. 2.4 (a, b)); rechts: Konusisolator (Abb. 2.4 (c)). (modifiziert nach [62])	16
Abbildung 2.6:	Modell eines Einfach-Stützisolators zum Einschrauben in den Innenleiter (links) und eines Dreifach-Stützisolators zur Zwischenmontage (rechts). (modifiziert nach [59] und [63]) ...	17
Abbildung 2.7:	Darstellung der auftretenden Spannungsbeanspruchungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Dreiphasensystem.....	17
Abbildung 2.8:	Darstellung zur Erklärung des Unterschiedes einer exzentrischen und einer konzentrischen Leiteranordnung.....	18
Abbildung 2.9:	Darstellung einer parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	19
Abbildung 2.10:	Elektrischen Festigkeit von LN ₂ (ca. 1 bar, 77 K) im Vergleich zu anderen bekannten elektrischen Isoliermedien unter homogener Gleichspannungsbeanspruchung ($\eta = 1$). (modifiziert nach [12])	22
Abbildung 2.11:	Auszug elektrischer Durchschlagsspannungen von LN ₂ in Abhängigkeit vom Abstand α . (modifiziert nach [73])	23
Abbildung 2.12:	Elektrische Festigkeit von LN ₂ in Abhängigkeit vom entscheidend belasteten Isoliervolumen $\alpha\%SLV$. (modifiziert nach [76]).	24
Abbildung 2.13:	Qualitative Veranschaulichung des entscheidenden belasteten Isoliervolumens $\alpha\%SLV$ in einer parallel-zylindrischen Leiteranordnung in Abhängigkeit des entscheidenden Faktors α . (modifiziert nach [76]).....	25
Abbildung 2.14:	Verlauf des entscheidenden Faktors α in Abhängigkeit des absoluten Drucks p_{abs} . (modifiziert nach [76])	25
Abbildung 2.15:	Verlauf des entscheidenden Faktors α in Abhängigkeit der Temperatur T . (modifiziert nach [76])	25
Abbildung 2.16:	Elektrische Festigkeit von LN ₂ in Abhängigkeit der entscheidend belasteten Fläche $\alpha\%SEA$. (modifiziert nach [81])	26
Abbildung 2.17:	Schematische Darstellung der elektrischen Felder in geschichteten Dielektrika. Links: Quer geschichtet. Mitte: Längs geschichtet. Rechts: Schräg geschichtet. (modifiziert nach [13])	27
Abbildung 2.18:	Schematische Darstellung einer unsymmetrischen ebenen Dreieck-Platte Elektrodenanordnung.	30
Abbildung 2.19:	Vergleich der mittleren effektiven Überschlagsspannung $\bar{U}_{\dot{U},Eff}$ von Isolieröl und LN ₂ in Abhängigkeit vom Überschlagabstand α . (modifiziert nach [83])	30
Abbildung 2.20:	Vergleich von positiver LI- und AC-Überschlagsspannung, bei einer Überschlagwahrscheinlichkeit von 0,1 %, von GFK-Isoliermaterial in LN ₂ . (modifiziert nach [84]).....	31
Abbildung 2.21:	Darstellung der polaritätsabhängigen Blitzstoßüberschlagsspannung $\hat{U}_{\dot{U},50\%}$, bei einer Überschlagwahrscheinlichkeit von 50 %, von PA6- und PTFE-Isoliermaterial in LN ₂ . (modifiziert nach [85])	31
Abbildung 2.22:	Schematische Darstellung der einfachen zylindrischen Stützermodelle ohne und mit Schirmprofilen. (modifiziert nach [86])	32

Abbildung 2.23:	Untersuchung des Einflusses von Schirmprofilen auf das Überschlagverhalten von Stützermodellen. Typ 1 bis 4: Gleiche Gesamthöhe. Typ 4 und Typ A bis C: Gleiche Überschlagstrecke. (modifiziert nach [86]).....	32
Abbildung 2.24:	Relative elektrische Feldstärkeerhöhung in Abhängigkeit des Neigungswinkels α und der relativen Permittivität ϵ_r . (modifiziert nach [87]).....	33
Abbildung 2.25:	Überschlagverhalten in LN_2 an Gleitanordnungen in Abhängigkeit des Überschlagabstandes. (modifiziert nach [88]).....	33
Abbildung 2.26:	Darstellung des Entstehungsprozesses einer Oberflächenentladung am Beispiel eines ungesteuerten koaxialen Kabelendes (oben) sowie Herleitung einer Elektrodenanordnung zur experimentellen Nachstellung dieser Gleitanordnung (unten). (modifiziert nach [89])	34
Abbildung 2.27:	Spuren von Oberflächenentladungsprozessen auf der Oberfläche einer Polyimidfolie. [90]	34
Abbildung 3.1:	Herleitung der parallel-zylindrischen Leiteranordnung für einphasige experimentelle Untersuchungen.....	37
Abbildung 3.2:	Herleitung der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung für einphasige experimentelle Untersuchungen.....	37
Abbildung 3.3:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit der parallel-zylindrischen Leiteranordnung (A) und der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung (B) für die Durch- und Überschlagversuche bei Wechselspannung.	40
Abbildung 3.4:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit der parallel-zylindrischen Leiteranordnung (A) und der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung (B) für die Durchschlagversuche bei Blitzstoßspannung.	42
Abbildung 3.5:	Abbrandspuren auf der Oberfläche einer 30 mm Leiterelektrode nach Entladungsuntersuchungen in LN_2	43
Abbildung 3.6:	Exemplarische Darstellung der gemessenen Profilwerte der fünf Rauheitsparameter in Abhängigkeit des iterativen Schleif- und Polierprozesses an einer 30 mm Leiterelektrode.	45
Abbildung 3.7:	Visuelle Darstellung der Oberflächen in verschiedenen optischen Vergrößerungen sowie in Abhängigkeit des iterativen Schleif- und Polierprozesses.....	45
Abbildung 3.8:	Innenansicht einer geerdeten Rohrelektrode mit konzentrischer 8 mm-Leiterelektrode. ..	46
Abbildung 3.9:	CAD-Modell des parallel-zylindrischen Versuchsaufbaus für einphasige empirische Untersuchungen.	47
Abbildung 3.10:	Verläufe des Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktors η parallel-zylindrischer Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden- Durchmesser d_L .	49
Abbildung 3.11:	Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L	51
Abbildung 3.12:	Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η .	52
Abbildung 3.13:	Darstellung der berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 50\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidenden belasteten Volumen $\alpha \% SLV$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a sowie Leiterelektroden-Durchmesser d_L in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes.....	53
Abbildung 3.14:	Darstellung der berechneten maximalen Spitzendurchschlagfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 63,2\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidenden belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a sowie Leiterelektroden-Durchmesser d_L in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Flächeneffektes.	53
Abbildung 3.15:	Verläufe der maximalen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	55
Abbildung 3.16:	Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D, \max, LI} / \bar{E}_{D, \max, AC\text{-Spitze}}$ von LN_2 in parallel-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	55

Abbildung 3.17:	Anschauungsbeispiele einlagig umwickelter Leiterelektroden mit den drei verschiedenen Feststoffen. Links: PI. Mitte: PPLP. Rechts: KIP.	57
Abbildung 3.18:	Ergebnisse der mittleren effektiven Durchschlagspannung $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von feststoffumwickelten Leiterelektroden in LN ₂ , im Vergleich zur reinen effektiven mittleren Durchschlagspannung von LN ₂ , untersucht in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.....	58
Abbildung 3.19:	Ergebnisse der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ von feststoffumwickelten Leiterelektroden in LN ₂ , im Vergleich zur reinen Durchschlagfestigkeit von LN ₂ , untersucht in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	59
Abbildung 3.20:	Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	61
Abbildung 3.21:	Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlichem halbrunden Spalt für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	61
Abbildung 3.22:	Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlicher runden Taillierung für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	62
Abbildung 3.23:	Modell der geraden Überschlagproben mit geometrischen Eigenschaften und zusätzlicher eckigen Taillierung für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.	62
Abbildung 3.24:	Relative Permittivitätsverläufe der ausgewählten Materialien in Abhängigkeit der Frequenz f bei einer Temperatur T von 293,15 K in Luft.	63
Abbildung 3.25:	Relative Permittivitätsverläufe der ausgewählten Materialien in Abhängigkeit der Frequenz f bei einer Temperatur T von 77,15 K in LN ₂	64
Abbildung 3.26:	Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ (grau) von geraden Überschlagproben in LN ₂ in absteigender Sortierung, im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau). Zudem dargestellt die jeweils zugehörige relative Permittivität ϵ_r	65
Abbildung 3.27:	Exemplarische Darstellung der Materialoberflächen der geraden Überschlagproben mit deren Oberflächenentladungsspuren.	66
Abbildung 3.28:	Vergrößerte Darstellungen der geraden Überschlagproben aus GFK mit den invasivsten Oberflächenentladungsspuren.	66
Abbildung 3.29:	Darstellung der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von PE-HD Überschlagproben in LN ₂ (rot) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau) in Abhängigkeit vom Nominalabstand a	67
Abbildung 3.30:	Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von geraden Überschlagproben aus PE-HD in LN ₂ mit variablem Spaltradius (grau), im Vergleich zur geraden Überschlagproben ohne Spalt (grau) sowie zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau).	68
Abbildung 3.31:	Ergebnisse der mittleren effektiven Überschlagfeldstärke $\bar{U}_{Ü, \text{Eff}}$ von geraden Überschlagproben aus PE-HD in LN ₂ mit verschiedenen Taillierungen (grau), im Vergleich zur geraden Überschlagprobe ohne Taillierung (grau) sowie zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau).	69
Abbildung 3.32:	FEM-Berechnungsergebnis der elektrischen Feldverteilung ohne Überschlagprobe (oben) und mit eckig taillierter Überschlagprobe (unten) in LN ₂	69
Abbildung 3.33:	CAD-Modell des zentrisch-zylindrischen Versuchsaufbaus für einphasige empirische Untersuchungen.	70
Abbildung 3.34:	Verläufe des Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktors η zentrisch-zylindrischer Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	73
Abbildung 3.35:	Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ von LN ₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	73
Abbildung 3.36:	Verläufe der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}}$ von LN ₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor η	74

Abbildung 3.37:	Darstellung der berechneten maximalen Spitzenfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 50\%}$ und numerisch ermittelten entscheidend belasteten Volumen $\alpha \% SLV$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Volumeneffektes.....	75
Abbildung 3.38:	Darstellung der berechneten maximalen Spitzenfeldstärken $E_{D, \max, \text{Spitze}, 63,2\%}$ und der numerisch ermittelten entscheidend belasteten Flächen $\alpha \% SEA$ in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und dem Leiterelektroden-Durchmesser d_L in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen. Zudem der direkte Vergleich zum empirischen Formalismus des Flächeneffektes.	75
Abbildung 3.39:	Verläufe der maximalen positiven Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max, \text{pos}}$ von LN ₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	76
Abbildung 3.40:	Verläufe der maximalen negativen Blitzstoßdurchschlagfeldstärke $\hat{E}_{D, \max, \text{neg}}$ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	76
Abbildung 3.41:	Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D, \max, \text{pos, LI}} / \bar{E}_{D, \max, \text{AC-Spitze}}$ von LN ₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	77
Abbildung 3.42:	Verläufe der Verhältnisse aus $\hat{E}_{D, \max, \text{neg, LI}} / \bar{E}_{D, \max, \text{AC-Spitze}}$ von LN ₂ in zentrisch-zylindrischen Leiteranordnungen in Abhängigkeit vom Abstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L	78
Abbildung 3.43:	Modell der geraden Überslagproben mit geometrischen Eigenschaften für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.....	80
Abbildung 3.44:	Modell der geneigten Überslagproben mit geometrischen Eigenschaften und Neigungswinkel für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.	80
Abbildung 3.45:	Darstellung der mittleren effektiven Überslagfeldstärke $\bar{U}_{U, \text{Eff}}$ von PE-HD Überslagproben in LN ₂ (rot) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau) in Abhängigkeit vom Nominalabstand a	80
Abbildung 3.46:	Darstellung der mittleren effektiven Überslagfeldstärke $\bar{E}_{U, \text{Eff}}$ von PE-HD Stützerproben in LN ₂ mit verschiedenen Neigungswinkeln (rot & grün) im Vergleich zur mittleren effektiven Durchschlagfeldstärke $\bar{E}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (blau) und in Abhängigkeit vom Nominalabstand a	81
Abbildung 4.1:	Ablaufdiagramm zur grundsätzlichen Darstellung des Python-Programms zur Ermittlung der entscheidend belasteten Fläche $\alpha \% SEA$ und zugehöriger maximaler Spitzendurchschlagfeldstärke $E_{D, \max, \text{Spitze}, 99\%}$	86
Abbildung 4.2:	Exemplarische Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in FEMM zur Ermittlung der optimalen geometrischen dreiphasigen Leiteranordnung in Abhängigkeit des Flächeneffektes.....	88
Abbildung 4.3:	Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in FEMM zur Auslegung der Traghülsen eines Stützisulators mit der Hülsenwandstärke s_H von 5 mm.....	90
Abbildung 4.4:	Maximale Spitzenfeldstärken in Abhängigkeit der variierenden Hülsenwandstärke s_H	91
Abbildung 4.5:	Darstellung der elektrischen Feldverteilung einer FEM-Berechnung in FEMM zur Auslegung der Abstützung eines Stützisulators mit Stegbreite b_S von 5 mm sowie Übergangsradius r_{H-A} von 6 mm.	93
Abbildung 4.6:	Darstellung der vektoriellen und oberflächlichen elektrischen 3D-Feldverteilung in LN ₂ im Bereich des Stützisulators in Ansys Maxwell.....	94
Abbildung 4.7:	Darstellung der elektrischen 3D-Feldverteilung im Stützisulator (links) sowie in LN ₂ unmittelbar vor der Oberfläche des Stützisulators (rechts) simuliert mit Ansys Maxwell. ...	94
Abbildung 4.8:	Graphische Darstellung der Designkriterien am Modell des Stützisulators.	96
Abbildung 5.1:	Darstellung des konstruierten Gesamtversuchsaufbaus der Hauptuntersuchung als CAD-Modell (links) und der drei dreiphasigen Leiteranordnungen (rechts).	98
Abbildung 5.2:	LN ₂ -Badkryostat und Hochspannungsdurchführung.	100

Abbildung 5.3:	Verläufe der mittleren effektiven Durchschlagschlagspannungen $\bar{U}_{D, \text{Eff}}$ von LN ₂ (rot & grün) und Überschlagschlagspannung $\hat{U}_{\bar{U}, \text{Eff}}$ vom Stützisolator in LN ₂ (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel}	102
Abbildung 5.4:	Verläufe der positiven Blitzstoßdurchschlagschlagspannungen $\hat{U}_{D, \text{pos}}$ in LN ₂ (rot & grün) und Blitzstoßüberschlagschlagspannung $\hat{U}_{\bar{U}, \text{pos}}$ vom Stützisolator in LN ₂ (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel}	104
Abbildung 5.5:	Verläufe der negativen Blitzstoßdurchschlagschlagspannungen $\hat{U}_{D, \text{neg}}$ in LN ₂ (rot & grün) und Blitzstoßüberschlagschlagspannung $\hat{U}_{\bar{U}, \text{neg}}$ vom Stützisolator in LN ₂ (blau) in Abhängigkeit vom relativen Druck p_{rel}	104
Abbildung 5.6:	Fotografische Aufnahme des zerstörten Stützisolators nach den experimentellen Untersuchungen unter Wechsel- und Blitzstoßspannungsbeanspruchung.	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auflistung wichtiger Projekte und Forschungsvorhaben supraleitender Hochspannungskabelsysteme für DC- und AC-Anwendungen.* bedeutet, dass die Länge noch nicht bekannt ist. [16] [32] [33].....	12
Tabelle 2.2:	Auszug geläufiger Einflussparameter auf die elektrische Festigkeit von LN ₂	21
Tabelle 3.1:	Versuchsplanung zur Darstellung der durchzuführenden Durch- und Überschlagexperimente, im Rahmen der Untersuchungen in der einphasigen parallel- und zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung in LN ₂	39
Tabelle 3.2:	Definition der Rauheitsparameter nach DIN 4768.....	44
Tabelle 3.3:	Eigenschaften der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.....	48
Tabelle 3.4:	Eigenschaften der dünnen Feststoffe zur Umwicklung der Leiterelektroden.....	57
Tabelle 3.5:	Relevante Eigenschaften der ausgewählten Materialtypen nach deren Materialdatenblättern. Die individuellen Bedingungen zur Ermittlung der elektrischen Festigkeiten sind den Datenblättern zu entnehmen. Die Werte wurden bei Standardbedingungen ermittelt.	61
Tabelle 3.6:	Relative Permittivität ϵ_r der ausgewählten Materialien in Luft und LN ₂ bei $f = 50$ Hz.	64
Tabelle 3.7:	Eigenschaften der Elektroden für die zentrisch-zylindrische Leiteranordnung.....	72
Tabelle 4.1:	Finale elektrische und geometrische Eigenschaften der optimalen dreiphasigen Leiteranordnung in Abhängigkeit der 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit nach dem Flächeneffekt für Flüssigstickstoff bei einer effektiven Leiter-Leiter- und Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung von 125 kV.	89
Tabelle 4.2:	Resultierende elektrische maximale Spitzenfeldstärken $E_{\max, Spitze}$ in Abhängigkeit der Hülsenwandstärke s_H von 5 mm.....	92
Tabelle 5.1:	Versuchsplanung zur Darstellung der durchzuführenden Durch- und Überschlagexperimente, im Rahmen der Untersuchungen der drei dreiphasigen zylindrischen Leiteranordnungen und des Stützisolators bis 4 bar _{rel} in LN ₂	101

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AC	Alternating Current; z. Dt.: Wechselstrom
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAD	Computer-Aided Design; z. Dt.: Rechnergestütztes Konstruieren
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CNC	Computerized Numerical Control; z. Dt.: Rechnergestützte numerische Steuerung
CORC	Cable on Round Core; z. Dt.: Kabel auf rundem Kern
CORT	Cable on Round Tube; z. Dt.: Kabel auf rundem Rohr
CroCo	Cross Conductor; z. Dt.: Kreuzleiter
DC	Direct Current
DS	Durchschlag
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity; z. Dt.: Verband europäischer Übertragungsnetzbetreiber
EPP	Expandiertes Polypropylen
FEM	Finite Elemente Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GIL	Gasisolierte Leitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
He	Helium
HGÜ	Hochgleichspannungsübertragung
HTS	High Temperature Superconductor; z. Dt.: Hochtemperatursupraleiter
KIP	Kraftisolierpapier
LA	Leiteranordnung
LH ₂	Liquid Hydrogen; z. Dt.: Flüssigwasserstoff
LI	Lightning Impulse; z. Dt.: Blitzstoß
LN ₂	Liquid Nitrogen; z. Dt.: Flüssigstickstoff
LTS	Low Temperature Superconductor; z. Dt.: Tieftemperatur-supraleiter
MGB ₂	Magnesiumdiborid
MR	Median Rang
N ₂	Stickstoff (gasförmig)
PA6	Polyamid 6
PE	Polyethylen
PE-HD	High Density Polyethylen; z. Dt.: Hochdichtes Polyethylen
PI	Polyimid
POM-C	Polyoxymethylen-Copolymer
PP	Polypropylen
PPLP	Polypropylen laminiertes Papier
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PZL	Parallel-zylindrische Leiteranordnung

REBCO	Rare Earth Barium Copper Oxide; z. Dt.: Seltenerd-Barium-Kupfer-Oxid
RIP	Resin Impregnated Paper; z. Dt.: Harz imprägniertes Papier
SEA	Stressed Electrode Area; z. Dt.: Belastete Elektrodenoberfläche
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SG	Spannungsgruppe
SLV	Stressed Liquid Volume; z. Dt.: Belastetes Volumen
TE	Teilentladung
TRL	Technical Readiness Level; z. Dt.: Technologischer Reifegrad
ÜS	Überschlag
VNB	Verteilnetzbetreiber
VPE	Vernetztes Polyethylen
ZZL	Zentrisch-zylindrische Leiteranordnung

Symbolverzeichnis

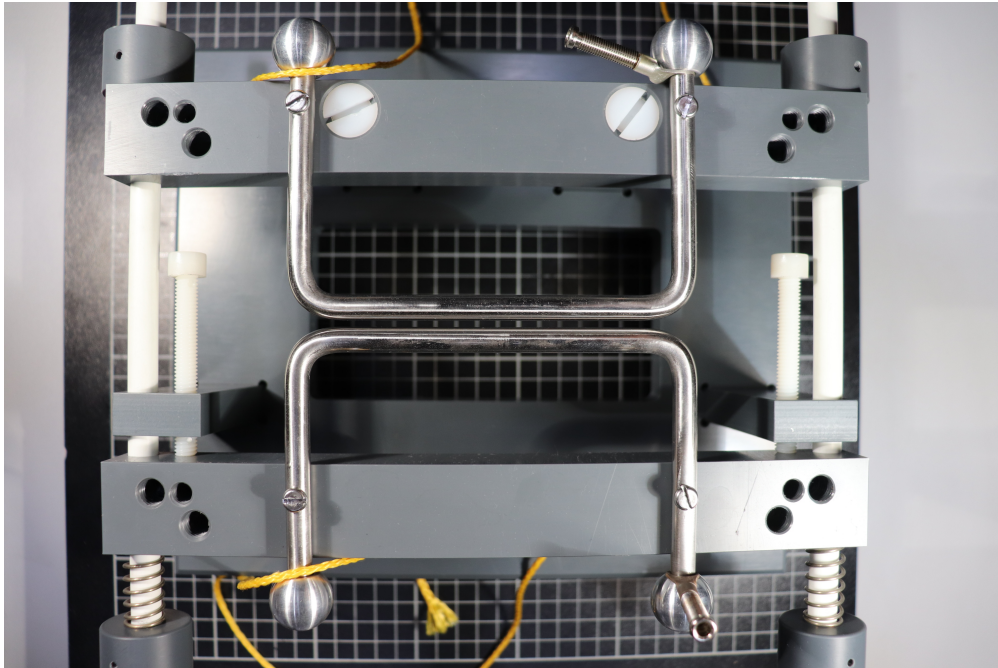
a	Abstand / Nominalabstand
a_m	Leitermittenabstand
a_{LL}	Nominalabstand Leiter-Leiter
a_{LE}	Nominalabstand Leiter-Erde
\vec{A}	Vektor der Fläche
α	Winkel / Neigungswinkel
α	Entscheidender Faktor
$\alpha \% SEA$	Entscheidend belastete Leiteroberfläche
$\alpha \% SLV$	Entscheidend belastetes Isoliervolumen
$\alpha \% SEA_{LE}$	Entscheidend belastete Fläche bei Leiter-Erd-Spannungsbeanspruchung
$\alpha \% SEA_{LL}$	Entscheidend belastete Fläche bei Leiter-Leiter-Spannungsbeanspruchung
b	Strecke
b_s	Stegbreite
C_n	Kapazität
d	Durchmesser
d_L	Leiterelektroden-Durchmesser
\vec{D}	Vektor der dielektrischen Verschiebungsdichte
D_n	Normalkomponente der dielektrischen Verschiebungsdichte
D_t	Tangentialkomponente der dielektrischen Verschiebungsdichte
D	Diode
e	Eulersche Zahl
ϵ_r	Relative Permittivität
\vec{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke
E_n	Normalkomponente der elektrischen Feldstärke
E_t	Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke
E_{Kon}	Elektrische Feldstärke in einer konzentrischen Leiteranordnung
$E_{Kon, max, min}$	Minimal mögliche maximale elektrische Feldstärke in einer konzentrischen Leiteranordnung
E_{Ex}	Maximale Feldstärke in einer exzentrischen Leiteranordnung
E_{Mittel}	Mittlere elektrische Feldstärke in einer Anordnung (U/a)
E_{max}	Maximale elektrische Feldstärke
$E_{D, Spitze}$	Spitzendurchschlagfeldstärke
$E_{D, max, Spitze, 50 \%}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 50 % Durchschlagwahrscheinlichkeit
$E_{D, max, Spitze, 63,2 \%}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 63,2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit
\hat{E}_D	Mittlere Blitzstoßdurchschlagfeldstärke
$\hat{E}_{D, max}$	Maximale Blitzstoßdurchschlagfeldstärke
$\hat{E}_{D, max, LI}$	Maximale Blitzstoßdurchschlagfeldstärke
$\bar{E}_{D, max, AC-Spitze}$	Mittelwert der maximalen AC-Spitzendurchschlagfeldstärke

$\hat{E}_{D, \max, \text{pos}}$	Maximale positive Blitzstoßdurchschlagfeldstärke
$\hat{E}_{D, \max, \text{neg}}$	Maximale negative Blitzstoßdurchschlagfeldstärke
$\bar{E}_{D, \text{Eff}}$	Mittlere effektive Durchschlagfeldstärke
$\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$	Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke
$\bar{E}_{D, \text{Spitze}}$	Mittelwert der mittleren Spitzendurchschlagfeldstärke
$\bar{E}_{\text{Ü, Eff}}$	Mittlere effektive Überschlagfeldstärke
$\bar{E}_{\text{Ü, max, Spitze}}$	Mittelwert der maximalen Spitzenüberschlagfeldstärke
$\bar{E}_{D, \max, \text{Spitze}}$	Mittelwert der maximalen Spitzendurchschlagfeldstärke
$E_{\text{Spitze, Lokal}}$	Lokale Spitzenfeldstärke
$E_{\max, \text{Spitze}}$	Maximale Spitzenfeldstärke
$E_{D \max, \text{Spitze, 63,2 \% LE}}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 63,2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit Leiter-Erde
$E_{D \max, \text{Spitze, 99 \% LE}}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit Leiter-Erde
$E_{\max, \text{Spitze, LE}}$	Maximale Spitzenfeldstärke Leiter-Erde
$E_{D \max, \text{Spitze, 63,2 \% LL}}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 63,2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit Leiter-Leiter
$E_{D \max, \text{Spitze, 99 \% LL}}$	Maximale Spitzendurchschlagfeldstärke bei 99 % Durchschlagwahrscheinlichkeit Leiter-Leiter
$E_{\max, \text{Spitze, LL}}$	Maximale Spitzenfeldstärke Leiter-Leiter
f	Frequenz
F	Wahrscheinlichkeit
I	Strom
K	Proportionalitätsfaktor
k	Formparameter
L	Länge
λ	Skalierungsfaktor
MR	Median Rang
N	Gesamtanzahl
η	Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger
p_{abs}	Absoluter Druck
p_{rel}	Relativer Druck
r	Radius
r_0	Innenleiterradius einer konzentrischen Leiteranordnung
r_1	Außenleiterradius einer konzentrischen Leiteranordnung
$r_{\text{H-A}}$	Übergangsradius
r_{Kryo}	Kryostatradius
R_a	Arithmetische Mittenrauhwert
R_{\max}	Größte Profildifferenz
R_{3z}	Mittlere Grundrauhentiefe
R_{3zm}	Größte Grundrauhentiefe
R_p	Größte ermittelte Profilspitze
R	Profilwert
R_O	Oberflächenwiderstand
R_v	Verrundungsradius
R_{vi}	Innerer Verrundungsradius
R_{va}	Äußerer Verrundungsradius
R_s	Spaltradius
R_T	Taillierungsradius

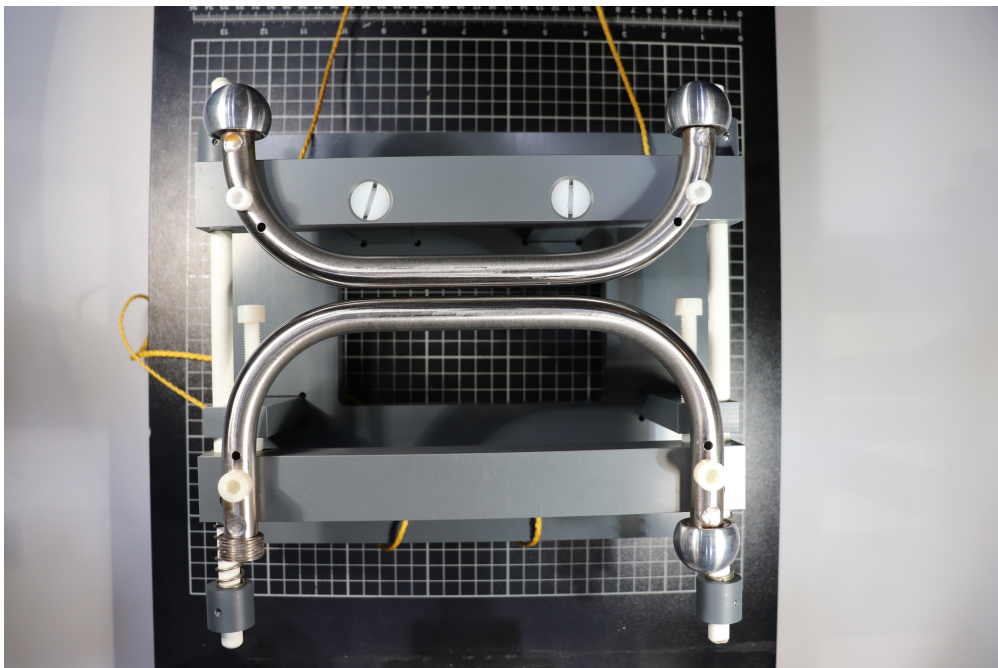
R_S	Schutzwiderstand
R_D	Dämpfungswiderstand
R_L	Lastwiderstand
R_e	Entladewiderstand
σ	Standardabweichung
s	Materialstärke
s_B	Stegbreite
s_H	Hülsenwandstärke
t	Zeit
T	Temperatur
$\tan \delta$	Verlustfaktor
T_{rn}	Transformator
T_1	Stirnzeit
T_2	Rückenhalbwertszeit
U	Spannung oder Potentialdifferenz
U_m	Höchste effektive Übertragungswechselspannung höchste effektive Betriebsmittelspannung
U_{Ln}	Leiter-Erd-Spannung
U_{Lnm}	Verkettete Leiter-Leiter-Spannung
U_D	Durchschlagspannung
$U_{D, Spitze}$	Spitzendurchschlagspannung
$U_{\bar{U}}$	Mittlere Überschlagspannung
$\bar{U}_{\bar{U}, Eff}$	Mittlere effektive Überschlagspannung
$\bar{U}_{\bar{U}, 0,1 \%}$	Mittlere Überschlagspannung bei 0,1 % Überschlagwahrscheinlichkeit
$ \hat{U}_{\bar{U}, 50 \%} $	Absolute Blitzstoßüberschlagspannung bei 50 % Überschlagwahrscheinlichkeit
$U_{TE, Ein}$	Teilentladungseinsatzspannung
u_a	Spannungsbedarf in Abhängigkeit vom Überschlagabstand a
\hat{U}_D	Blitzstoßdurchschlagspannung
$\hat{U}_{\bar{U}}$	Blitzstoßüberschlagspannung
$\hat{U}_{\bar{U}, pos}$	Positive Blitzstoßüberschlagspannung
$\hat{U}_{\bar{U}, neg}$	Negative Blitzstoßüberschlagspannung
U_{Mess}	Messspannung
$\bar{U}_{D, Eff}$	Mittlere effektive Durchschlagspannung
$\bar{U}_{\bar{U}, Eff}$	Mittlere effektive Überschlagspannung
x	Wegstrecke

Anhang A

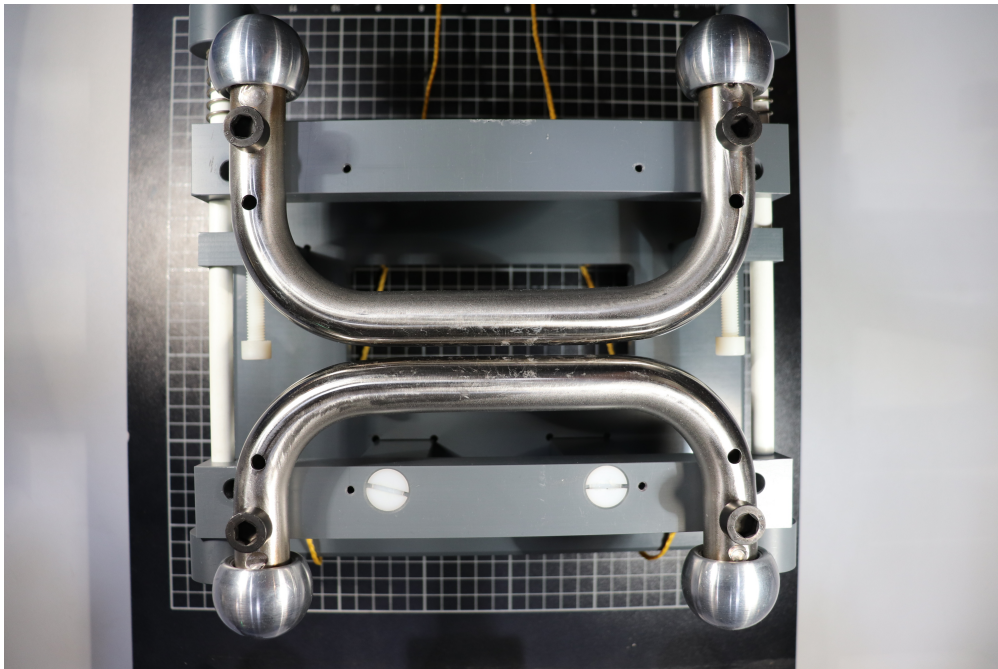
A.1 Bilder zur parallel-zylindrischen Leiteranordnung



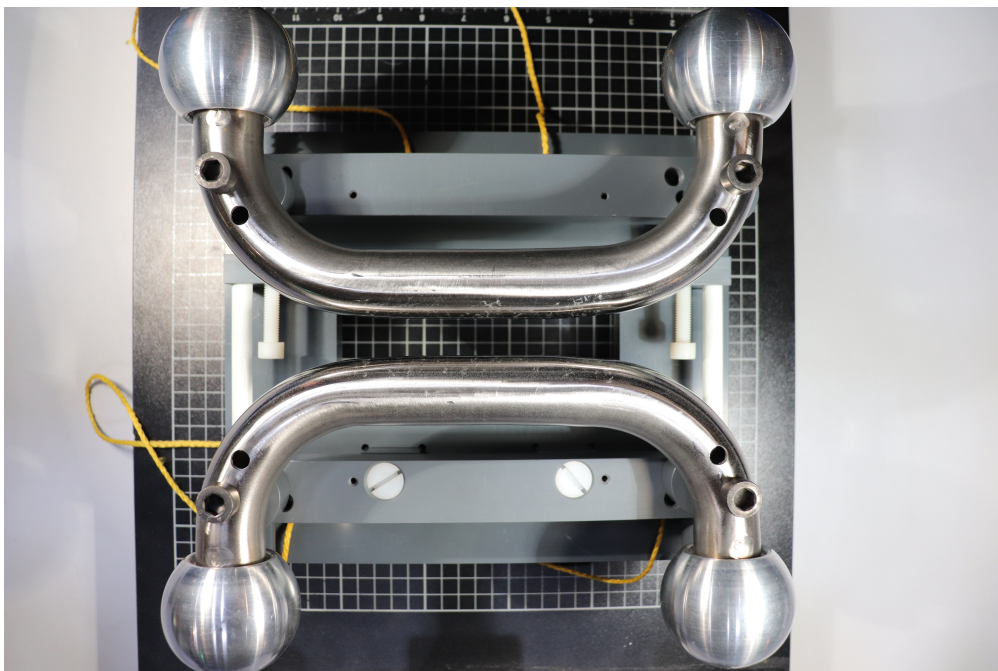
Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 8$ mm.



Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 15$ mm.

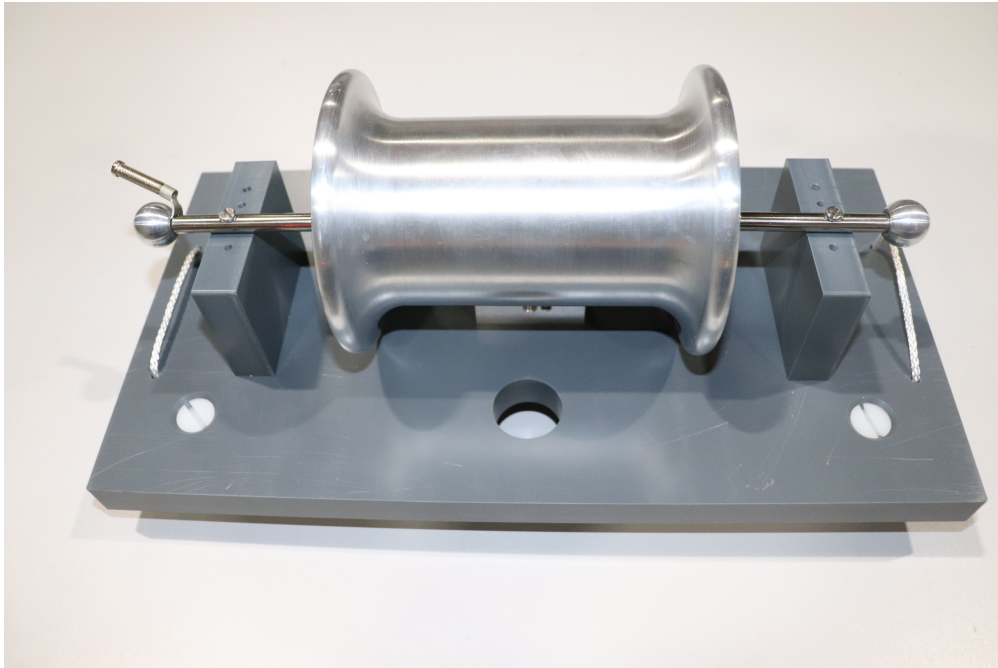


Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 22$ mm.

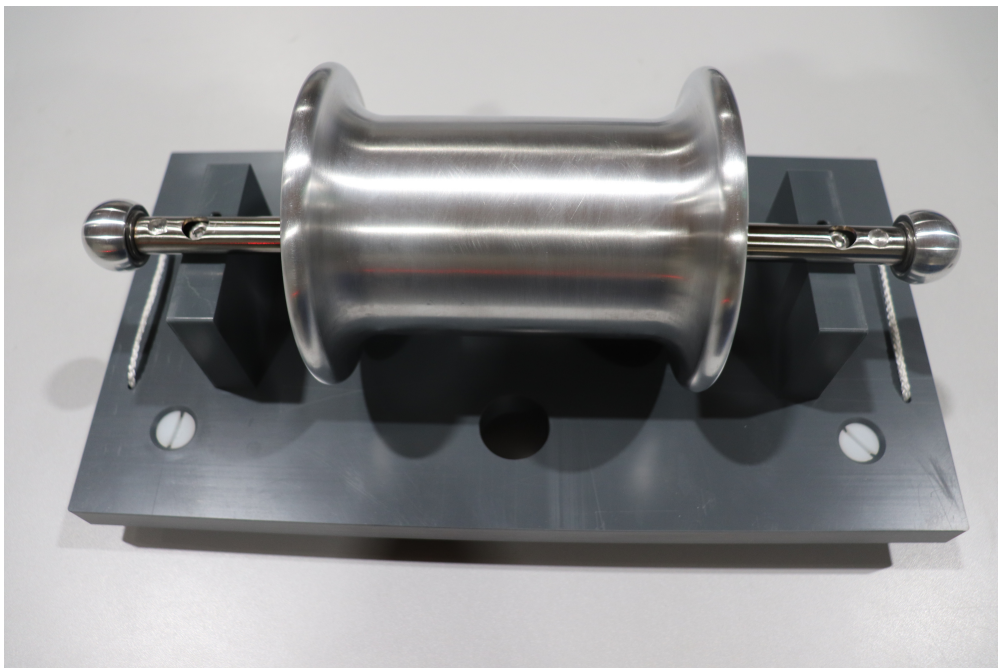


Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 30$ mm.

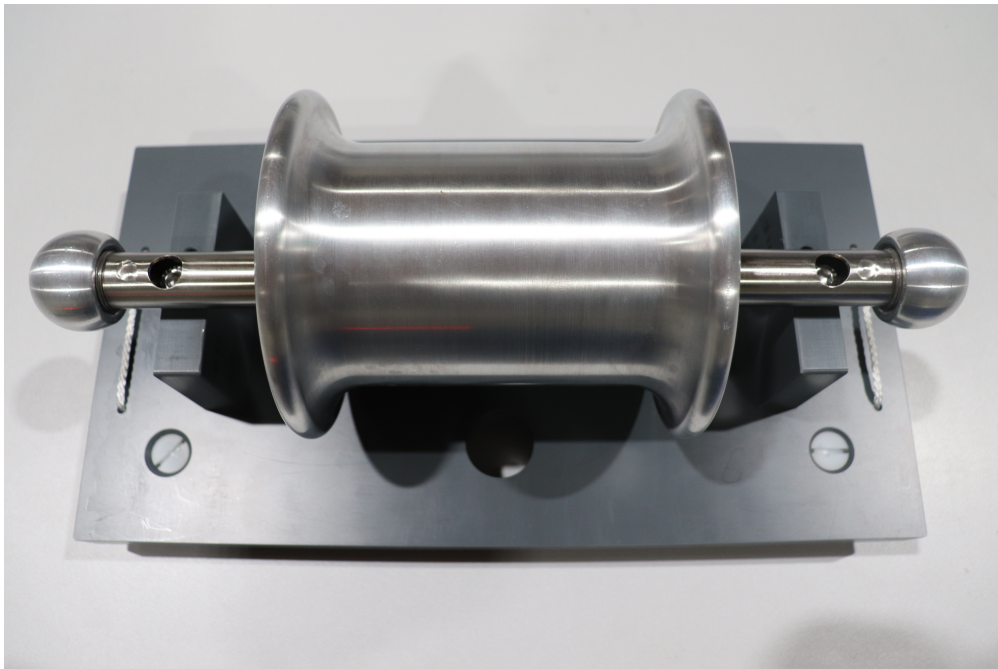
A.2 Bilder zur zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung



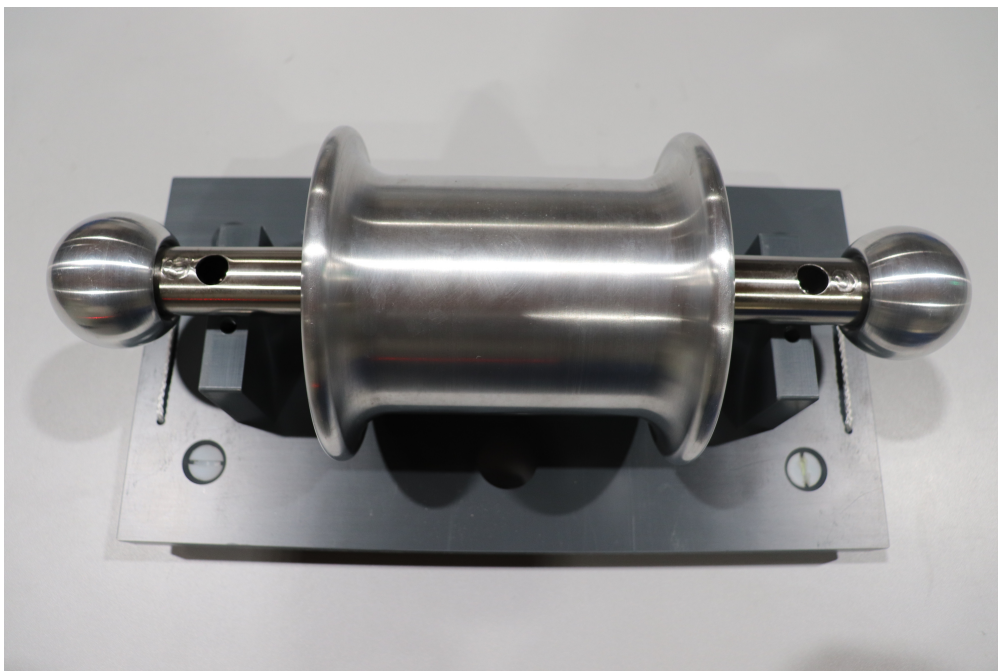
Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 8$ mm.



Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 15$ mm.



Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 22$ mm.



Leiterelektroden-Durchmesser $d_L = 30$ mm.

A.3 Bilder zu feststoffumwickelten Leiterelektroden



22 mm Leiterelektrode mit Polyimid (PI) umwickelt.



22 mm Leiterelektrode mit Polypropylen laminiertem Papier (PPLP) umwickelt.



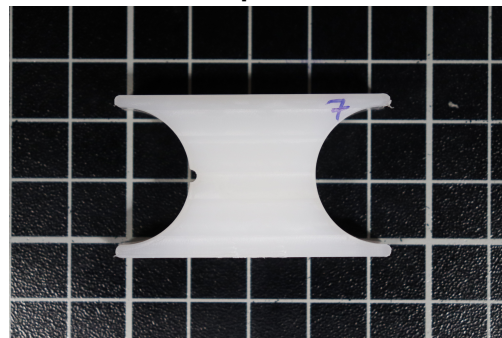
22 mm Leiterelektrode mit Kraftisolierpapier (KIP) umwickelt.

A.4 Bilder zu den Überschlagproben

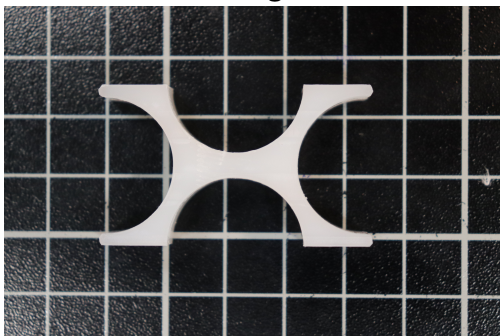
Gerade



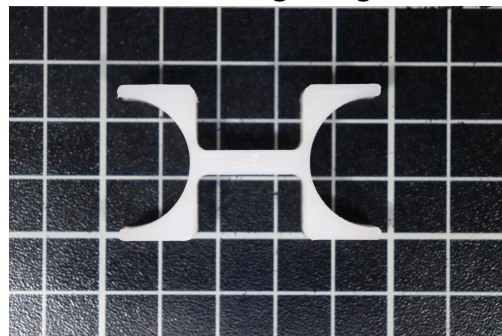
Spalt



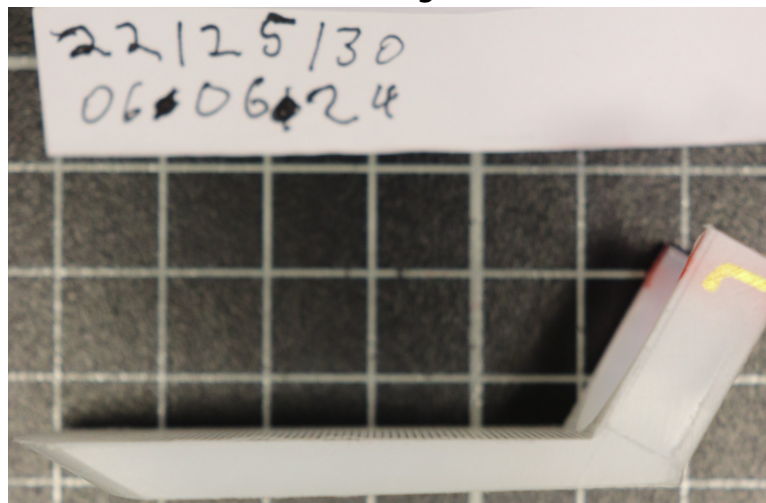
Taillierung-Rund



Taillierung-Eckig



Geneigt



A.5 Fertigungsgenauigkeit der Überschlagproben

Fertigungsgenauigkeiten der Überschlagproben hergestellt aus verschiedenen Materialien.

Material	Nominalabstand a in mm	Mittlerer Istabstand \bar{a} in mm	Standardabweichung σ in mm
PTFE	20	20,08	$\pm 0,02$
PP-H	20	20,09	$\pm 0,03$
PE-HD	20	20,07	$\pm 0,01$
POM-C	20	20,09	$\pm 0,03$
Vetronite G11	20	20,10	$\pm 0,04$
Vetronite EGS102	20	20,08	$\pm 0,02$

Fertigungsgenauigkeiten der einfachen geraden Überschlagproben aus PE-HD für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Material	Nominalabstand a in mm	Mittlerer Istabstand \bar{a} in mm	Standardabweichung σ in mm
PE-HD	5	5,08	$\pm 0,01$
	10	10,09	$\pm 0,01$
	20	20,07	$\pm 0,01$

Fertigungsgenauigkeiten der geraden Überschlagproben mit Taillierungen aus PE-HD für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Material	Nominalabstand a in mm	Mittlerer Istabstand \bar{a} in mm	Standardabweichung σ in mm
PE-HD - Rund	20	20,07	$\pm 0,01$
PE-HD - Eckig	20	20,08	$\pm 0,02$

Fertigungsgenauigkeiten gerader Überschlagproben mit Spalten aus PE-HD für Untersuchungen in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung.

Material	Verkürzter Nominalabstand $a - R_s$ in mm	Mittlerer verkürzter Istabstand $\bar{a} - R_s$ in mm	Standard- abweichung σ in mm
PE-HD	18,5	18,54	$\pm 0,03$
	19,0	19,06	$\pm 0,03$

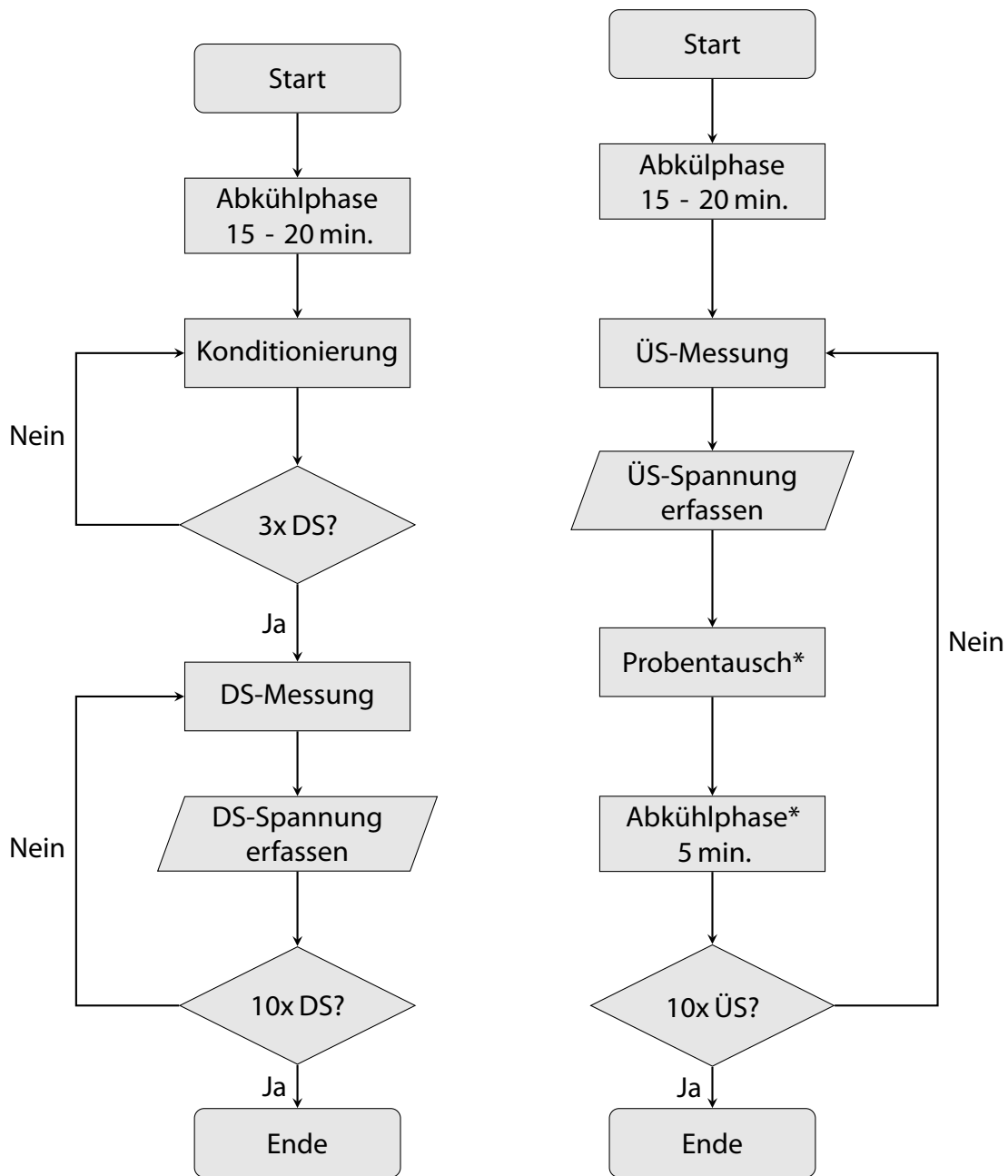
Fertigungsgenauigkeiten der einfachen geraden Überschlagproben aus PE-HD für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.

Material	Nominalabstand a in mm	Mittlerer Istabstand \bar{a} in mm	Standardabweichung σ in mm
PE-HD	5	5,06	$\pm 0,03$
	10	10,05	$\pm 0,01$
	15	15,07	$\pm 0,02$
	20	20,05	$\pm 0,04$
	25	25,07	$\pm 0,01$

Fertigungsgenauigkeiten der geneigten Überschlagproben aus PE-HD für Untersuchungen in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung.

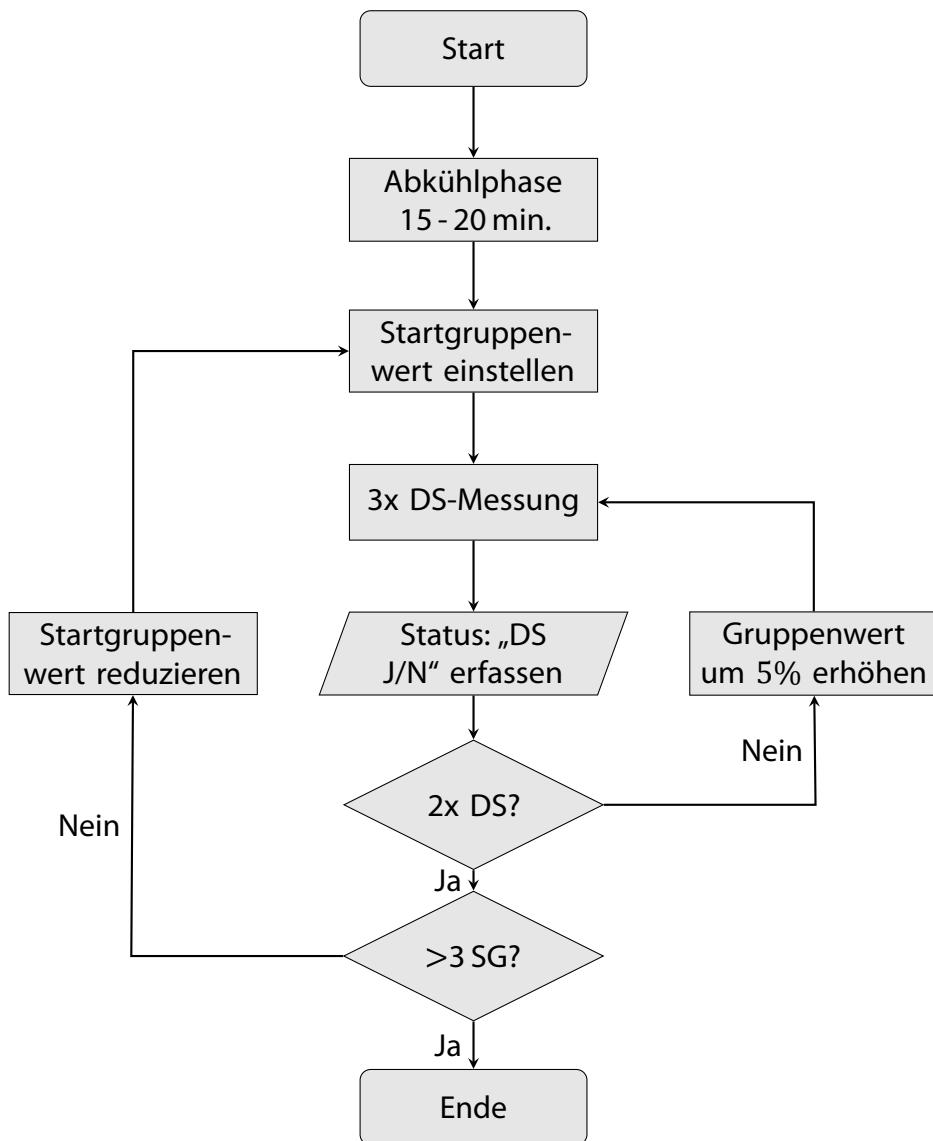
Material	Neigungswinkel α	Nominalabstand a in mm	Mittlerer Istabstand \bar{a} in mm	Standard- abweichung σ in mm
PE-HD	30°	5	5,07	0,26
		15	15,05	0,01
		25	25,20	0,06
	60°	5	5,43	0,20
		15	15,41	0,08
		25	25,14	0,06

A.6 Ablaufdiagramm zur Wechselspannungsmessung



Messprozedur der Durchschlagversuche (links) und Überslagversuche (rechts) unter Wechselspannungsbeanspruchung. Die *-gekennzeichneten Prozessschritte finden nur für die parallel-zylindrische Leiteranordnung statt.

A.7 Ablaufdiagramm zur Blitzstoßspannungsmessung



Messprozedur der Durchschlagversuche unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung.

Anhang B

B.1 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte PZL

Übersicht der gemessenen und berechneten Ergebnisse der elektrischen Festigkeit von LN₂ in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung unter Wechselspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

d_L in mm	a in mm	$\bar{U}_{D, \text{Eff}} \pm \sigma$ in kV	$\bar{E}_{D, \text{Eff}} \pm \sigma$ in kV/mm	$\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}} \pm \sigma$ in kV/mm
8	5	69,9	15,53	26
		$\pm 11,6$	$\pm 2,6$	± 3
	10	88,1	9,3	18
		± 10	$\pm 1,1$	$\pm 1,4$
15	15	100,4	6,9	15,2
		$\pm 6,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,7$
	20	139,4	7,2	17,4
		$\pm 12,2$	$\pm 0,6$	$\pm 1,1$
22	5	58,2	12,9	20,1
		$\pm 11,1$	$\pm 2,5$	$\pm 2,7$
	10	97,8	10,3	17,5
		± 14	$\pm 1,5$	$\pm 1,8$
30	15	127,8	8,8	16,3
		$\pm 9,1$	$\pm \pm 0,6$	$\pm 0,8$
	20	160,5	8,2	16,3
		± 7	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
30	5	71,3	15,8	23,9
		$\pm 3,4$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$
	10	109,5	11,5	18,6
		± 11	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$
30	15	127,1	8,8	15
		$\pm 17,1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,4$
	20	172,4	8,8	16
		$\pm 24,4$	$\pm 1,3$	$\pm 1,6$
30	5	65,1	14,5	21,5
		$\pm 8,2$	$\pm 1,8$	$\pm 1,9$
	10	114,3	12	18,8
		$\pm 14,2$	$\pm 1,5$	$\pm 1,7$
30	15	150	10	16,9
		± 10	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$
30	20	173,8	8,9	15,2
		$\pm 20,7$	± 1	$\pm 1,3$

B.2 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte PZL

Übersicht der gemessenen und berechneten Ergebnisse der elektrischen Festigkeit von LN₂ in der parallel-zylindrischen Leiteranordnung unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

d_L in mm	a in mm	\hat{U}_D in kV	\hat{E}_D in kV/mm	$\hat{E}_{D, \max}$ in kV/mm
8	2,5	71,1	35,6	37,8
	10	152,1	33,8	39,4
	15	262,2	27,6	37,4
	20	325,5	22,5	34,5
15	2,5	77,2	38,6	39,8
	5	157,5	35	38
	10	259,5	27,3	32,5
	15	346,6	23,9	30,8
22	2,5	77,2	38,6	39,5
	5	147	32,7	34,6
	10	291	30,6	34,7
	15	440,9	30,4	36,7
30	2,5	77,2	38,6	39,2
	5	136,5	30,3	31,6
	10	270	28,4	31,1
	15	425,3	29,3	33

B.3 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte ZZL

Übersicht der gemessenen und berechneten Ergebnisse der elektrischen Festigkeit von LN₂ in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung unter Wechselspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

d_L in mm	a in mm	$\bar{U}_{D, \text{Eff}} \pm \sigma$ in kV	$\bar{E}_{D, \text{Eff}} \pm \sigma$ in kV/mm	$\bar{E}_{D, \text{max, Spitze}} \pm \sigma$ in kV/mm
8	5	98,3	19,7	39,7
		9,2	1,9	3,7
	10	119,1	11,9	31,1
		11,9	0,5	1,3
	15	119,5	7,8	25,5
		12,7	0,9	2,7
	20	122,9	6,1	23,4
		10,6	0,5	2
	25	140,9	5,6	25,1
		11,3	0,5	2
15	5	72,8	14,6	25,7
		5,9	1,2	2,1
	10	119,8	12	25,3
		12	1,2	2,5
	15	127,8	8,5	21
		12,8	0,9	2,1
	20	148,1	7,4	20,9
		11,7	0,6	1,6
	25	165	6,6	21,2
		11,7	0,4	1,4
22	5	72,5	14,5	24,1
		5	1	1,7
	10	107,9	10,8	20,6
		12,3	1,2	2,4
	15	146	9,7	21,1
		21,5	1,5	3,2
	20	151,3	7,6	18,4
		22,6	1,1	2,8
	25	161,4	6,5	17,5
		16,5	0,7	2,8
30	5	73	14,6	23,4
		6,1	1,2	1,9
	10	108,5	10,9	19,4
		11,5	1,2	2,1
	15	143,2	9,6	19
		13,4	0,9	1,8
	20	180,8	9	19,8
		15,6	0,8	1,7
	25	173,9	6,9	16,7
		14,8	0,6	1,4

B.4 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte ZZL

Übersicht der gemessenen und berechneten Ergebnisse der elektrischen Festigkeit von LN₂ in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung unter positiver Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

DL	a	\hat{U}_D in kV	\hat{E}_D in kV/mm	$\hat{E}_{D,max}$ in kV/mm
8	5	179	34,5	49,7
	15	238	16,3	36,1
	25	239	9,6	30
15	5	135	27,1	33,6
	15	262	17,2	30
	25	251	10	22,5
22	5	158	31,2	36,7
	15	319	21,9	33
	25	304	12,2	23,2
30	5	174	34,2	38,8
	15	344	22,2	31,4
	25	330	13,1	22,3

Übersicht der gemessenen und berechneten Ergebnisse der elektrischen Festigkeit von LN₂ in der zentrisch-zylindrischen Leiteranordnung unter negativer Blitzstoßspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Nominalabstand a und Leiterelektroden-Durchmesser d_L .

DL	a	\hat{U}_D in kV	\hat{E}_D in kV/mm	$\hat{E}_{D,max}$ in kV/mm
8	5	134	26,2	37,6
	15	251	17,1	38
	25	-	-	-
15	5	150	30,3	37,5
	15	314	20,6	35,9
	25	287	11,5	25,9
22	5	152	30,1	35,4
	15	366	25,1	37,8
	25	328	13,1	24,9
30	5	175	34,5	39
	15	383	24,7	34,9
	25	376	14,9	25,2

Anhang C

C.1 Quellcode des Python-Programms

```

1 import math
2 import femm
3 import numpy as np
4 import openpyxl
5
6 femm.openfemm('bHide')
7 femm.newdocument(1)
8 femm.main_maximize()
9 femm.ei_probdef('millimeters', 'planar', 1.E-8, 1, 0.01) #
10
11 # Simulationsparameter und Variableninitialisierung
12 D_cryo_min = 140 # Eingabe minimaler
    Kryostatdurchmesser
13 D_cryo_max = 140 # Eingabe maximaler
    Kryostatdurchmesser
14 D_cryo_index = 10 # Index wie häufig der
    Kryostatdurchmesser zwischen Min und Max iteriert werden soll
15 D_cryo_it = (D_cryo_max - D_cryo_min) / D_cryo_index # Ermittlung des
    Iterationsabstandes für Radiusvariation
16 L_k = 0.5 # Kabellänge in Meter
17 p_ü = 1 # Druckfaktor, der die
    Festigkeit der Anordnung entsprechend erhöht
18 alpha = 0.82 # Alpha Faktor SEA
19
20 # Initialisierung Variablen
21 Anzahl_L1_E = 0
22 SEA_Area_L1_E = 0
23 Anzahl_L1_L = 0
24 SEA_Area_L1_L = 0
25 Anzahl_L2_E = 0
26 SEA_Area_L2_E = 0
27 Anzahl_L2_L = 0
28 SEA_Area_L2_L = 0
29 SEA_Gesamt_m_E = 0
30 SEA_Gesamt_m_L = 0
31 SEA_Gesamt_m_L_k_E = 0
32 SEA_Gesamt_m_L_k_L = 0
33 Eb_63_L = 0
34 Eb_X_L = 0
35 Eb_63_E = 0
36 Eb_X_E = 0
37 E_max = 0
38 E_max_LE = 0
39 E_max_LL = 0
40
41 # Material- und Potentialdefinition
42 femm.ei_addmaterial('LN2', 1.43, 1.43, 0)
43 femm.ei_addconductorprop('Ground', 0, 0, 1)
44 femm.ei_addconductorprop('HV1', 140000, 0, 1)
45 femm.ei_addconductorprop('HV2', 0, 0, 1)
46
47 # Beginn For-Schleife für Iteration verschiedene Kryostatdurchmesser
48 for k in range(0, D_cryo_index):
49
50     D_cryo = D_cryo_min + (k*D_cryo_it) #
51     Berechnung Kryostatdurchmesser
52     R_cryo = D_cryo / 2 #
53     Kryostatinnenradius

```

```

52     Rl_min = 10 #
Kleinster Leiterradius als Startradius
53     Rl_max = math.floor((R_cryo * ((2 * math.sqrt(3)) - 3)) - 5) #
Größter Leiterradius als Endradius (In Abhängigkeit vom Außendurchmesser
aber ohne ihn zu berühren (-5 mm))
54     Rl_max = 60 #
Statisch größter Leiterradius
55     R_index = 10 #
Index wie häufig der Leiterradius zwischen Min und Max iteriert werden
soll
56     R_it = (Rl_max - Rl_min) / R_index #
Ermittlung des Iterationsabstandes für Radiusvariation
57
58     # Alles im Kryostat löschen
59     femm.ei_selectcircle(0, 0, R_cryo + 2, 4)
60     femm.ei_deleteselected()
61     femm.ei_clearselected()
62
63     # Erstellung Innendurchmesser Kryostat
64     femm.ei_addnode(0, 0)
65     femm.ei_drawarc(0, R_cryo, 0, -R_cryo, 180, 1)
66     femm.ei_addarc(0, -R_cryo, 0, R_cryo, 180, 1)
67     femm.ei_selectarcsegment(R_cryo, -1)
68     femm.ei_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 0, 'Ground')
69     femm.ei_selectarcsegment(-R_cryo, 1)
70     femm.ei_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 0, 'Ground')
71     femm.ei_clearselected()
72     femm.ei_zoomnatural()
73
74     # Beginn For-Schleife für Iteration verschiedene Leiterradien
75     for i in range(0, R_index):
76         Rl = Rl_min + (i*R_it)
77             # Berechnungen zu simulierender Radius
78             d_min = math.ceil(5 + (7 - (4 * math.sqrt(3)))) * (Rl / ((2 *
math.sqrt(3)) - 3))) # Ist der kleinste lichte Abstand vom Mittelpunkt
zum Leiterradius ohne das sich die drei Kreise berühren + 5 mm
79             d_max = R_cryo - 5 - (2 * Rl)
80             # Größter lichter Abstand ohne das sich der
Leiterradius und das Kryostatinnenrohr berühren - 5 mm
81             d_index = 10
82             # Index wie häufig der Leiterabstand zwischen Min und
Max iteriert werden soll
83             d_it = (d_max - d_min)/d_index
84             # Ermittlung Iterationsabstand für
Leiterabstandsvariation
85             d_it = 1
86
87             # EXCEL Dokument zur Beschreibung öffnen
88             wb = openpyxl.load_workbook('C:/Users/André/PycharmProjects/
Python_Crah_Curse/Stressed_Area_V2_Final Experiment/Sim_Parameter.xlsx')
89
90             # Beginn For-Schleife für iterative Variation Leiterabstand
91             for j in range(0, d_index):
92                 # Alles im Kryostat löschen
93                 femm.ei_selectcircle(0, 0, R_cryo - 2, 4)
femm.ei_deleteselected()
femm.ei_clearselected()

```

```

94
95         dl = d_min + (j*d_it)
          # Zu simulierender Leiterabstand zum Mittelpunkt bis
          Radius Leiter
96
97         # Erstellung der Leitergeometrien Leiter L1
98         femm.ei_drawarc(((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949))-Rl
, ((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)), ((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949))
+Rl, ((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)), 180, 1)
99         femm.ei_addarc(((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949))+Rl,
, ((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)), ((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949))-
Rl, ((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)), 180, 1)
100        femm.ei_addblocklabel(((Rl+dl)*math.cos
(1.5707963267949)), (Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949))
101        femm.ei_selectlabel(((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949)
), (Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949))
102        femm.ei_setblockprop('<No Mesh>', 1, 0, 0)
103        femm.ei_clearselected()
104        femm.ei_selectarcsegment(((Rl+dl)*math.cos
(1.5707963267949))+1, (Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)+1)
105        femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV1')
106        femm.ei_selectarcsegment(((Rl+dl)*math.cos
(1.5707963267949))-1, (Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)-1)
107        femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV1')
108        femm.ei_clearselected()
109
110        # Leiter L2
111        femm.ei_drawarc(((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813))-Rl
, ((Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)), ((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813))
+Rl, ((Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)), 180, 1)
112        femm.ei_addarc(((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813))+Rl,
, ((Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)), ((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813))-
Rl, ((Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)), 180, 1)
113        femm.ei_addblocklabel(((Rl+dl)*math.cos
(5.7595865315813)), (Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813))
114        femm.ei_selectlabel(((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813)
), (Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813))
115        femm.ei_setblockprop('<No Mesh>', 1, 0, 0)
116        femm.ei_clearselected()
117        femm.ei_selectarcsegment(((Rl+dl)*math.cos
(5.75958653158139))+1, (Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)+1)
118        femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV2')
119        femm.ei_selectarcsegment(((Rl+dl)*math.cos
(5.7595865315813))-1, (Rl+dl)*math.sin(5.7595865315813)-1)
120        femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV2')
121        femm.ei_clearselected()
122
123        # Leiter L3
124        femm.ei_drawarc(((Rl+dl)*math.cos(3.6651914291881))-Rl
, ((Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881)), ((Rl+dl)*math.cos(3.6651914291881))
+Rl, ((Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881)), 180, 1)
125        femm.ei_addarc(((Rl+dl)*math.cos(3.6651914291881))+Rl,
, ((Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881)), ((Rl+dl)*math.cos(3.6651914291881))-
Rl, ((Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881)), 180, 1)
126        femm.ei_addblocklabel(((Rl+dl)*math.cos
(3.6651914291881)), (Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881))
127        femm.ei_selectlabel(((Rl+dl)*math.cos(3.6651914291881)
), (Rl+dl)*math.sin(3.6651914291881))
128        femm.ei_setblockprop('<No Mesh>', 1, 0, 0)

```

```

129         femm.ei_clearselected()
130         femm.ei_selectarcsegment(((Rl + dl) * math.cos
(3.6651914291881)) + 1, (Rl + dl) * math.sin(3.6651914291881) + 1)
131         femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV2')
132         femm.ei_selectarcsegment(((Rl + dl) * math.cos
(3.6651914291881)) - 1, (Rl + dl) * math.sin(3.6651914291881) - 1)
133         femm.ei_setarcsegmentprop(0.01, 'None', 0, 0, 'HV2')
134         femm.ei_clearselected()
135
136         LW = math.sqrt((((Rl+dl)*math.cos(5.7595865315813))-((
Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949)))*2 + (((Rl+dl)*math.sin
(5.7595865315813))-((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949)))*2) - (2*Rl) #
Berechnung der lichten weite zwischen den Leitern
137
138         # Erstellung Blocklabel Kryostat
139         femm.ei_addblocklabel(((R_cryo - 1) * math.cos
(0.7853981633974)), (R_cryo - 1) * math.sin(0.7853981633974))
140         femm.ei_selectlabel(((R_cryo - 1) * math.cos
(0.7853981633974)), (R_cryo - 1) * math.sin(0.7853981633974))
141         femm.ei_setblockprop('LN2', 1, 0, 0)
142         femm.ei_clearselected()
143
144         # Speichert die Datei und lädt die Analyse
145         femm.ei_saveas('file.FEE')
146         femm.ei_createmesh()
147         femm.ei_showmesh()
148         femm.ei_analyze(1)
149         femm.ei_loadsolution()
150
151         # Ermittlung der Feldstärke L1: Leiter - Leiter
152         LN1_L = []
153
154         zum Speichern der E-Komponenten # Array
155         W1_L = []
156
157         zum Speichern des gebildeten E-Betrages # Array
158         for m in range(0, 1800):
159
160             # X-
161             # Y-
162             # FEMM-
163             #
164             # FEMM-
165             #
166             # FEMM-
167             #
168             # FEMM-
169             #
170             # FEMM-
171             #
172             # FEMM-
173             #
174             # FEMM-
175             #
176             # FEMM-
177             #
178             # FEMM-
179             #
180             # FEMM-
181             #
182             # FEMM-
183             #
184             # FEMM-
185             #
186             # FEMM-
187             #
188             # FEMM-
189             #
190             # FEMM-
191             #
192             # FEMM-
193             #
194             # FEMM-
195             #
196             # FEMM-
197             #
198             # FEMM-
199             #
200             # FEMM-
201             #
202             # FEMM-
203             #
204             # FEMM-
205             #
206             # FEMM-
207             #
208             # FEMM-
209             #
210             # FEMM-
211             #
212             # FEMM-
213             #
214             # FEMM-
215             #
216             # FEMM-
217             #
218             # FEMM-
219             #
220             # FEMM-
221             #
222             # FEMM-
223             #
224             # FEMM-
225             #
226             # FEMM-
227             #
228             # FEMM-
229             #
230             # FEMM-
231             #
232             # FEMM-
233             #
234             # FEMM-
235             #
236             # FEMM-
237             #
238             # FEMM-
239             #
240             # FEMM-
241             #
242             # FEMM-
243             #
244             # FEMM-
245             #
246             # FEMM-
247             #
248             # FEMM-
249             #
250             # FEMM-
251             #
252             # FEMM-
253             #
254             # FEMM-
255             #
256             # FEMM-
257             #
258             # FEMM-
259             #
260             # FEMM-
261             #
262             # FEMM-
263             #
264             # FEMM-
265             #
266             # FEMM-
267             #
268             # FEMM-
269             #
270             # FEMM-
271             #
272             # FEMM-
273             #
274             # FEMM-
275             #
276             # FEMM-
277             #
278             # FEMM-
279             #
280             # FEMM-
281             #
282             # FEMM-
283             #
284             # FEMM-
285             #
286             # FEMM-
287             #
288             # FEMM-
289             #
290             # FEMM-
291             #
292             # FEMM-
293             #
294             # FEMM-
295             #
296             # FEMM-
297             #
298             # FEMM-
299             #
300             # FEMM-
301             #
302             # FEMM-
303             #
304             # FEMM-
305             #
306             # FEMM-
307             #
308             # FEMM-
309             #
310             # FEMM-
311             #
312             # FEMM-
313             #
314             # FEMM-
315             #
316             # FEMM-
317             #
318             # FEMM-
319             #
320             # FEMM-
321             #
322             # FEMM-
323             #
324             # FEMM-
325             #
326             # FEMM-
327             #
328             # FEMM-
329             #
330             # FEMM-
331             #
332             # FEMM-
333             #
334             # FEMM-
335             #
336             # FEMM-
337             #
338             # FEMM-
339             #
340             # FEMM-
341             #
342             # FEMM-
343             #
344             # FEMM-
345             #
346             # FEMM-
347             #
348             # FEMM-
349             #
350             # FEMM-
351             #
352             # FEMM-
353             #
354             # FEMM-
355             #
356             # FEMM-
357             #
358             # FEMM-
359             #
360             # FEMM-
361             #
362             # FEMM-
363             #
364             # FEMM-
365             #
366             # FEMM-
367             #
368             # FEMM-
369             #
370             # FEMM-
371             #
372             # FEMM-
373             #
374             # FEMM-
375             #
376             # FEMM-
377             #
378             # FEMM-
379             #
380             # FEMM-
381             #
382             # FEMM-
383             #
384             # FEMM-
385             #
386             # FEMM-
387             #
388             # FEMM-
389             #
390             # FEMM-
391             #
392             # FEMM-
393             #
394             # FEMM-
395             #
396             # FEMM-
397             #
398             # FEMM-
399             #
400             # FEMM-
401             #
402             # FEMM-
403             #
404             # FEMM-
405             #
406             # FEMM-
407             #
408             # FEMM-
409             #
410             # FEMM-
411             #
412             # FEMM-
413             #
414             # FEMM-
415             #
416             # FEMM-
417             #
418             # FEMM-
419             #
420             # FEMM-
421             #
422             # FEMM-
423             #
424             # FEMM-
425             #
426             # FEMM-
427             #
428             # FEMM-
429             #
430             # FEMM-
431             #
432             # FEMM-
433             #
434             # FEMM-
435             #
436             # FEMM-
437             #
438             # FEMM-
439             #
440             # FEMM-
441             #
442             # FEMM-
443             #
444             # FEMM-
445             #
446             # FEMM-
447             #
448             # FEMM-
449             #
450             # FEMM-
451             #
452             # FEMM-
453             #
454             # FEMM-
455             #
456             # FEMM-
457             #
458             # FEMM-
459             #
460             # FEMM-
461             #
462             # FEMM-
463             #
464             # FEMM-
465             #
466             # FEMM-
467             #
468             # FEMM-
469             #
470             # FEMM-
471             #
472             # FEMM-
473             #
474             # FEMM-
475             #
476             # FEMM-
477             #
478             # FEMM-
479             #
480             # FEMM-
481             #
482             # FEMM-
483             #
484             # FEMM-
485             #
486             # FEMM-
487             #
488             # FEMM-
489             #
490             # FEMM-
491             #
492             # FEMM-
493             #
494             # FEMM-
495             #
496             # FEMM-
497             #
498             # FEMM-
499             #
500             # FEMM-
501             #
502             # FEMM-
503             #
504             # FEMM-
505             #
506             # FEMM-
507             #
508             # FEMM-
509             #
510             # FEMM-
511             #
512             # FEMM-
513             #
514             # FEMM-
515             #
516             # FEMM-
517             #
518             # FEMM-
519             #
520             # FEMM-
521             #
522             # FEMM-
523             #
524             # FEMM-
525             #
526             # FEMM-
527             #
528             # FEMM-
529             #
530             # FEMM-
531             #
532             # FEMM-
533             #
534             # FEMM-
535             #
536             # FEMM-
537             #
538             # FEMM-
539             #
540             # FEMM-
541             #
542             # FEMM-
543             #
544             # FEMM-
545             #
546             # FEMM-
547             #
548             # FEMM-
549             #
550             # FEMM-
551             #
552             # FEMM-
553             #
554             # FEMM-
555             #
556             # FEMM-
557             #
558             # FEMM-
559             #
560             # FEMM-
561             #
562             # FEMM-
563             #
564             # FEMM-
565             #
566             # FEMM-
567             #
568             # FEMM-
569             #
570             # FEMM-
571             #
572             # FEMM-
573             #
574             # FEMM-
575             #
576             # FEMM-
577             #
578             # FEMM-
579             #
580             # FEMM-
581             #
582             # FEMM-
583             #
584             # FEMM-
585             #
586             # FEMM-
587             #
588             # FEMM-
589             #
590             # FEMM-
591             #
592             # FEMM-
593             #
594             # FEMM-
595             #
596             # FEMM-
597             #
598             # FEMM-
599             #
600             # FEMM-
601             #
602             # FEMM-
603             #
604             # FEMM-
605             #
606             # FEMM-
607             #
608             # FEMM-
609             #
610             # FEMM-
611             #
612             # FEMM-
613             #
614             # FEMM-
615             #
616             # FEMM-
617             #
618             # FEMM-
619             #
620             # FEMM-
621             #
622             # FEMM-
623             #
624             # FEMM-
625             #
626             # FEMM-
627             #
628             # FEMM-
629             #
630             # FEMM-
631             #
632             # FEMM-
633             #
634             # FEMM-
635             #
636             # FEMM-
637             #
638             # FEMM-
639             #
640             # FEMM-
641             #
642             # FEMM-
643             #
644             # FEMM-
645             #
646             # FEMM-
647             #
648             # FEMM-
649             #
650             # FEMM-
651             #
652             # FEMM-
653             #
654             # FEMM-
655             #
656             # FEMM-
657             #
658             # FEMM-
659             #
660             # FEMM-
661             #
662             # FEMM-
663             #
664             # FEMM-
665             #
666             # FEMM-
667             #
668             # FEMM-
669             #
670             # FEMM-
671             #
672             # FEMM-
673             #
674             # FEMM-
675             #
676             # FEMM-
677             #
678             # FEMM-
679             #
680             # FEMM-
681             #
682             # FEMM-
683             #
684             # FEMM-
685             #
686             # FEMM-
687             #
688             # FEMM-
689             #
690             # FEMM-
691             #
692             # FEMM-
693             #
694             # FEMM-
695             #
696             # FEMM-
697             #
698             # FEMM-
699             #
700             # FEMM-
701             #
702             # FEMM-
703             #
704             # FEMM-
705             #
706             # FEMM-
707             #
708             # FEMM-
709             #
710             # FEMM-
711             #
712             # FEMM-
713             #
714             # FEMM-
715             #
716             # FEMM-
717             #
718             # FEMM-
719             #
720             # FEMM-
721             #
722             # FEMM-
723             #
724             # FEMM-
725             #
726             # FEMM-
727             #
728             # FEMM-
729             #
730             # FEMM-
731             #
732             # FEMM-
733             #
734             # FEMM-
735             #
736             # FEMM-
737             #
738             # FEMM-
739             #
740             # FEMM-
741             #
742             # FEMM-
743             #
744             # FEMM-
745             #
746             # FEMM-
747             #
748             # FEMM-
749             #
750             # FEMM-
751             #
752             # FEMM-
753             #
754             # FEMM-
755             #
756             # FEMM-
757             #
758             # FEMM-
759             #
760             # FEMM-
761             #
762             # FEMM-
763             #
764             # FEMM-
765             #
766             # FEMM-
767             #
768             # FEMM-
769             #
770             # FEMM-
771             #
772             # FEMM-
773             #
774             # FEMM-
775             #
776             # FEMM-
777             #
778             # FEMM-
779             #
780             # FEMM-
781             #
782             # FEMM-
783             #
784             # FEMM-
785             #
786             # FEMM-
787             #
788             # FEMM-
789             #
790             # FEMM-
791             #
792             # FEMM-
793             #
794             # FEMM-
795             #
796             # FEMM-
797             #
798             # FEMM-
799             #
800             # FEMM-
801             #
802             # FEMM-
803             #
804             # FEMM-
805             #
806             # FEMM-
807             #
808             # FEMM-
809             #
810             # FEMM-
811             #
812             # FEMM-
813             #
814             # FEMM-
815             #
816             # FEMM-
817             #
818             # FEMM-
819             #
820             # FEMM-
821             #
822             # FEMM-
823             #
824             # FEMM-
825             #
826             # FEMM-
827             #
828             # FEMM-
829             #
830             # FEMM-
831             #
832             # FEMM-
833             #
834             # FEMM-
835             #
836             # FEMM-
837             #
838             # FEMM-
839             #
840             # FEMM-
841             #
842             # FEMM-
843             #
844             # FEMM-
845             #
846             # FEMM-
847             #
848             # FEMM-
849             #
850             # FEMM-
851             #
852             # FEMM-
853             #
854             # FEMM-
855             #
856             # FEMM-
857             #
858             # FEMM-
859             #
860             # FEMM-
861             #
862             # FEMM-
863             #
864             # FEMM-
865             #
866             # FEMM-
867             #
868             # FEMM-
869             #
870             # FEMM-
871             #
872             # FEMM-
873             #
874             # FEMM-
875             #
876             # FEMM-
877             #
878             # FEMM-
879             #
880             # FEMM-
881             #
882             # FEMM-
883             #
884             # FEMM-
885             #
886             # FEMM-
887             #
888             # FEMM-
889             #
890             # FEMM-
891             #
892             # FEMM-
893             #
894             # FEMM-
895             #
896             # FEMM-
897             #
898             # FEMM-
899             #
900             # FEMM-
901             #
902             # FEMM-
903             #
904             # FEMM-
905             #
906             # FEMM-
907             #
908             # FEMM-
909             #
910             # FEMM-
911             #
912             # FEMM-
913             #
914             # FEMM-
915             #
916             # FEMM-
917             #
918             # FEMM-
919             #
920             # FEMM-
921             #
922             # FEMM-
923             #
924             # FEMM-
925             #
926             # FEMM-
927             #
928             # FEMM-
929             #
930             # FEMM-
931             #
932             # FEMM-
933             #
934             # FEMM-
935             #
936             # FEMM-
937             #
938             # FEMM-
939             #
940             # FEMM-
941             #
942             # FEMM-
943             #
944             # FEMM-
945             #
946             # FEMM-
947             #
948             # FEMM-
949             #
950             # FEMM-
951             #
952             # FEMM-
953             #
954             # FEMM-
955             #
956             # FEMM-
957             #
958             # FEMM-
959             #
960             # FEMM-
961             #
962             # FEMM-
963             #
964             # FEMM-
965             #
966             # FEMM-
967             #
968             # FEMM-
969             #
970             # FEMM-
971             #
972             # FEMM-
973             #
974             # FEMM-
975             #
976             # FEMM-
977             #
978             # FEMM-
979             #
980             # FEMM-
981             #
982             # FEMM-
983             #
984             # FEMM-
985             #
986             # FEMM-
987             #
988             # FEMM-
989             #
990             # FEMM-
991             #
992             # FEMM-
993             #
994             # FEMM-
995             #
996             # FEMM-
997             #
998             # FEMM-
999             #
1000            # FEMM-

```

```

164         for m in range(0, 1800):
                                                    # X-
Koordinaten für E-Ermittlung
165         w = ((Rl + dl) * math.cos(1.5707963267949)) +
((Rl + 0.001) * math.cos(math.radians(m / 10)))
                                                    # Y-
Koordinaten für E-Ermittlung
166         z = ((Rl + dl) * math.sin(1.5707963267949)) +
((Rl + 0.001) * math.sin(math.radians(m / 10)))
167         LN1_E.append(femm.eo_gete(w, z))
                                                    # FEMM-
Abfrage Feldstärke Komponenten
168         W1_E.append(int(math.sqrt((LN1_E[m][0] ** 2) +
(LN1_E[m][1] ** 2))) * 0.000001)
                                                    #
Bildung von E-Betrag
169         E_max_LE = max(W1_E)
170
171         if (max(W1_L)) >= (max(W1_E)):
                                                    #
Überprüfung E_Leiter-Leiter größer E_Leiter-Erde
172         E_max = max(W1_L)
                                                    # Array
zur Speicherung der 0,1° Gradschritte, die > E*0.82
173         else:
174             E_max = max(W1_E)
175
176         femm.eo_showdensityplot(1, 0, 2, (1000000), (E_max *
1000000))
177
178         # Berechnung SEA Leiter 1 gegen Erde
179         femm.eo_seteditmode('point')
180         SEA_L1_E = []
                                                    #
Array für die 1 Gradschritte zu zählen
181         E_L1_E = []
                                                    #
Array für Speicherung der Feldstärkekomponenten L1
182         for l in range(0, 1800):
                                                    #
Schleife um 360° um den Leiter die Feldstärke zu ermitteln
183         x = ((Rl+dl)*math.cos(1.5707963267949))+((Rl
+0.001)*math.cos(math.radians(l/10)))
                                                    #
Berechnung X-Koordinate
184         y = ((Rl+dl)*math.sin(1.5707963267949))+((Rl
+0.001)*math.sin(math.radians(l/10)))
                                                    #
Berechnung Y-Koordinate
185         E_L1_E.append(femm.eo_gete(x, y))
                                                    #
Abfrage der X-Y-Feldstärkeanteile an Koordinate [X,Y]
186         E_mag = int(math.sqrt((E_L1_E[l][0] ** 2) + (
E_L1_E[l][1] ** 2))) * 0.000001
                                                    #
Bildet den Betrag von E in kV/mm
187         if E_mag >= (E_max_LE * alpha):
                                                    #
Überprüfung ob E Anteil an SEA beteiligt ist
188         SEA_L1_E.append(1)
                                                    #
Array zur Speicherung der 0,1° Gradschritte, die > E*0.82
189         femm.eo_addcontour(x, y)
190         femm.eo_clearcontour()

```

```

191                                     # Berechnung SEA Leiter 1 gegen Leiter 2&3
192
193
194                                     SEA_L1_L = []
195
196                                     # Array
197                                     für die 1 Gradschritte zu zählen
198                                     E_L1_L = []
199                                     # Array
200                                     für Speicherung der Feldstärkekomponenten L1
201                                     for l in range(0, 1800):
202
203                                     #
204                                     Schleife um 360° um den Leiter die Feldstärke zu ermitteln
205                                     x = ((R1 + d1) * math.cos(1.5707963267949)) +
206                                     ((R1 + 0.001) * math.cos(math.radians((1800+l) / 10)))
207                                     #
208                                     Berechnung X-Koordinate
209                                     y = ((R1 + d1) * math.sin(1.5707963267949)) +
210                                     ((R1 + 0.001) * math.sin(math.radians((1800+l) / 10)))
211                                     #
212                                     Berechnung Y-Koordinate
213                                     E_L1_L.append(femm.eo_gete(x, y))
214                                     #
215                                     Abfrage der X-Y-Feldstärkeanteile an Koordinate [X,Y]
216                                     E_mag = int(math.sqrt((E_L1_L[l][0] ** 2) + (
217                                     E_L1_L[l][1] ** 2))) * 0.000001
218                                     #
219                                     Bildet den Betrag von E in kV/mm
220                                     if E_mag >= (E_max_LL * alpha):
221                                     #
222                                     Überprüfung ob E Anteil an SEA beteiligt ist
223                                     SEA_L1_L.append(1)
224                                     # Array
225
226                                     zur Speicherung der 0,1° Gradschritte, die > E*0.82
227                                     femm.eo_addcontour(x, y)
228                                     femm.eo_clearcontour()
229
230                                     # Berechnung SEA Leiter 2 gegen Erde (Respektive
231                                     Leiter L3) - Beschreibung wie zuvor
232                                     SEA_L2_E = []
233                                     E_L2_E = []
234                                     for l in range(0, 1800):
235
236                                     x = ((R1 + d1) * math.cos(5.7595865315813)) +
237                                     ((R1 + 0.001) * math.cos(math.radians((2100+l) / 10)))
238                                     y = ((R1 + d1) * math.sin(5.7595865315813)) +
239                                     ((R1 + 0.001) * math.sin(math.radians((2100+l) / 10)))
240                                     E_L2_E.append(femm.eo_gete(x, y))
241                                     E_mag = int(math.sqrt((E_L2_E[l][0] ** 2) + (
242                                     E_L2_E[l][1] ** 2))) * 0.000001
243                                     if E_mag >= (E_max_LE * alpha):
244                                     SEA_L2_E.append(1)
245                                     femm.eo_addcontour(x, y)
246                                     femm.eo_clearcontour()
247
248                                     # Berechnung SEA Leiter 2 gegen Leiter 1 (Respektive
249                                     Leiter L3) - Beschreibung wie zuvor
250                                     SEA_L2_L = []
251                                     E_L2_L = []
252                                     for l in range(0, 1800):
253
254                                     x = ((R1 + d1) * math.cos(5.7595865315813)) +
255                                     ((R1 + 0.001) * math.cos(math.radians((300+l) / 10)))
256                                     y = ((R1 + d1) * math.sin(5.7595865315813)) +
257                                     ((R1 + 0.001) * math.sin(math.radians((300+l) / 10)))

```

```

225         E_L2_L.append(femm.eo_gete(x, y))
226         E_mag = int(math.sqrt((E_L2_L[1][0] ** 2) + (
E_L2_L[1][1] ** 2))) * 0.000001
227         if E_mag >= (E_max_LL * alpha):
228             SEA_L2_L.append(1)
229             femm.eo_addcontour(x, y)
230             femm.eo_clearcontour()
231
232         # Berechnung der SEAs und zugehöriger
Durchschlagfeldstärken der gesamten Anordnung
233         Anzahl_L1_E = len(SEA_L1_E)
# Anzahl
der gespeicherten 0,1er Gradschritte des Halbkreises im SEA-Array wird
ausgezählt für L1
234         SEA_Area_L1_E = 2 * math.pi * Rl * (Anzahl_L1_E /
1800)
#
Berechnung der Leiteroberfläche, wo E > E_max_LE * 0.82 für L1
235         Anzahl_L1_L = len(SEA_L1_L)
# Anzahl
der gespeicherten 0,1er Gradschritte des Halbkreises im SEA-Array wird
ausgezählt für L1
236         SEA_Area_L1_L = 2 * math.pi * Rl * (Anzahl_L1_L /
1800)
#
Berechnung der Leiteroberfläche, wo E > E_max_LL * 0.82 für L1
237         Anzahl_L2_E = len(SEA_L2_E)
# Anzahl
der gespeicherten 0,1er Gradschritte des Halbkreises im SEA-Array wird
ausgezählt für L2 (und L3)
238         SEA_Area_L2_E = 2 * (2 * math.pi * Rl * (Anzahl_L2_E /
1800))
#
Berechnung der Leiteroberfläche, wo E > E_max_LE * 0.82 für L2 und L3
zusammen, da symmetrisch
239         Anzahl_L2_L = len(SEA_L2_L)
# Anzahl
der gespeicherten 0,1er Gradschritte des Halbkreises im SEA-Array wird
ausgezählt für L2 (und L3)
240         SEA_Area_L2_L = 2 * (2 * math.pi * Rl * (Anzahl_L2_L /
1800))
#
Berechnung der Leiteroberfläche, wo E > E_max_LL * 0.82 für L2 und L3
zusammen, da symmetrisch
241         SEA_Gesamt_m_L = (SEA_Area_L1_L + SEA_Area_L2_L) *
1000
#
Berechnung LL-SEA der Anordnung pro einem Meter
242         SEA_Gesamt_m_E = (SEA_Area_L1_E + SEA_Area_L2_E) *
1000
#
Berechnung LE-SEA der Anordnung pro einem Meter
243         SEA_Gesamt_m_L_k_L = SEA_Gesamt_m_L * L_k
#
Berechnung gesamten LL-SEA auf vorgegebene Länge
244         SEA_Gesamt_m_L_k_E = SEA_Gesamt_m_E * L_k
#
Berechnung gesamten LE-SEA auf vorgegebene Länge
245         Eb_63_L = 105 * SEA_Gesamt_m_L_k_L**(-(1/6.23))*p_ü
#
Berechnung der Durchschlagfestigkeitsgrenze anhand des SEA für Kabellänge
und dem Überdruckfaktor
246         Eb_X_L = Eb_63_L * np.power((-np.log(1-0.99)), (1/12))
#
Berechnung der XX% (Bsp.: 0.99=99%) Durchschlagwahrscheinlichkeit

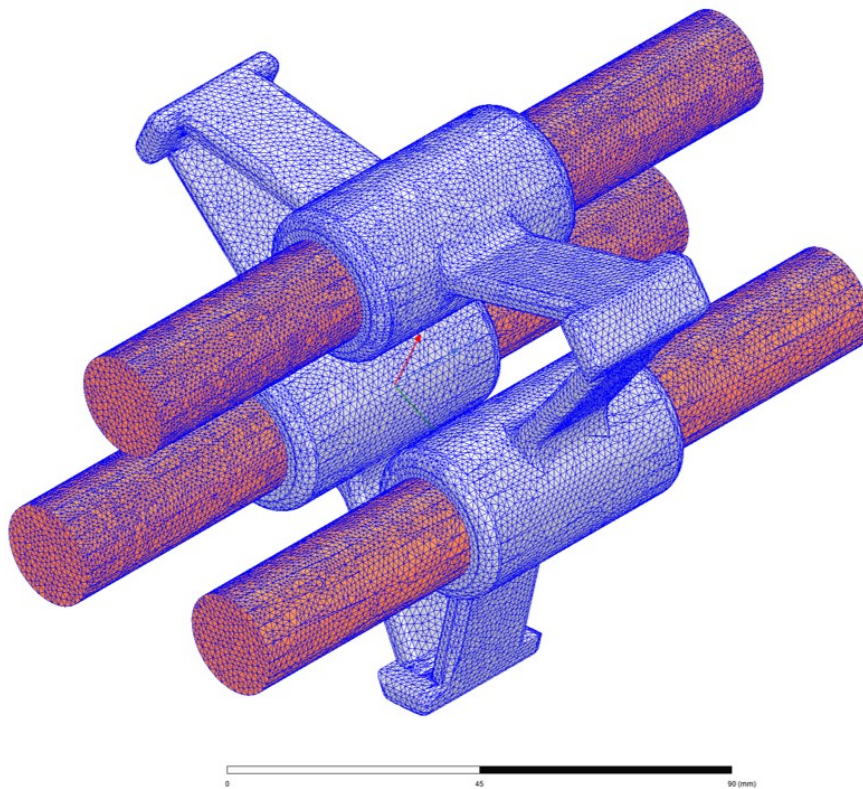
```

```

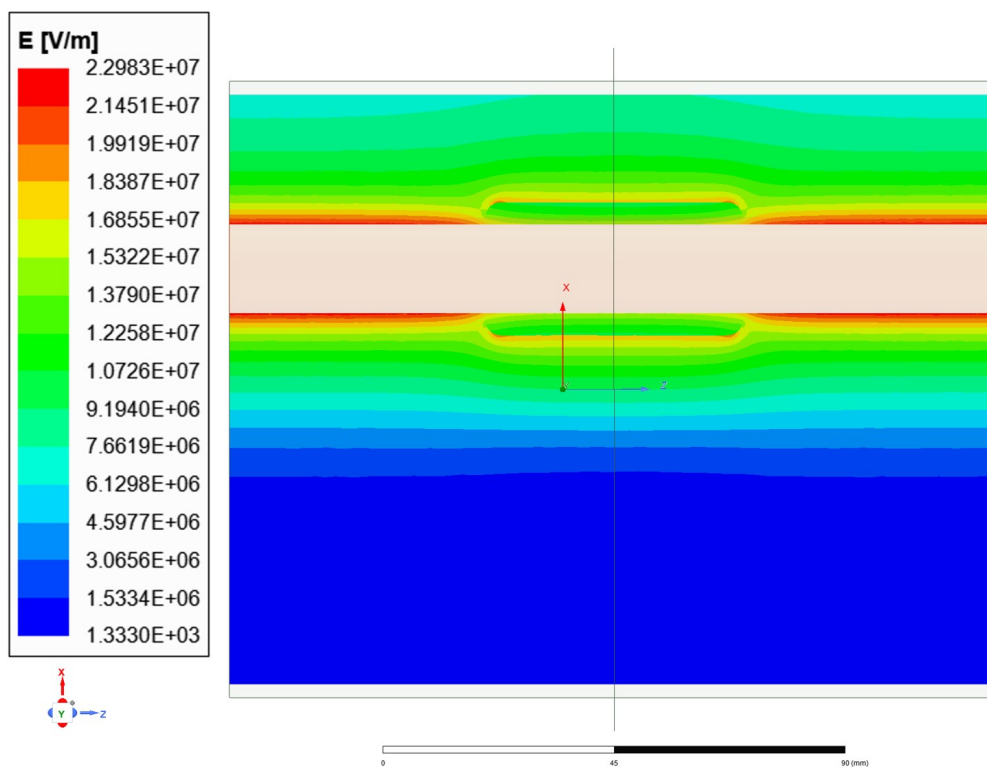
ausgehend von Eb_63 mit dem Formfaktor 12 (parallele Anordnungen) für
Kabellänge und Überdruckfaktor
247         Eb_63_E = 105 * SEA_Gesamt_m_L_k_E ** (-(1 / 6.23)) *
p_ü                                             #
Berechnung der Durchschlagfestigkeitsgrenze anhand des SEA für Kabellänge
und dem Überdruckfaktor
248         Eb_X_E = Eb_63_E * np.power((-np.log(1 - 0.99)), (1 /
12))                                             #
Berechnung der XX% (Bsp.: 0.99=99%) Durchschlagwahrscheinlichkeit
ausgehend von Eb_63 mit dem Formfaktor 12 (parallele Anordnungen) für
Kabellänge und Überdruckfaktor
249
250         # Daten in Excel Datei schreiben
251         ws = wb.active
252         ws.append([R1, d1, LW, R_cryo, Eb_63_L, Eb_X_L,
Eb_63_E, Eb_X_E, E_max_LE, E_max_LL, SEA_Area_L1_E, SEA_Area_L1_L,
SEA_Area_L2_E, SEA_Area_L2_L, SEA_Gesamt_m_L, SEA_Gesamt_m_E,
SEA_Gesamt_m_L_k_L, SEA_Gesamt_m_L_k_E])
253         wb.save('Sim_Parameter.xlsx')

```

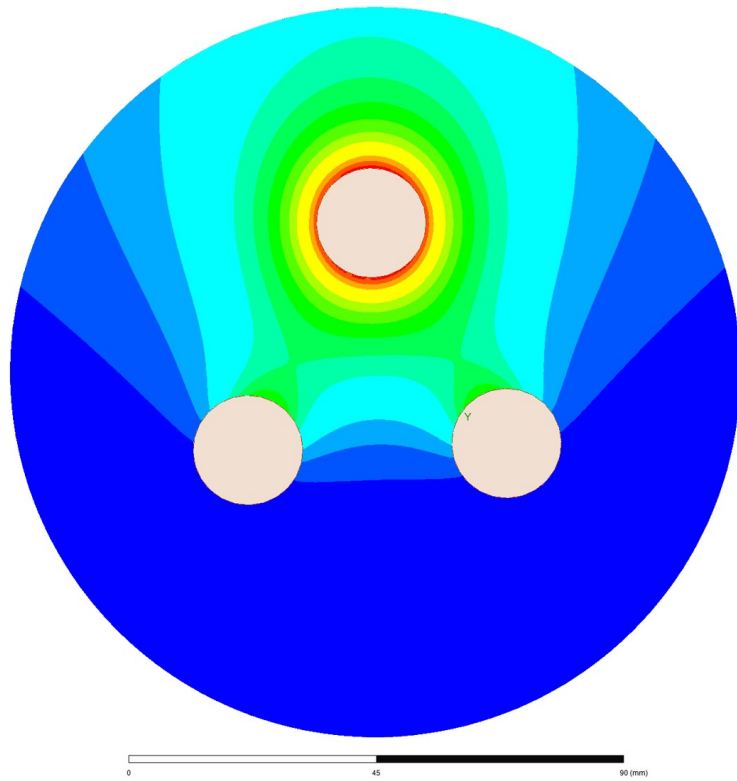
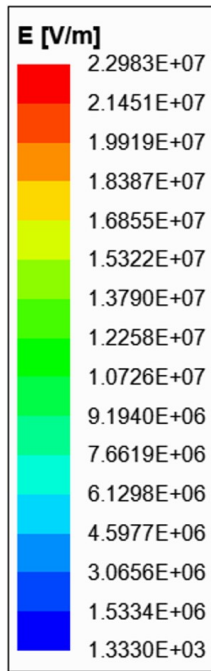
C.2 FEM-Berechnungen der elektrischen Feldverläufe



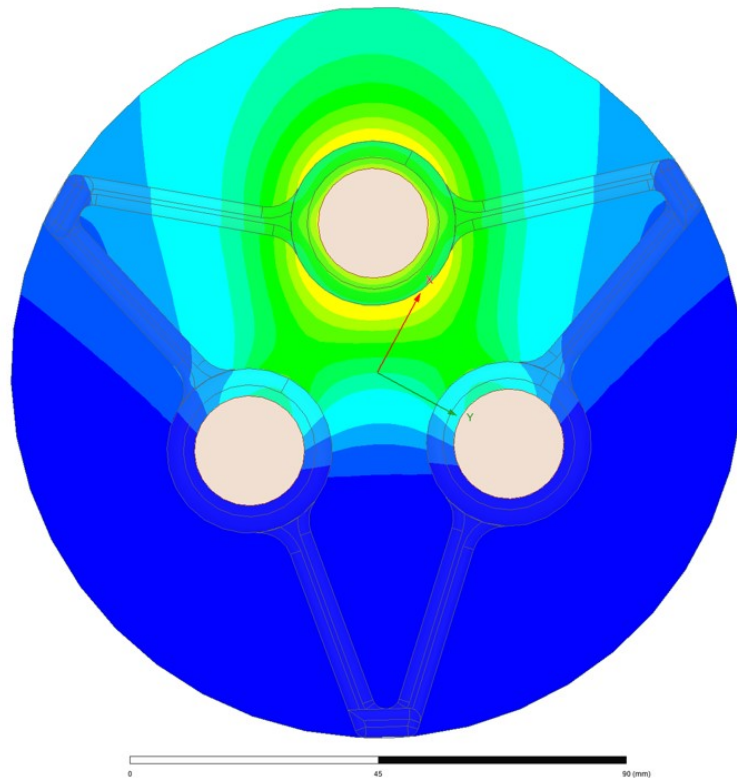
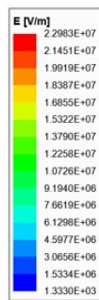
Vernetzung des 3D-Stützisolatormodells.



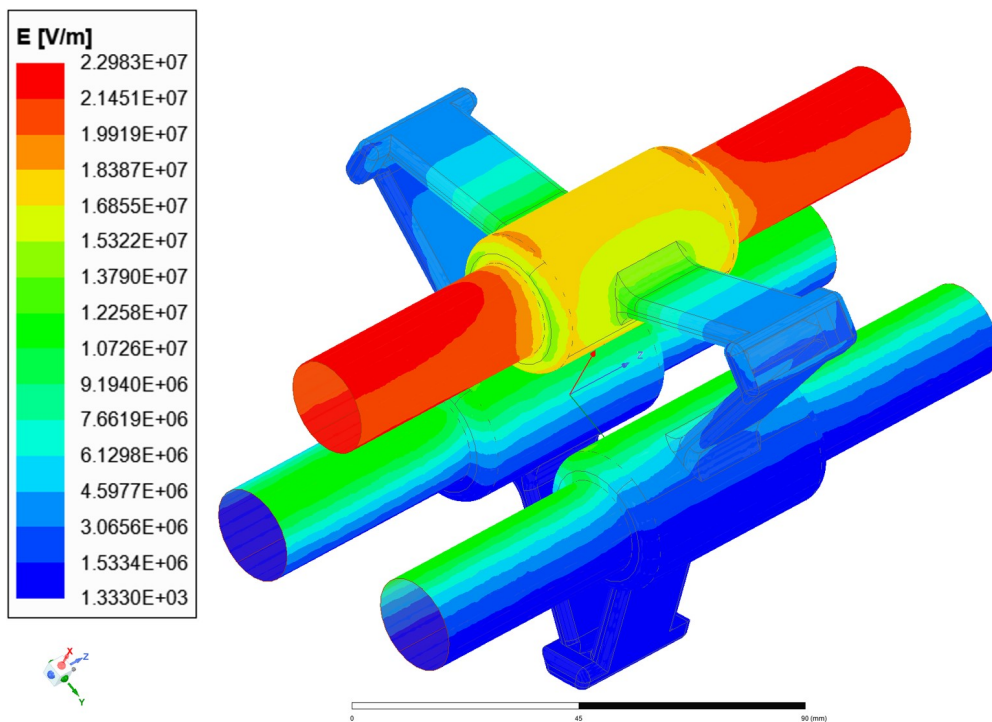
Seitenansicht der elektrischen Feldverteilung von Leiter L_1 und dem Stützisolator in LN₂.



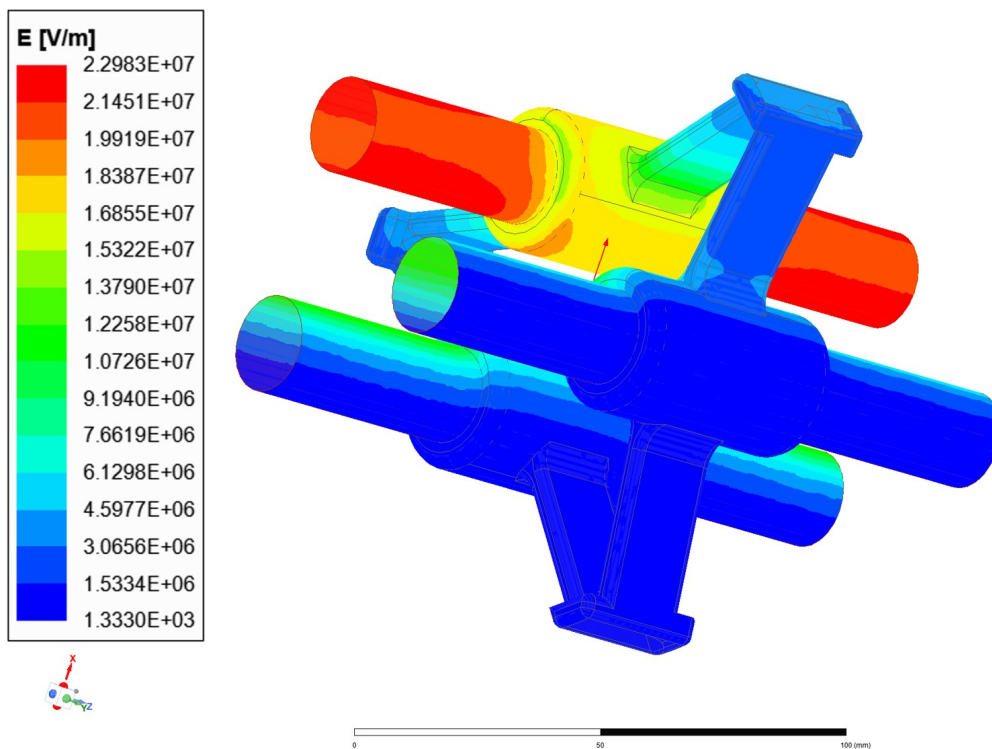
Vorderansicht auf die elektrische Feldverteilung in LN₂ ohne Stützisolator.



Vorderansicht auf die elektrische Feldverteilung in LN₂ mit Stützisolator.

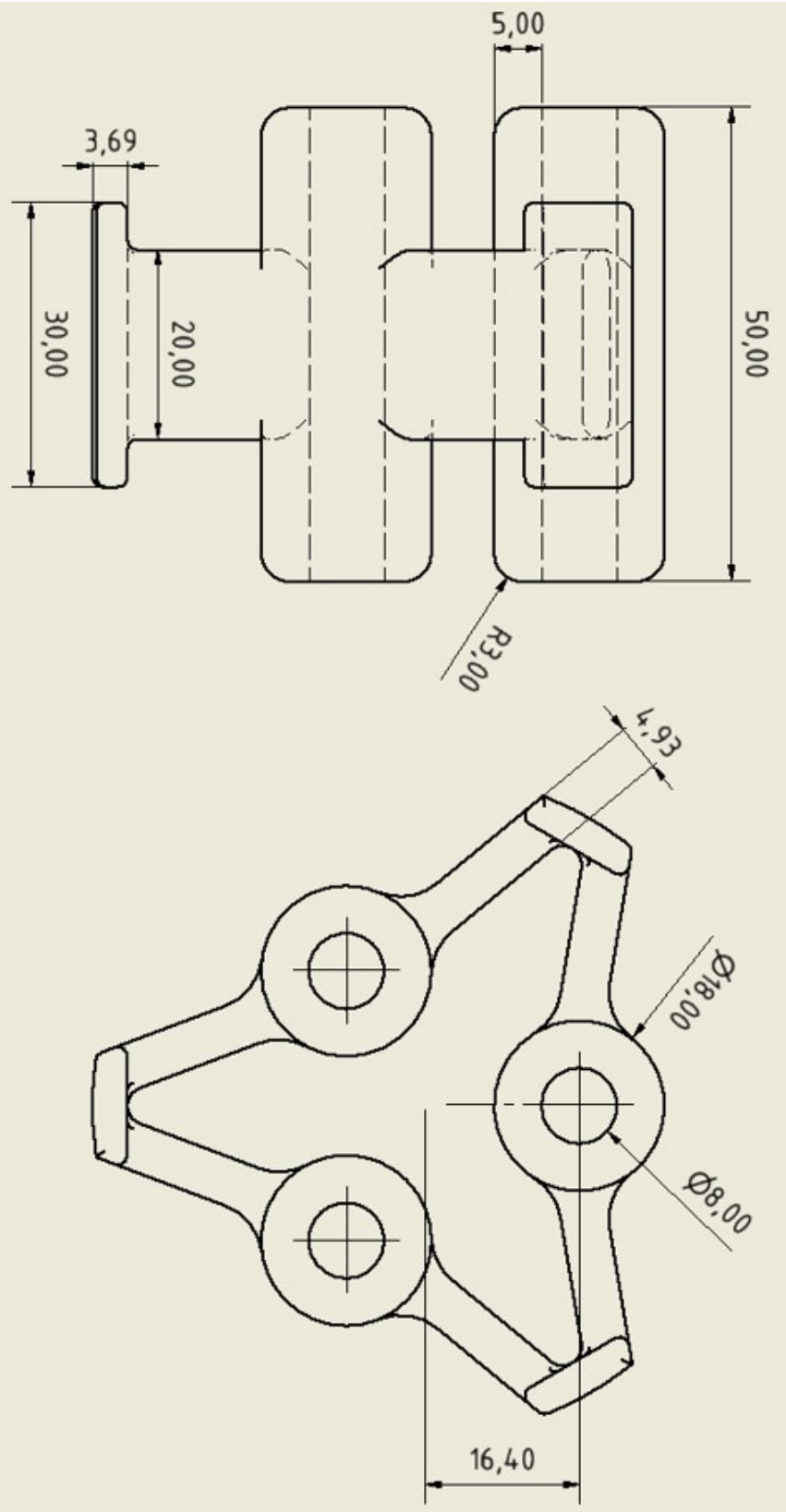


3D-Ansicht der elektrischen Feldverteilung Richtung geerdetem Rohrkryostat auf der Oberfläche der Leiter-Stützisolator-Anordnung in LN₂.



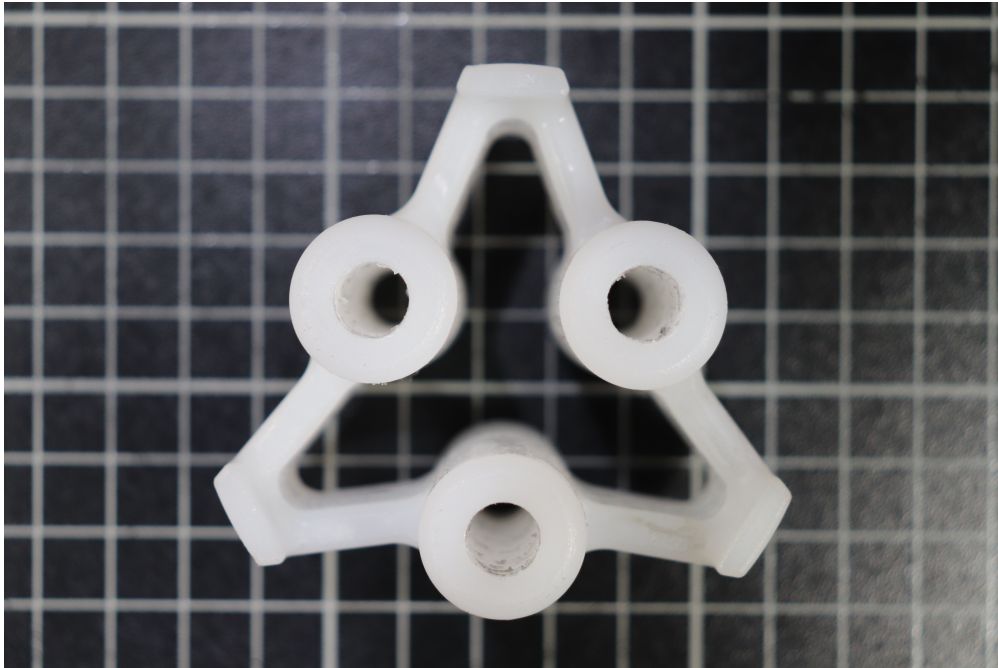
3D-Ansicht der elektrischen Feldverteilung zwischen den Leitern auf der Oberfläche der Leiter-Stützisolator-Anordnung in LN₂.

C.3 Stützisolatorbemaßung

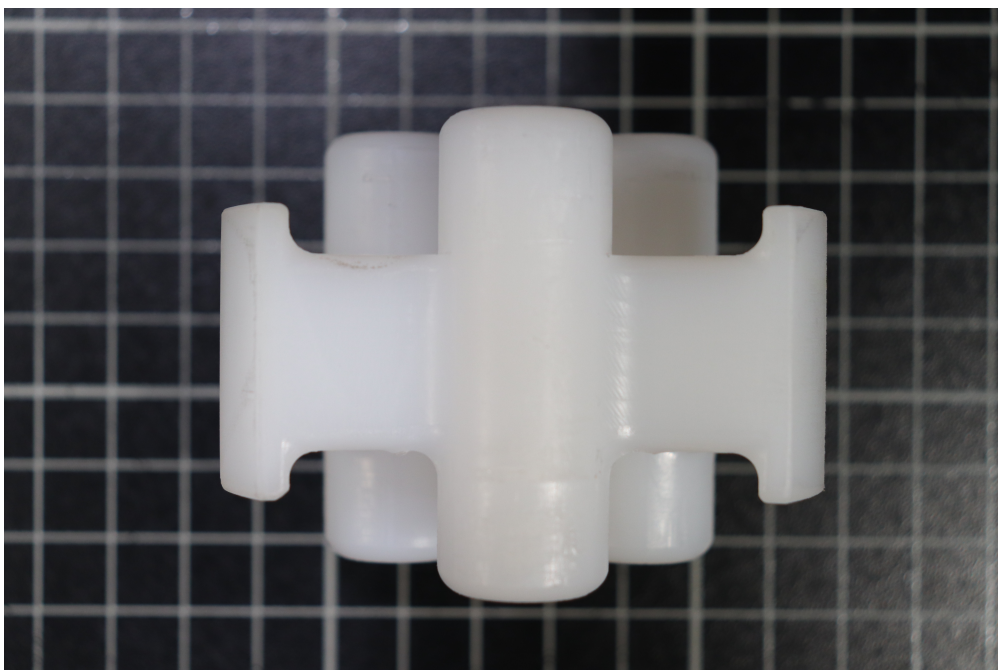


Bemaßung des Stützisolators in mm.

C.4 Bilder zum Stützisolator



Vorderansicht Stützisolator.



Seitenansicht Stützisolator.

Anhang D

D.1 Fertigungsgenauigkeit der Leiteranordnungen 1 bis 3

Abstandsgenauigkeit der drei zylindrischen Leiteranordnungen.

Leiteranordnung	Position	Leiter- elektroden- Anordnung	Lichter Abstand Leiter-Leiter a_{LL} in mm	Leiter- Rohr-Elektroden- Anordnung	Lichter Abstand Leiter-Erde a_{LE} in mm
1	Oben	$L_1 \rightarrow L_2$	21,6	-	-
		$L_1 \rightarrow L_3$	21,2	-	-
		$L_2 \rightarrow L_3$	21,5	-	-
	Mitte	$L_1 \rightarrow L_2$	21,7	-	-
		$L_1 \rightarrow L_3$	21,1	-	-
		$L_2 \rightarrow L_3$	20,9	-	-
	Unten	$L_1 \rightarrow L_2$	21,4	-	-
		$L_1 \rightarrow L_3$	21,2	-	-
		$L_2 \rightarrow L_3$	21,1	-	-
2	Oben	$L_1 \rightarrow L_2$	-	$L_1 \rightarrow$ Rohr	21,1
		$L_1 \rightarrow L_3$	-	$L_2 \rightarrow$ Rohr	22,5
		$L_2 \rightarrow L_3$	-	$L_3 \rightarrow$ Rohr	22,7
	Unten	$L_1 \rightarrow L_2$	19,8	$L_1 \rightarrow$ Rohr	22,7
		$L_1 \rightarrow L_3$	20,8	$L_2 \rightarrow$ Rohr	19,1
		$L_2 \rightarrow L_3$	19,9	$L_3 \rightarrow$ Rohr	19,6
3	Oben	$L_1 \rightarrow L_2$	-	$L_1 \rightarrow$ Rohr	21,6
		$L_1 \rightarrow L_3$	-	$L_2 \rightarrow$ Rohr	21,6
		$L_2 \rightarrow L_3$	-	$L_3 \rightarrow$ Rohr	22,7
	Unten	$L_1 \rightarrow L_2$	20,5	$L_1 \rightarrow$ Rohr	22,7
		$L_1 \rightarrow L_3$	22,6	$L_2 \rightarrow$ Rohr	19,1
		$L_2 \rightarrow L_3$	20,6	$L_3 \rightarrow$ Rohr	19,6

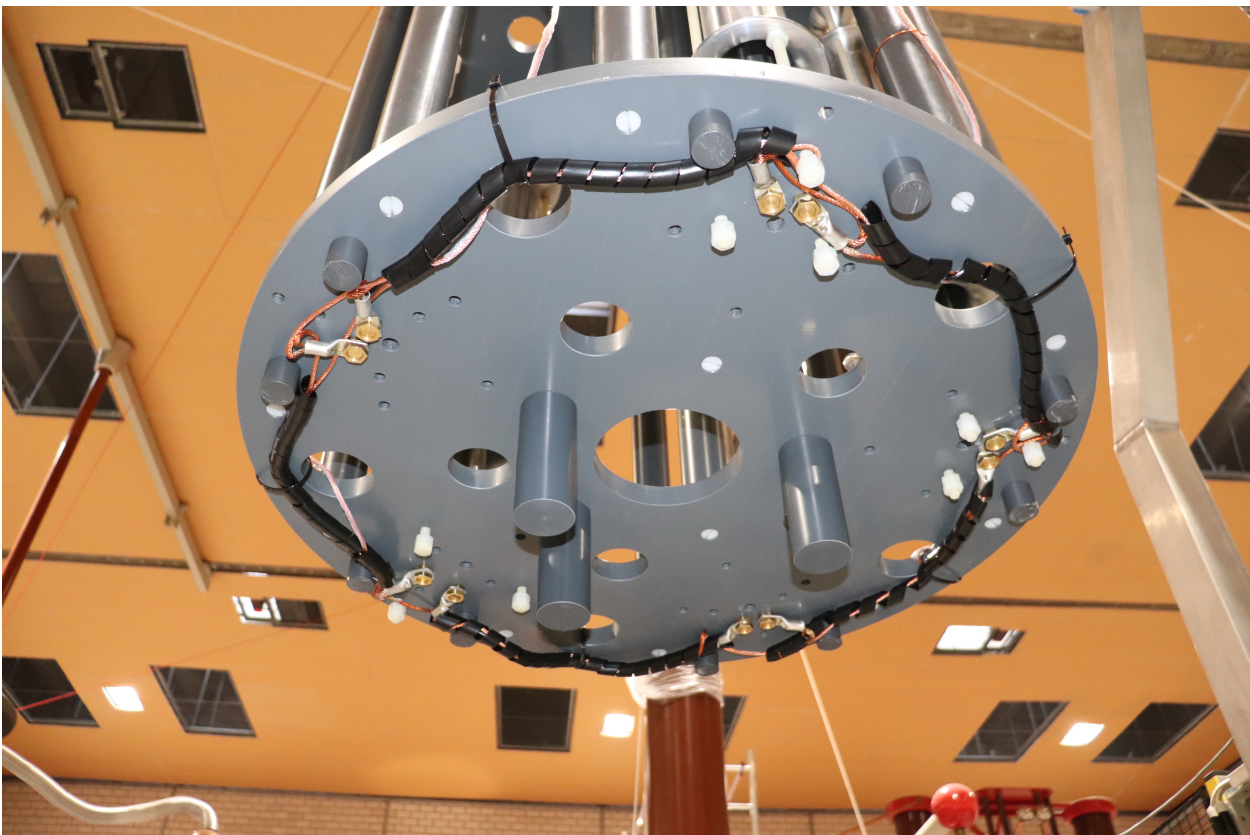
D.2 Bilder zum Gesamtversuchsaufbau der Hauptuntersuchung



Vorderansicht Gesamtversuchsaufbau.

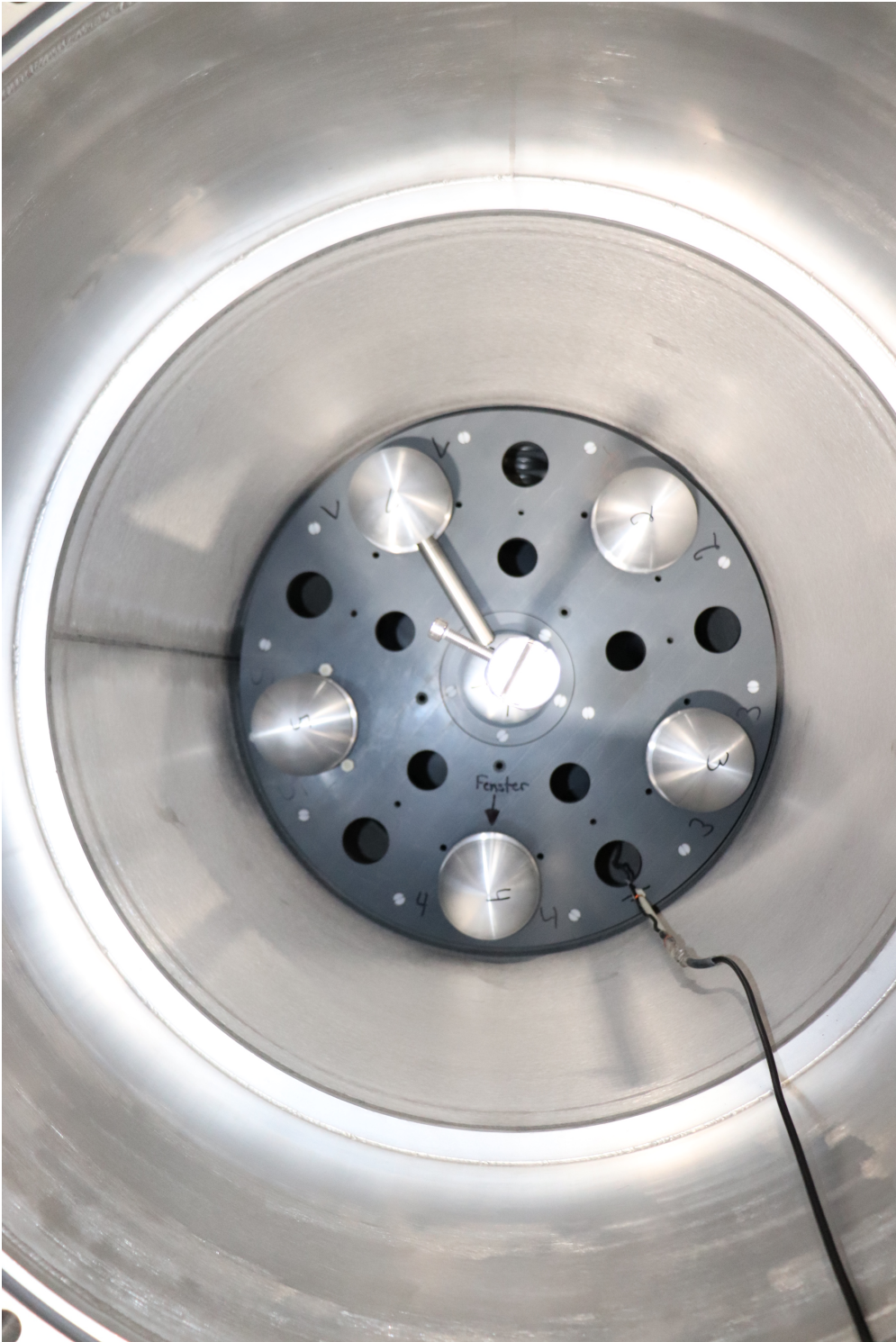


Draufsicht Gesamtversuchsaufbau.

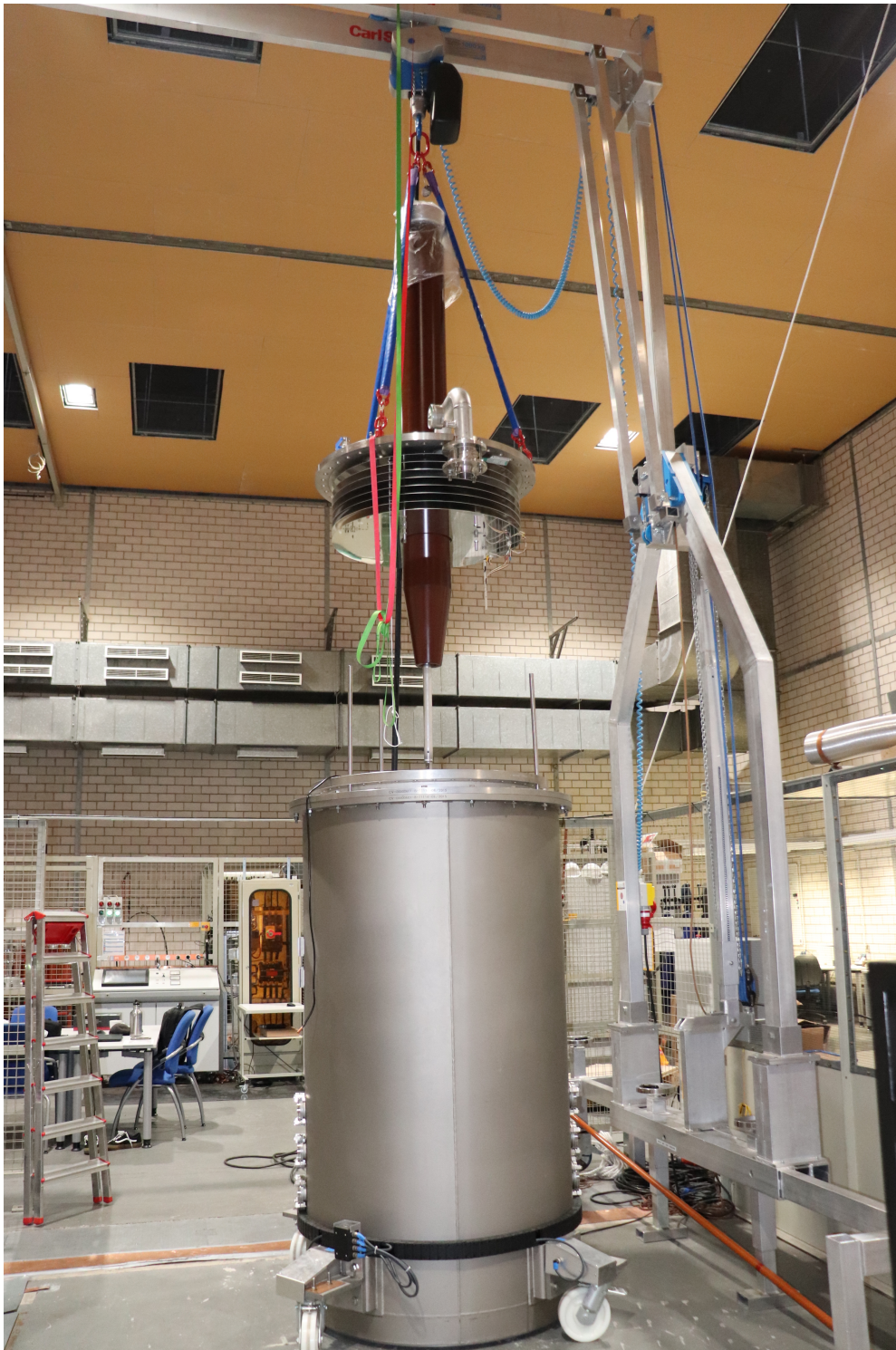


Untenansicht Gesamtversuchsaufbau.

D.3 Bilder zum Einbau des Gesamtversuchsaufbaus



Draufsicht auf Gesamtversuchsaufbau im LN₂-Badkryostaten.



Zusammenführung von Deckel mit RIP-Hochspannungsdurchführung und LN₂-Badkryostat.

D.4 AC-Durchschlagfestigkeitsmesswerte der Hauptuntersuchungen

Zusammenfassung der ermittelten mittleren effektiven Durch- und Überschlagspannungen sowie daraus numerisch und analytisch berechneten maximalen Spitzenfeldstärken unter Wechselspannungsbeanspruchung.

LA	p_{rel} in bar	$U_{Eff} \pm \sigma$ in kV	$\bar{E}_{max,LE} \pm \sigma$ in kV/mm	$E_{max,Spitze,63,2\%,LE}$ in kV/mm	$E_{max,Spitze,99\%,LE}$ in kV/mm	$\bar{E}_{max,Spitze,LL} \pm \sigma$ in kV/mm	$E_{max,Spitze,63,2\%,LL}$ in kV/mm	$E_{max,Spitze,99\%,LL}$ in kV/mm
1	0	148,9				23,4		
	$\pm 0,01$	$\pm 11,9$				$\pm 1,9$	24,3	27,2
	1	165,2				25,9		
	$\pm 0,1$	$\pm 3,5$				$\pm 0,6$	26,2	27,0
	2	167,0				26,2		
$\pm 0,1$	$\pm 2,2$				$\pm 0,3$	26,4	27,1	
	3	167,1				26,2		
$\pm 0,1$	$\pm 0,8$				$\pm 0,1$	26,3	26,5	
	4	164,8				25,9		
$\pm 0,1$	$\pm 4,9$				$\pm 0,8$	26,4	27,9	
2	0	109,4	23,6	24,4	27,0	21,1		
	$\pm 0,01$	$\pm 7,8$	$\pm 1,7$			$\pm 1,5$	21,8	24,1
	1	123,0	26,5	27,2	29,4	23,8		
	$\pm 0,1$	$\pm 6,4$	$\pm 1,4$			$\pm 1,2$	24,4	26,3
	2	114,6	24,7	25,6	28,4	22,1		
$\pm 0,1$	$\pm 7,9$	$\pm 1,7$			$\pm 1,5$	22,9	25,5	
	3	113,2	24,4	25,5	29,3	21,9		
$\pm 0,1$	$\pm 11,2$	$\pm 2,4$			$\pm 2,2$	22,8	26,2	
	4	120,4	26,0	26,7	29,0	23,3		
$\pm 0,1$	$\pm 6,8$	$\pm 1,5$			$\pm 1,3$	23,9	25,9	
3	0	104,6	22,6	23,8	28,0	20,2		
	$\pm 0,01$	$\pm 12,1$	$\pm 2,6$			$\pm 2,3$	21,2	25,0
	1	114,0	24,6	26,0	31,2	22,0		
	$\pm 0,1$	$\pm 14,1$	$\pm 3,0$			$\pm 2,7$	23,3	27,8
	2	101,5	21,9	22,9	26,5	19,6		
0,1	$\pm 10,5$	$\pm 2,3$			$\pm 2,0$	20,5	23,7	
	3	105,1	22,7	24,3	30,4	20,3		
$\pm 0,1$	$\pm 16,4$	$\pm 3,5$			$\pm 3,2$	21,7	27,1	
	4	99,6	21,5	22,9	28,2	19,2		
$\pm 0,1$	$\pm 14,4$	$\pm 3,1$			$\pm 2,8$	20,4	25,2	

D.5 LI-Durchschlagfestigkeitsmesswerte der Hauptuntersuchungen

Zusammenfassung der ermittelten mittleren Durch- und Überschlagspannungen sowie daraus numerisch berechneten maximalen Spitzenfeldstärken unter positiver und negativer Blitzstoßspannungsbeanspruchung. Mit * und rot gekennzeichnete Werte sind Höchstwerte bei denen es nicht zum Durch- bzw. Überschlag kam.

LA	p_{rel} in bar	\hat{U}_{pos} in kV	$\hat{E}_{\text{max, pos, LE}}$ in kV/mm	$\hat{E}_{\text{max, pos, LL}}$ in kV/mm	\hat{U}_{neg} in kV	$\hat{E}_{\text{max, neg, LE}}$ in kV/mm	$\hat{E}_{\text{max, neg, LL}}$ in kV/mm
1	0 ± 0,01	320		35,5	492		54,6
	1 ± 0,1	344		38,2	566		62,9
	2 ± 0,1	418		46,4	615		68,3
	3 ± 0,1	443		49,2	639*		71,0
	4 ± 0,1	443		49,2	639*		71,0
2	0 ± 0,01	233	35,6	31,8	283	43,3	38,7
	1 ± 0,1	283	43,3	38,7	350	53,5	47,8
	2 ± 0,1	300	45,9	41,0	417	63,7	57,0
	3 ± 0,1	300	45,9	41,0	467	71,4	63,8
	4 ± 0,1	300	45,9	41,0	533	81,5	72,8
3	0 ± 0,01	183	28,0	25,0	250	38,2	34,2
	1 ± 0,1	216	33,0	29,5	283	43,3	38,7
	2 0,1	250	38,2	34,2	266	40,7	36,3
	3 ± 0,1	283	43,3	38,7	266	40,7	36,3
	4 ± 0,1	200	30,6	27,3	266	40,7	36,3