

Experimentelle Untersuchungen zum Einzelimpuls- energieaufnahmevermögen von Metalloxidwiderständen eingesetzt in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums

Vom Fachbereich 18
- Elektrotechnik und Informationstechnik -
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

Dipl.-Ing. Max Reinhard
geb. am 31.5.1974 in Frankfurt am Main

Referent: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Berger

Tag der Einreichung: 26. August 2008
Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2008

D17
Darmstadt 2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, der mich als mein Doktorvater stets unterstützt hat und mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Berger danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferates, verbunden mit seiner sehr gewissenhaften Durchsicht der Arbeit, sowie für seine Hinweise und Anmerkungen.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei Herrn Dr.-Ing. J. Speck von der TU-Dresden bedanken, der mir bei der statistischen Auswertung meiner Daten geholfen und mir überdies wertvolle Literatur zur Verfügung gestellt hat.

Mein Dank gilt allen Mitgliedern der Cigré Arbeitsgruppe A3.17 für die anregenden fachlichen Diskussionen und die Tausende von MO-Widerständen, die sie zur Verfügung gestellt haben und damit diese Arbeit überhaupt ermöglichten.

Den Werkstattmitarbeitern unseres Fachgebietes danke ich dafür, dass sie meine Ideen mit Fleiß und Geschick umgesetzt und eigene Verbesserungsvorschläge beigesteuert haben.

Für den großen persönlichen Einsatz und Fleiß danke ich allen beteiligten Studenten, die in Form von Diplomarbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Arbeit von Herrn M. Tuczec, der mittlerweile mein Nachfolger in diesem Projekt ist und dieses mit seinem Einsatz und seinen Ideen weitergebracht hat.

Mein Dank gilt meinen Eltern für die Unterstützung während des Studiums und meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter, besonders auch dafür, mir mein Studium ermöglicht zu haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Frau Dr.-Ing. Renata Teminova für ihr Verständnis und ihre mehr als hilfreichen Anmerkungen und Ratschläge während des Entstehens dieser Arbeit.

Zu letzt möchte ich mich noch bei meinem Freund und Lehrmeister Herrn W. Schreck bedanken, der mich in früher Jugend an die Elektrotechnik herangeführt hat und dem ich meine praktischen Fähigkeiten verdanke, von denen ich beim Aufbau meiner Versuchsstände sehr profitiert habe.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen	III
Abkürzungen	VI
Bilderverzeichnis	VII
Übersicht	XI
Abstract	XV
1 Einleitung	1
2 Ziele der Arbeit	3
3 Energieaufnahmevermögen von MO-Ableitern - Stand des Wissens	6
3.1 Stand der Normung	6
3.2 Stand der Forschung.....	14
4 Statistische Auswertungen	29
4.1 Maximum-Likelihood-Methode.....	31
4.2 Konfidenzintervalle.....	33
4.3 PSM – Progressive Stress Method	35
4.4 MLM – Multiple Level Method	38
5 Prüfkreise	42
5.1 Exponential-Stoßstromkreis	42
5.2 Langwellengenerator	47
5.3 Wechselstromprüfsystem	49
5.4 Referenzspannungs- und Verlustleistungsmesssystem	52
5.4.1 Grundlagen	53
5.4.2 Aufbau	58
5.4.3 Regelung.....	59
5.5 Prüflingsaufnahme	60
6 Voruntersuchungen	62
6.1 Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung.....	62
6.2 Temperaturabhängigkeit der Verlustleistung	64
6.3 Zeitverhalten der Verlustleistung	65
6.4 Untersuchungen zum Verlauf der Anpresskraft bei Hochstrombelastung 4/10 μ s..	67

7	Komplexes Fehlerkriterium und Datenauswertung	73
7.1	Fehlerkriterien und Versuchsablauf	73
7.1.1	Impulsstromversuche	73
7.1.2	Wechselstromversuche	76
7.2	Datenauswertung	78
7.2.1	Impulsstromversuche	78
7.2.2	Wechselstromversuche	83
8	Ergebnisse	87
8.1	Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen	87
8.2	Größe 1 – Hochspannungs-MO-Widerstände	90
8.3	Größe 2 – Mittelspannungs-MO-Widerstände	102
8.4	Versuchsergebnisse - Übersicht	110
8.5	Abhängigkeit des Wechselstromenergieaufnahmevermögens vom Durchmesser.	111
9	Zusammenfassung	114
10	Ausblick	117
11	Anhang A – Größe 1 (Hochspannungs-MO-Widerstände)	119
12	Anhang B – Größe 2 (Mittelspannungs-MO-Widerstände)	122
	Literaturverzeichnis	125
	Normen	128
	Lebenslauf	129
	Veröffentlichungen	130

Formelzeichen

a	Länge in m
a_1, a_2, a_3	Konstanten
A	Fläche des MO-Widerstandes in cm^2
A_1, A_2	Konstanten
b	Länge in m
B	magnetische Flussdichte in Vs/m^2
c	Geschwindigkeit von Schallwellen im ZnO-Material in m/s
C	Wärmekapazität in $\text{J}/^\circ\text{C}$
C	Konstante
C	Konfidenzniveau z.B. 95 %
C_0	spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
$\cos(\varphi_w)$	Kosinus des wahren Phasenverschiebungswinkels
$\cos(\varphi_A)$	Kosinus des angezeigten Phasenverschiebungswinkels
E	Elastizitätsmodul in Pa
f	Fehler
f_{Abtast}	Abtastfrequenz in Hz
$f(t)$	Dichtefunktion einer Verteilung
$f_{W2}(t)$	Dichtefunktion einer 2-parametrischen Weibullverteilung
$f_{W3}(t)$	Dichtefunktion einer 3-parametrischen Weibullverteilung
f_{θ}	Dichtefunktion der geschätzten Funktion
F	Kraft in N
F_q	Quantisierungsfehler
$F(x)$	Verteilungsfunktion einer Verteilung
$F_{W2}(x)$	Verteilungsfunktion einer 2-parametrischen Weibullverteilung
$F_{W3}(x)$	Verteilungsfunktion einer 3-parametrischen Weibullverteilung
F_{φ}	Fehler in Folge des Phasenwinkelfehlers
F_{θ}	Verteilungsfunktion der geschätzten Funktion
H	magnetische Feldstärke in A/m
i	Laufparameter in einer Summe oder einem Produkt
i	Augenblickswert des Stroms in A
\hat{i}	Stromscheitelwert bezogen auf eine Fläche in A/cm^2
I	Stromeffektivwert
J	Stromdichte in A/cm^2
J_{Ref}	Referenzstromdichte in A/cm^2
k	Schnitthöhe in der normierten Likelihood-Funktion für ein bestimmtes C
k	Konstante
k_{θ}	Konstante
$L(\dots)$	Likelihoodfunktion
L_{NV}	Likelihoodfunktion unter der Annahme einer Normalverteilung
L_{W2}	Likelihoodfunktion unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullfunktion
L_{Max}	Maximalwert der Likelihood-Funktion
I	Stromeffektivwert in A
I_n	Nennableitstoßstrom in kA
I_{ref}	Referenzstrom (siehe auch Referenzspannung) in mA
k_i	Anzahl der defekten MO-Widerstände pro Stufe
n	Auflösung eines AD-Wandlers in bit
n	Anzahl
n	Anzahl der Versuchsstufen

p	Druck
P_{ct}	Verlustleistung in mW
$P_{ct \text{ wahr}}=P_{ctw}$	wahre Verlustleistung in mW
$P_{ct \text{ angezeigt}}=P_{cta}$	angezeigte Verlustleistung in mW
P_V	Verlustleistungsdichte in mW/cm ³
P_{V0}	Verlustleistungsdichtewert für eine bestimmte Temperatur in mW/cm ³
Q	Wärmeinhalt in J
r	Freiheitsgrad (Anzahl der gesuchten Parameter)
r	Radius in m
r_0	Startradius in m
S	Stromsteilheit in kA/μs
t	Zeit
t_0	Anfangswert einer 3-parametrischen Weibullverteilung
T	Scheiteldauer in μs
T	Temperatur in °C
\hat{u}	Spannungsscheitelwert in kV
U	Spannungseffektivwert in kV
U_c	Dauerspannung in kV
U_c^*	erhöhte Dauerspannung in kV (durch zeittraffenden Versuch ermittelt)
U_{eff}	Spannungseffektivwert in kV
U_{IND}	in die Messschleife induzierte Spannung in kV
U_{KOMP}	Spannung über der Kompensationsspule in kV
U_L	Ladespannung in kV
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel in kV
U_{MO}	Spannung über den MO-Widerstand
U_r	Bemessungsspannung des Prüflings in kV (Effektivwert)
U_r^*	erhöhte Bemessungsspannung in kV (durch zeittraffenden Versuch ermittelt)
U_{ref}	Referenzspannung in kV (siehe auch Referenzstrom)
U_{res}	Restspannung des Prüflings in kV bei Blitzstoßstrom (8/20 μs)
U_{TEILER}	über den Messteiler anliegende Spannung in kV
V	Volumen (meist in cm ³)
w_i	Anzahl der nicht defekten MO-Widerstände pro Stufe
W	während des Rechteckstoßes zugeführte Energie
W	Wärmeenergie in J
x	gemessene Werte
X	Zufallsvariablen
Z	Wellenwiderstand der Leitung in Ω
α	Temperaturkoeffizient der Wärmekapazität in J/(cm ³ · °K ²)
α	Parameter einer Weibullverteilung
α	Exponent der Spannung bei der Nachbildung der Ableiterkennlinie
β	Parameter einer Weibullverteilung
δ	Weibullexponent nach [Carr-90]
η	Lageparameter einer Weibullverteilung nach [Carr-90]
ϕ	magnetischer Fluss in Vs
θ	zu schätzender Parameter in einer Likelihood-Funktion
θ	Temperatur in °C
θ_0	Starttemperatur in °C
$\hat{\theta}$	Maximum-Likelihood-Schätzwert
μ	Erwartungswert einer normalverteilten Zufallsgröße

μ	Mittelwert
μ	relative Permeabilität in Vs/(Am)
ρ	Dichte in kg/m ³
σ	Standardabweichung
τ	Zeitkonstante in s
φ_A	angezeigte Phasenwinkel
φ_W	wahre Phasenwinkel
$\Delta\varphi$	Winkelfehler des Messsystems
Δt	Zeitfehler
ϑ	Temperatur in K

Abkürzungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
BR	Bruch (engl. "cracking")
Bi_2O_3	Wismutoxid
CoO	Kobaltoxid
Cr_2O_3	Chromoxid
DU	Durchschlag (engl. "puncture")
DVM	Digitalvoltmeter
EGLA	Externally gapped line arrester, Leitungsableiter mit externer Funkenstrecke
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HVDC	High voltage DC, Hochspannungsgleichstrom
LS	Leistungsschalter
LWL	Lichtwellenleiter
MLM	Multi Level Method
MnO	Manganoxid
MO-Widerstand	Metalloxid-Widerstand (aktives Teil eines Überspannungsableiters)
NTC	negativer Temperaturkoeffizient
PCI	Computerbussystem
PSM	Progressive Stress Method
Sb_2O_3	Antimonoxid
SiC	Silizium-Karbid
TLA	Transmission line arrester (Leitungsableiter)
TOV	Temporary overvoltage, Zeitweilige Überspannung
ÜB	Überschlag (engl. "flashover")
UHV	Ultra high voltage = Ultra-Hochspannung
ZnO	Zinkoxid
PO	Prüfobjekt
Zn	Zink

Bilderverzeichnis

Abbildung 1.1: U-I Kennlinie eines MO-Widerstandes für verschieden Stromformen / Quelle: Siemens	1
Abbildung 1.2: Beispiele für Ableiterdesigns, links: direkt vergossen, rechts: mit Stickstoffisolation / Quelle: Siemens	2
Abbildung 3.1: Zur thermischen Stabilität eines Ableiters (Quelle: [Hintr-00])	6
Abbildung 3.2: Zusammenhang zwischen der Energie pro Volumen und der Temperatur eines MO-Widerstandes	8
Abbildung 3.3: Schutzkonzept für Serienkompensationskondensatoren.....	9
Abbildung 3.4: Ablaufplan einer Arbeitsprüfung für Ableiter mit 10 kA Nennableitstoßstrom der Leitungsentladungsklassen 2 und 3 und Ableiter mit Nennableitstoßstrom 20 kA der Leitungsentladungsklassen 4 und 5 (Quelle: [DIN EN 60099-4]).....	12
Abbildung 3.5: Versuchsergebnisse nach [Eda-84], links: Energieaufnahmevermögen von Scheiben der Höhe 1,3 mm, rechts: Energieaufnahmevermögen von Scheiben der Größe: $\varnothing = 114$ mm, Höhe = 10 mm (das Diagramm enthält nur einen Messpunkt)	15
Abbildung 3.6: Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen des Herstellers 3 nach [Ring-97], oben: Wechselstrombelastung 60 Hz – Stromamplitude 600 A, unten: Rechteckstoßstrombelastung – Stromamplitude 35 kA	17
Abbildung 3.7: Ergebnisse der Prüfungen für Hersteller 1-3 nach [Ring-97]	18
Abbildung 3.8: Mittlere Stromamplitude über mittlerer Dauer bis zum Ausfall nach [Ring-97]	19
Abbildung 3.9: Temperaturverlauf an der Metallisierungskante eines MO-Widerstandes nach [Bogg-00]	20
Abbildung 3.10: Ergebnisse der Simulationen des Energieaufnahmevermögens nach [Bart-96], links: Mittelspannungs-MO-Widerstände (“distribution-class“), rechts: Hochspannungs-MO-Widerstände (“station-class“)	22
Abbildung 3.11: Temperatur- und Kräfteverlauf in einem MO-Widerstand nach [Bart-99]...	23
Abbildung 3.12: Drei Typen von Korngrenzen zur Simulation des Verhaltens eines ZnO-Varistors nach [Bart-96a]	24
Abbildung 3.13: Tendenzen des Energieaufnahmevermögens nach [Verd-92]	25
Abbildung 3.14: Abhängigkeit der spezifischen Verlustleistung von der Temperatur nach [Deng-98]	27
Abbildung 4.1: Links: Dichtefunktion f einer $N(0,1)$ verteilten Zufallsvariablen, rechts: Verteilungsfunktion F der links dargestellten Dichtefunktion f	29
Abbildung 4.2: Links: Dichtefunktion f_{W_2} einer zwei-parametrischen weibullverteilten Zufallsvariablen, rechts: Verteilungsfunktion F_{W_2} der links dargestellten Dichtefunktion f_{W_2}	30
Abbildung 4.3: Links: Dichtefunktion f_{W_3} einer drei-parametrischen Weibull-verteilten Zufallsvariablen $t_0 = 1$, rechts: Verteilungsfunktion F_{W_3} der links dargestellten Dichtefunktion f_{W_3}	31
Abbildung 4.4: Schematischer Schnitt durch eine Likelihood-Funktion an der Stelle $k = f(r, C)$ nach [Carr-90]	34
Abbildung 4.5: Konfidenzgrenzen einer Verteilung in der Darstellung $P = f(X)$ nach [Carr-90]	34
Abbildung 4.6: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullverteilung / Fall A.....	36
Abbildung 4.7: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall A	36

Abbildung 4.8: normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Normalverteilung / Fall A.....	37
Abbildung 4.9: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 90 % und 95 % / Fall A.....	37
Abbildung 4.10: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Weibullverteilung / Fall B.....	39
Abbildung 4.11: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall B.....	39
Abbildung 4.12: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Normalverteilung / Fall B.....	40
Abbildung 4.13: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall B.....	40
Abbildung 5.1: Ersatzschaltbild des Exponentialstoßstromkreises.....	42
Abbildung 5.2: Exponentialstoßstromkreis.....	43
Abbildung 5.3: Spannungs- und Stromverlauf während einer Prüfung mit der Stoßstromform 8/20 μs an einem kompletten Mittelspannungsableiter.....	44
Abbildung 5.4: Ersatzschaltbild für die Kompensation, von induktiv eingekoppelten Spannungen, während der Spannungsmessung bei Stoßströmen.....	44
Abbildung 5.5: Verlauf der Induktionsspannung, hervorgerufen in der Messschleife durch einen Hochstoßstromimpuls der Form 4/10 μs bei einer Stromhöhe von 100 kA.....	46
Abbildung 5.6: Ersatzschaltbild für die Überprüfung der Kompensationsspule mit Hilfe eines Metallblocks.....	46
Abbildung 5.7: Spannungsverlauf am Messteiler während eines Hochstoßstromimpulses der Form 4/10 μs durch einen Metallblock; mit angeschlossener Kompensationsspule.....	47
Abbildung 5.8: Ersatzschaltbild des Langwellengenerators (Kettenleiter) zur Erzeugung von Rechteckstoßströmen (Langwellenstöße).....	47
Abbildung 5.9: Oszillogramm eines 2-ms-Rechteckstoßstromes an einem MO-Widerstand der Größe 1.....	48
Abbildung 5.10: Oszillogramm eines Stoßstromes der Form 90/200 μs an einem Hochspannungswiderstand.....	48
Abbildung 5.11: Bild des geöffneten Thomareglers (rechts: Bürstenring).....	49
Abbildung 5.12: Ersatzschaltbild des Wechselstromprüfsystems.....	50
Abbildung 5.13: Wechselstromprüfsystem von links: Transformator, sekundärer LS, Messkabine, primärer LS.....	50
Abbildung 5.14: Prüflingsaufnahme des Wechselstromprüfsystems.....	51
Abbildung 5.15: Verlauf des Stroms und der Spannung während einer AC-Prüfung.....	52
Abbildung 5.16: Asymmetrischer Referenzstrom eines Mittelspannungs-MO-Widerstandes nach Impulsbelastung mit einem Impuls der Form 4/10 μs	54
Abbildung 5.17: Betragsfehler eines Verlustleistungsmesssystems in Abhängigkeit vom Winkelfehler des Messsystems.....	56
Abbildung 5.18: Ausschnitt aus einer Langzeitverlustleistungsmessung.....	58
Abbildung 5.19: Referenzspannungs- und Verlustleistungsmesssystem (ohne Darstellung der Auswerteeinheit).....	58
Abbildung 5.20: Blockschaltbild Referenz- und Verlustleistungsmesssystem.....	59
Abbildung 5.21: Prüflingsaufnahme.....	60
Abbildung 6.1: Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung – Größe 1.....	63
Abbildung 6.2: Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung – Größe 2.....	63
Abbildung 6.3: Änderung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Spannung – Größe 1.....	64
Abbildung 6.4: Änderung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Spannung – Größe 2; zusätzlich Vergleich mit den Daten nach [Deng-98] ..	65

Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf der Verlustleistungen an MO-Widerständen der Hersteller S, U Größe 1 sowie S, V Größe 2	66
Abbildung 6.6: Simulation des Temperaturanstieges während eines 4/10 μ s – 100 kA Hochstromimpulses bei einem Mittelspannungs-MO-Widerstand; Starttemperatur 20 °C	68
Abbildung 6.7: Links: MO-Widerstand mit Kraftmessdose im Erdfad; rechts: Oszilloskop mit Ladungsverstärker	68
Abbildung 6.8: Verlauf der Kraft am unteren Rand eines Mittelspannungs-MO-Widerstandes (Höhe 37 mm) während eines Hochstoßstroms 4/10 μ s / 100 kA	69
Abbildung 6.9: Frequenzgang des Ladungsverstärkers	69
Abbildung 6.10: Verlauf der Kraft am unteren Rand zweier Mittelspannungs-MO-Widerstände unterschiedlicher Höhe (27,8; 37 mm) während eines Hochstoßstroms 4/10 μ s / 100 kA	70
Abbildung 7.1: Mechanische Ausfallmechanismen an MO-Widerständen (von links Bruch, Überschlag, Durchschlag)	73
Abbildung 7.2: “Multi-puncture“ am Rand der Metallisierung eines MO-Widerstandes nach Belastung mit einem Rechteckstoßstrom 2 ms (Stromhöhe ca. 3 kA).....	74
Abbildung 7.3: Ablaufdiagramm einer Impulsstromprüfung	75
Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Ladespannung und eingebrachter Impulsenergie (Hersteller V – Größe 2, Impulsform 90/200 μ s).....	80
Abbildung 7.5: Oben: realer Verlauf des Stromes und der eingebrachten Energie während eines Rechteckstoßes, unten: hypothetische Änderung der Referenzspannung während des Stoßes (nicht gemessen).....	81
Abbildung 7.6: Statistische Auswertung der Impulsstromversuchsreihe 90/200 μ s, an MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 als Normalverteilung, mittels Highvolt MLM 6.1	82
Abbildung 7.7: Statistische Auswertung der Impulsstromversuchsreihe 90/200 μ s, an MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 als Doppel exponentialverteilung, mittels Highvolt MLM 6.1	83
Abbildung 7.8: Statistische Auswertung des Wechselstromversuchs (100 A) als Normalverteilung für den Hersteller U – Größe 1, mittels Highvolt PSM 6.1	84
Abbildung 8.1: Durchschwingen des Stromes während einer Hochstoßstromprüfung 4/10 μ s an einem Hochspannungswiderstand der Größe 1	89
Abbildung 8.2: 50-%-Ausfallenergie bei Prüfungen an MO-Widerständen der Größe 1 über der Stromdichte, mit den Daten aus [Ring-97]	91
Abbildung 8.3: Mittelwert der Stromamplituden in Abhängigkeit der Zeitdauer für MO-Widerstände der Größe 1, mit den Daten aus [Ring-97].....	93
Abbildung 8.4: Ergebnisse einer Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 300 A	94
Abbildung 8.5: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers S – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform	97
Abbildung 8.6: MO-Widerstand mit Außenüberschlag, es trat ein Versagen in der Glasur auf	97
Abbildung 8.7: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform	98
Abbildung 8.8: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform	98
Abbildung 8.9: MO-Widerstand mit einseitigen Strommarken (links: Oberseite, rechts: Unterseite desselben Widerstands) nach Rechteckstoßstromprüfung.....	99
Abbildung 8.10: Ersatzschaltbilder zu den Versuchen mit MO-Widerständen, die einseitige Punktbildung aufweisen	100

Abbildung 8.11: Schematische Darstellung der Grenzfläche Elektrode ↔ Metallisierung des MO-Widerstandes; die eingezeichnete Stromrichtung ist die reale Elektronenflussrichtung	100
Abbildung 8.12: Vergleich der mittleren Ausfallenergien für MO-Widerstände der Größe 2	102
Abbildung 8.13: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers S – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform	103
Abbildung 8.14: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform	104
Abbildung 8.15: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers V – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform	104
Abbildung 8.16: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers W – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform	105
Abbildung 8.17: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers Y – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform	105
Abbildung 8.18: Änderungen der Referenzspannungen nach Hochstoßstromprüfung 4/10 μ s – Größe 2 in Abhängigkeit der Stromhöhe	106
Abbildung 8.19: Änderungen der Referenzspannungen nach Hochstoßstromprüfung 4/10 μ s – Größe 2 in Abhängigkeit der Energie	107
Abbildung 8.20: Änderung der Verlustleistung und der Referenzspannung an MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 2 bei Prüfungen mit der Impulsform 4/10 μ s	109
Abbildung 8.21: Vergleichende Darstellung der mittleren Ausfallenergien für Größe 1 und 2	110
Abbildung 8.22: Vergleich des Wechselstromenergieaufnahmevermögens für MO-Widerstände eines Herstellers bei unterschiedlichen Durchmessern	111

Übersicht

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit der international besetzten Cigré Arbeitsgruppe A3.17 "Surge Arresters". In dem mehrere tausend MO-Widerstände (Metalloxid-Widerstände) umfassenden Versuchsprogramm wurden verschiedenste Prüfungen an MO-Widerständen, die derzeit für den Bau von Überspannungsableitern, sowohl in Hoch- als auch in Mittelspannungsnetzen, eingesetzt werden, von Herstellern aus Amerika, Europa und Japan durchgeführt.

Der Fokus der Untersuchung lag dabei auf dem **Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen**. Das Ziel der Untersuchungen war zum einen, die Ergebnisse früherer Untersuchungen zu verifizieren und zu erweitern. Zum anderen sollten die Untersuchungen den derzeitigen Stand der Technik dokumentieren. Zu diesem Zweck werden die 50%-Ausfallenergien miteinander verglichen.

Es wurden am Markt erhältliche MO-Widerstände von sieben Herstellern aus aller Welt (benannt mit S, U, V, W, X, Y, Z) untersucht. Die Untersuchungen beziehen sich auf zwei unterschiedliche Größen von MO-Widerständen. Die erste Größe, im Weiteren Größe 1 genannt, wird hauptsächlich in Hochspannungsableitern der Leitungsentladungsklasse 3 mit einem Nennableitstoßstrom von 10 kA eingesetzt. Ihre Höhe variiert von Typ zu Typ zwischen 40 und 45 mm (nur die MO-Widerstände eines Herstellers wiesen eine kleinere Höhe von ca. 25 mm auf), bei einem Durchmesser von etwa 60 mm. Die zweite untersuchte Größe, im Weiteren Größe 2 genannt, wird hauptsächlich in Mittelspannungsableitern mit einem Nennableitstoßstrom von 10 kA eingesetzt. Ihre Höhe variiert von 30 bis 40 mm, bei einem Durchmesser von ca. 40 mm.

Das Versuchsprogramm besteht aus acht verschiedenen Belastungsformen, die sich in Versuche mit Wechselstrom und in Versuche mit Impulsstrom untergliedern. Es wurden Wechselstrombeanspruchungen mit einer Stromhöhe von ≈ 10 A, ≈ 100 A, ≈ 300 A; Rechteckstoßstromimpulse mit Zeitdauern von 1, 2, 4 ms; Hochstoßstromimpulse der Form 4/10 μ s und Blitzströme der Form 90/200 μ s verwendet. Bei jeder Prüfung sind jeweils 40 bis 50 MO-Widerstände eines Herstellers und einer Größe verwendet worden. In Einzelfällen wurde die Anzahl der geprüften MO-Widerstände bis auf 80 Stück erweitert. Von den für das Versuchsprogramm gelieferten MO-Widerständen sind bisher ca. 3200 Stück geprüft worden.

Um bei dieser großen Anzahl von MO-Widerständen eine zügige Durchführung zu gewährleisten, wurde eine pneumatische Prüflingsaufnahme entwickelt, die einen konstanten Anpressdruck auf die MO-Widerstände und einen zügigen Versuchsablauf gewährleistet. Um die

Bedingungen für jeden Versuch gleich zu halten und eventuelle Überschlagsprobleme durch beschädigte Elektroden auszuschließen, wurden für jeden Versuch zwei neue, 5 mm dicke Aluminium-Elektroden mit abgerundeten Kanten verwendet.

Die Versuche mit Wechselstrombelastung wurden alle bis zum mechanischen Ausfall durchgeführt. Hierzu wurden die MO-Widerstände solange mit Wechselspannung (Frequenz 50 Hz) beaufschlagt, bis sie mechanisch ausfielen. Dies ermöglichte unter anderem den direkten Vergleich mit früheren Untersuchungen und damit die Bewertung der Entwicklung der letzten 10 Jahre in der Fertigung von MO-Widerständen.

Für die Versuche mit Impulsstrombelastungen wurden, wie schon oben ausgeführt, Normprüfimpulse, wie sie zum Beispiel in [IEC 60099-4] beschrieben sind, verwendet. Da durch die Versuche die 50%-Ausfallenergie gefunden werden sollte, ergab sich, dass nicht alle MO-Widerstände bis zu ihrem Ausfall geprüft wurden. Dies machte jedoch eine differenziertere Bewertung der geprüften MO-Widerstände nötig, da keine eindeutige Klassifikation (defekt / intakt) durch eine rein visuelle Inspektion möglich war. Im Bereich der Impulsversuche wurde erstmals ein **komplexes Fehlerkriterium**, das die Änderung der Referenzspannung bewertet, eingeführt. Hierzu wurde ein standardisierter Versuchsablauf entwickelt, der sich aus einer Eingangsmessung zur Bestimmung der elektrischen Kennwerte der zu prüfenden MO-Widerstände und einer Ausgangsmessung nach erfolgter Prüfung zusammensetzt. Im Rahmen der Eingangsmessungen wurde die Referenzspannung U_{ref} bei einer vorgegebenen Referenzstromdichte von $J_{\text{ref}} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$ fünf Sekunden nach Anlegen der Spannung automatisch gemessen. Durch die Messung der Referenzspannung vor und nach der Prüfung mit Impulsbelastung sollten mögliche Änderungen im Material detektiert werden. Des Weiteren wurde im Rahmen der Eingangsmessung die Restspannung (Kurvenform 8/20 μs) beim Nennableitstoßstrom von 10 kA gemessen. Nach der Eingangsmessung wurde der eigentliche Energiebelastungsversuch durchgeführt. Im Anschluss an diesen Versuch erfolgte eine visuelle Inspektion des MO-Widerstandes, um mechanische Schädigungen wie Bruch, Durchschlag oder Überschlag zu erkennen. Wurde bei dieser Untersuchung kein mechanischer Schaden festgestellt, so wurden erneut die elektrischen Kenndaten am auf Raumtemperatur abgekühlten Widerstand gemessen. Diese Messungen erfolgten unter identischen Bedingungen wie bei der Eingangsmessung mit der einzigen Ausnahme, dass im Anschluss an die Restspannungsmessung noch eine Restspannungsmessung mit einem erhöhten Blitzstoßstrom (ebenfalls 8/20 μs) und einer Stromhöhe, die sich aus einer Stromdichte von $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ ergibt, durchgeführt wurde. Dieser Impuls wurde eingeführt, um Schäden an MO-Widerständen, die visuell nicht eindeutig zu identifizieren waren und deren elektrische Kenndaten sich nicht

geändert hatten, besser bewerten zu können. Nach intensiver Diskussion innerhalb der Arbeitsgruppe A3.17 wurde das folgende Kriterium für die Bewertung der Referenzspannungsänderung eingeführt. Wenn die Referenzspannung sich um mehr als 5 % geändert hat, wird der Widerstand als defekt gewertet. Dieses Kriterium ist gewählt worden, weil bei einer solchen Änderung von einer klaren Änderung der Materialcharakteristik ausgegangen werden kann. Sollte der Widerstand während der Ausgangsmessungen mit Blitzstoßströmen (8/20 μ s) der Stromhöhen 10 kA bzw. einer Stromhöhe korrespondierend zu einer Stromdichte von $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ mechanisch ausfallen, wurde er auch als defekt gewertet. Beide zusätzlich eingeführten Kriterien wurden nötig, um MO-Widerstände, die nach den Energiebelastungsprüfungen nicht eindeutig als mechanisch defekt zu identifizieren waren, zu bewerten. Zuletzt wurden Änderungen der Restspannung bewertet. Hatte sich die Restspannung eines Widerstandes nach der Energieprüfung um mehr als 5 % geändert, wurde er ebenfalls als defekt gewertet.

Die statistische Auswertung der gemessenen Daten erfolgte mit der Statistiksoftware MLM ("Multiple Level Method") für Impulsversuche und mit PSM ("Progressive Stress Method") für Wechselstromversuche. Die Software wird von der Firma Highvolt angeboten und ist speziell für hochspannungstechnische Anwendungen optimiert. Hierbei wird die Maximum-Likelihood-Methode zur Schätzung der Verteilungsparameter angewendet. Alle Auswertungen der Versuchsdaten wurden unter der Annahme einer Normalverteilung durchgeführt.

Unter Berücksichtigung des komplexen Fehlerkriteriums und nach der statistischen Auswertung ergeben sich Energieaufnahmevermögen (50 % Ausfallwahrscheinlichkeit) im Bereich von 1000 J/cm^3 . Das Energieaufnahmevermögen steigt mit kürzeren Impulszeiten, daher größeren Stromamplituden, deutlich an, bis sich ein limitierender Einfluss der Glasur bemerkbar macht. Für die Blitzstromimpulse der Form 90/200 μ s zeigten die MO-Widerstände von zwei Herstellern ein wesentlich geringeres Energieaufnahmevermögen, als bei Rechteckstoßströmen. Das Energieaufnahmevermögen der MO-Widerstände von Hersteller X stieg dagegen bei diesen Impulsen bis auf den höchsten insgesamt gemessenen Wert von 1700 J/cm^3 . Für Hochstoßstromimpulse der Form 4/10 μ s wurde das Kriterium der Referenzspannungsänderung dominant. Nahezu alle MO-Widerstände fielen bei diesen Impulsen durch eine Änderung der Referenzspannung aus. Es lässt sich allerdings ein großer Unterschied im Ausmaß der Änderung der Referenzspannung im Vergleich der Hersteller untereinander erkennen. Es wurden Referenzspannungsänderungen von bis zu 35 % beobachtet. Für die Wechselstromversuche zeigte sich ebenfalls, dass mit zunehmender Stromamplitude, daher kürzeren Ver-

suchsdauern, das volumenbezogene Energieaufnahmevermögen ansteigt. Dagegen sinkt das Energieaufnahmevermögen mit größeren Durchmessern der MO-Widerstände ab.

Abstract

The present work was performed in close contact to the Cigré Workgroup A3.17 "Surge Arresters". In this experimental research program, various energy handling tests on several thousand commercially available MO resistors used for high- and medium voltage arresters from different manufacturers from America, Europe and Japan have been performed. The focus was on the **single-impulse energy handling capability** of such MO resistors. The goal was to confirm and update the test results of various former investigations. Another goal was to document the state of the art in respect of the MO-resistor technology. For this purpose, the 50%-failure energies are compared.

Varistors from seven manufacturers worldwide (named as S, U, V, W, X, Y, Z) were tested. Two basically different sizes of varistors were investigated. The first size, denominated as "Size 1", is typically applied in 10 kA station class arresters of line discharge class 3. Their height is 40 mm to 45 mm and their diameter around 60 mm. The second size – "Size 2" – is typically applied in 10 kA distribution class arresters. Their height varies from approximately 30 mm to approx. 40 mm, their diameter is around 40 mm.

Eight different types of current stress were applied for testing: alternating current (50 Hz) at three levels of current amplitudes: ≈ 10 A, ≈ 100 A, ≈ 300 A, long-duration current impulses of about 1 ms, 2 ms and 4 ms time duration, high current impulse 4/10 μ s and lightning impulse discharge current 90/200 μ s. For each test, series 40...50 samples were tested. For various tests the sample number was even increased up to 80. Out of the total number of MO resistors that have been announced and delivered, respectively, for the test program, some 3200 pieces have been tested so far.

A pneumatic test fixture was developed to allow rapid testing and to ensure constant pressure on the MO-resistors. In order to ensure identical contact conditions for each test and to avoid flashover problems as a result of damaged electrodes, two new aluminium electrodes of 5 mm thickness with rounded edges were used for each test.

All tests with ac stress were carried out until mechanical by puncture or breaking occurred. The resistors were stressed with ac voltage (50 Hz) until they failed. These kinds of tests made it, among other things, possible to compare the results with former investigations and to demonstrate progress in MO resistor technology over the last 10 years.

All impulse tests were carried out with standard impulses according to [IEC 60099-4]. Therefore, not all tests led to mechanical failure. After such an impulse test had been carried out, it was not possible to determine the status of the resistor only by way of visual inspection. As a

consequence, a more sophisticated analysis was necessary. Regarding the impulse tests, for the first time a complex failure criterion taking into account the change of the reference voltage has been introduced and applied. For this purpose, a standardised test procedure including an initial and an exit measurement was developed. During these initial measurements the reference voltage U_{ref} in the leakage current range of the U - I -characteristics is measured automatically at a current I_{ref} corresponding to a peak current density of 0.12 mA/cm^2 , five seconds after application of the voltage. By measuring the reference voltage before and after testing changes in the material characteristic could be detected. Additional to the reference voltage test the residual voltage at $8/20 \mu\text{s}$ is measured at the nominal discharge current of 10 kA during the initial measurement. Following the initial measurement, the energy test is carried out.

Thereafter, the varistors are visually inspected to determine mechanical failure such as cracking, puncture or flashover. If no mechanical failure has occurred, the varistors are again tested for their electrical characteristics after cooling to ambient temperature. These measurements are performed exactly in the same way as the initial measurement, with one exception: one additional impulse current $8/20 \mu\text{s}$ at an increased discharge current corresponding to a current density of 1.5 kA/cm^2 is applied after the residual voltage test with 10 kA . Under this stress, any mechanical damage that could not be detected visually or electrically will lead to puncture or cracking of the respective varistor. After an intensive discussion in the working group A3.17 it has been decided that in case of a change of the reference voltage U_{ref} by more than 5% the varistor is considered as failed. This criterion has been introduced since such change in the voltage would constitute a clear change of the material characteristics. If the varistor failed mechanically during the exit tests with lightning current impulses ($8/20 \mu\text{s}$) of a peak current with 10 kA and with a peak current corresponding to a current density of $J = 1.5 \text{ kA/cm}^2$ respectively, it is also considered as failed. Both additional criteria became necessary since it was not possible to determine a tested varistor as passed or failed only by visual inspection. At last, the change of the residual voltage was stated. If the residual voltage had changed by more than 5% , the varistor was considered as failed.

The statistical analysis of the measured data was performed by using the statistical approach MLM (“Multiple Level Method”) for impulse tests and with the PSM (“Progressive Stress Method”) for ac-tests. A commercial software package from Highvolt was applied which is specially designed for statistical analyses of high voltage tests. The software uses the “Maximum-Likelihood Method” to estimate the parameters of a distribution. All test data was analysed under the assumption of a Gaussian distribution.

Regarding the complex failure criterion it was found that the single impulse energy handling capability (50 % failure energy) is about 1000 J/cm³. It increases with shorter time duration, hence with greater current density until the influence of the coating becomes noticeable. In relation to the 90/200 μs lightning impulses two manufacturers showed a significant lower energy handling capability than their energy handling capability in respect of long duration current impulses. The energy handling capability of the other manufacturer X instead continuously increases up to highest level of 1700 J/cm³. In relation to the 4/10 μs high current impulses the failure criterion of the reference voltage is the most likely cause of failure as nearly all varistors failed as a result the reference voltage change. A big difference between the manufacturers regarding the reference voltage can be seen. Reference voltage changes up to 35 % were found.

For the ac tests it was concluded that with increasing current density also the energy handling capability would increase. However, energy handling capability decreases for varistors with larger diameter.

1 Einleitung

Überspannungsableiter werden weltweit millionenfach zum Schutz von elektrischen Energieversorgungsnetzen gegen Überspannungen eingesetzt. Hierbei finden sie sowohl in Mittel- als auch in Hoch- und Höchstspannungsnetzen ihren Einsatz. Ein Überspannungsableiter ist heutzutage immer aus Metalloxid-Widerständen (kurz MO-Widerständen) zusammengesetzt. Diese bestehen im Wesentlichen aus Zinkoxid (ZnO), das einen Anteil von ca. 90 % am MO-Widerstand hat [Klein-04]. Als Dotierungsstoffe kommen mit einem Prozentanteil von zusammen ca. 10 % Wismutoxid (Bi_2O_3), Antimonoxid (Sb_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3), Kobaltoxid (CoO), Chromoxid (Cr_2O_3) und Manganoxid (MnO) zum Einsatz. Alle Inhaltsstoffe werden in Pulverform möglichst homogen vermischt und anschließend in zylindrische Formen gepresst. Danach werden diese Rohlinge bei einem genau vorgegebenen Temperaturprofil zwischen 1100 und 1400 °C zu einer Keramik gesintert. Nach dem Sintern werden sie geläppt (eine besondere Form des Schleifens) und danach mit einer Glasur an den Seiten sowie einer Aluminiumkontaktschicht auf der Ober- und Unterseite versehen. Die U - I Kennlinie eines solchen Ableiters ist stark nichtlinear (siehe **Abbildung 1.1**). Im Bereich der Bemessungsspannung ist der Strom gering und liegt im μA -Bereich. Steigt die Spannung an, so sinkt der elektrische Widerstand zunehmend ab, so dass ein höherer Strom fließt, wodurch die Spannung begrenzt wird.

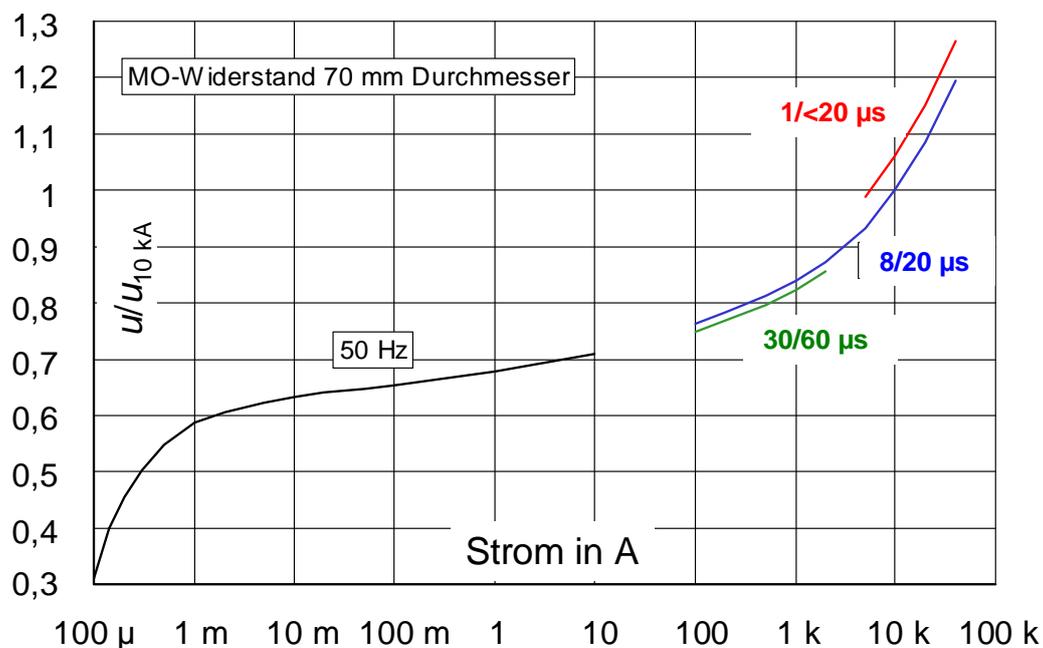


Abbildung 1.1: U - I Kennlinie eines MO-Widerstandes für verschiedene Stromformen / Quelle: Siemens

Der eigentliche Überspannungsableiter wird aus einer Reihenschaltung von MO-Widerständen gebildet. Die Restspannung und damit der Schutzpegel eines MO-Widerstandes ist mit seiner Bauhöhe verknüpft. Die Höhe des Aktivteils eines Überspannungsableiters hängt also vom gewünschten Schutzpegel ab. Das Energieaufnahmevermögen hängt vom Volumen und damit bei gegebener Bauhöhe vom Durchmesser ab. MO-Widerstände für Mittelspannungsnetze haben infolgedessen einen Durchmesser von etwa 30 bis 40 mm, während MO-Widerstände für Hochspannungsnetze einen Durchmesser von 60 bis 105 mm haben. **Abbildung 1.2** gibt ein Beispiel für das Design von Überspannungsableitern. Hierbei ist links ein direkt vergossenes und rechts ein Design mit Stickstoff als Isoliermedium dargestellt. Die MO-Widerstände werden bei beiden Varianten mit GFK-Stäben miteinander verspannt.

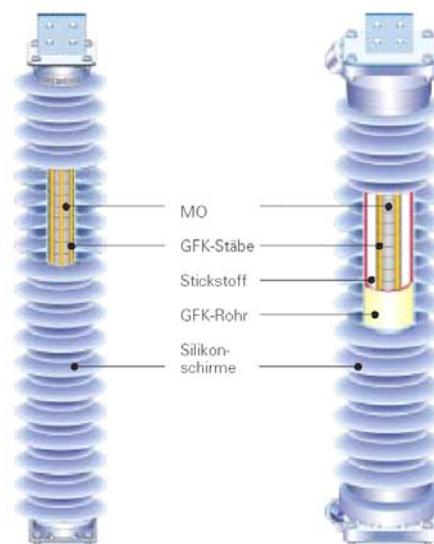


Abbildung 1.2: Beispiele für Ableiterdesigns, links: direkt vergossen, rechts: mit Stickstoff-isolation / Quelle: Siemens

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen solcher MO-Widerstände für verschiedene Belastungsarten (Impuls- und Wechselstrombelastung) untersucht. Hierzu kamen mehr als 3200 MO-Widerstände von sieben führenden Herstellern aus den USA, Europa und Japan zur Prüfung. Im Verlauf der Arbeit wird fast immer die spezifische Energie, also die auf ein Volumen bezogene Energie betrachtet. Der Einfachheit halber wird dabei fast immer nur die Bezeichnung „Energie“ anstelle der eigentlich korrekteren Bezeichnung „volumenbezogene Energie“ verwendet.

2 Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit der Cigré-Arbeitsgruppe A3.17 “Surge Arresters“, deren Mitglied der Autor zu dieser Zeit war. Ziel dieser Arbeitsgruppe war es, die Belastungen, denen Überspannungsableiter unterliegen, zu evaluieren und aus den daraus gewonnenen Daten Vorschläge für die weitere Normungsarbeit zu erarbeiten. Eine weitere Aufgabe der Arbeitsgruppe bestand darin, eine technische Publikation herauszubringen, die sich mit für Anwender interessanten Fragenstellungen in Bezug auf Überspannungsableiter befasst und diese detailliert aufgreift. Der Vorgänger dieser Publikation war die Cigré-Brochure TB 60 “Metal oxide arresters in AC systems“ aus dem Jahre 1991 [Cigr-91]. Nach 17 Jahren, in denen funkenstreckenlose MO-Überspannungsableiter in großer Zahl in den elektrischen Energieversorgungsnetzen Einzug gehalten haben und ihre technische Entwicklung große Fortschritte gemacht hat, soll die neue Publikation unter anderem einen Überblick über den Stand der Technik geben.

Zusätzlich sollten auch die verschiedensten Belastungen, denen ein Überspannungsableiter ausgesetzt sein kann, berücksichtigt werden. So beschäftigte sich ein Aspekt der Untersuchungen mit den neusten Erkenntnissen der Blitzforschung und den sich daraus ergebenden Anforderungen an Überspannungsableiter. Ein weiterer Aspekt, dem zum Beispiel in Japan eine besondere Bedeutung zukommt, ist die Belastung des Überspannungsableiters durch Erdbeben. Hierzu wurden unterschiedliche Prüfverfahren und Anforderungen aus unterschiedlichen Ländern verglichen und diskutiert.

Um den Stand der Technik zu dokumentieren, sollte auch das Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen näher untersucht werden. Aufgabe des Autors war es dabei, in enger Abstimmung mit der Arbeitsgruppe das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Widerständen zu untersuchen. Bis zu dieser Untersuchung waren nur wenige Veröffentlichungen zu diesem Thema bekannt und die durchgeführten Untersuchungen hatten zumeist einen geringen Umfang hinsichtlich der Anzahl der untersuchten MO-Widerstände. Auch wurden zumeist nur MO-Widerstände weniger Hersteller untersucht. Daher entschloss man sich, ein großes Projekt zur Untersuchung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens ins Leben zu rufen. An der Untersuchung waren sieben führende Hersteller aus den USA, Europa und Japan beteiligt. Die Arbeit verfolgte zwei wesentliche Ziele: zum einen sollte mit den Untersuchungen der derzeitige Stand der Technik dokumentiert werden, zum anderen sollte die Untersuchung auch wertvolle Hinweise für die weitere Normungsarbeit liefern, für die die Cigré-Arbeitsgruppe Vorarbeit leistet. Im Rahmen der Normungsarbeit stellt sich immer wie-

der die Frage, welche Prüfprozeduren noch zeitgemäß sind und welche erweitert oder gegebenenfalls auch vereinfacht werden können. Um hierzu Aussagen machen zu können, wurden die aus den Normen bekannten Standardprüfimpulse zur Prüfung sowie zur Bewertung der MO-Widerstände verwendet. Um neue Tendenzen im Bereich der Anwendung von Überspannungsableitern zu berücksichtigen, wurde ebenfalls ein neu in die Norm [IEC 60099-4] aufgenommenen Impuls (90/200 μ s), der die besondere Beanspruchung von in den Verlauf von Freileitungen eingebauten Überspannungsableitern, den sogenannten Leitungsableitern, berücksichtigt, zur Prüfung der MO-Widerstände verwendet.

Zusätzlich zu diesen genormten Prüfimpulsen wurde zusätzlich die Energieaufnahme bei Wechselstrombeanspruchung geprüft. Diese ist interessant, da diese Belastung bei manchen Anwendungen, wie zum Beispiel der Serienkompensation von Freileitungen, auftritt, aber auch, weil diese Art der Prüfung eine besonders einfache Prüfung des Energieaufnahmevermögens darstellt. Dies könnte eine wesentliche Vereinfachung von Prüfprozeduren ermöglichen. Um den Stand der Technik umfassend dokumentieren zu können, wurden sowohl MO-Widerstände, die in Hochspannungsnetzen eingesetzt werden (im Weiteren Größe 1 genannt), als auch MO-Widerstände, welche in Mittelspannungsnetzen Einsatz finden (im Weiteren Größe 2 genannt), untersucht, ebenfalls wurde dadurch der mögliche Einfluss des „Aspect ratios“ (= Verhältnis von Höhe zu Durchmesser) untersucht. Diese Widerstandsarten unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Größe (die Hochspannungs-MO-Widerstände hatten einen Durchmesser von ca. 60 mm, während die Mittelspannungs-MO-Widerstände einen Durchmesser von ca. 40 mm aufwiesen) als auch in der Art der Belastung, denen sie während des Betriebs ausgesetzt sind. Diese Überlegungen führten schließlich zu einem Versuchsprogramm mit folgenden Prüfungen:

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Prüfungen für Größe 1 bzw. Größe 2

Prüfung	Größe 1 Hochspannungs-MO- Widerstände	Größe 2 Mittelspannungs-MO- Widerstände
Rechteckstoßstrom 1 ms	x	x
Rechteckstoßstrom 2 ms	x	x
Rechteckstoßstrom 4 ms	x	x
Hochstoßstromimpuls 4/10 μ s		x
Blitzstoßstromimpuls 90/200 μ s	x	x
Wechselstrom mit einer Strom- höhe von 10 A	x	
Wechselstrom mit einer Strom- höhe von 100 A	x	
Wechselstrom mit einer Strom- höhe von ca. 200...300 A	x	

Der Umfang der Prüfungen betrug dabei 40 bis 80 MO-Widerstände pro Belastungsform. Die durchgeführten Untersuchungen sollten die 50 %-Ausfallenergien in Abhängigkeit von der Impulsform herausarbeiten, zusätzlich sollte untersucht werden, inwieweit bei Stichproben dieses Umfangs (40 bis 80 Stück) auf die Verteilungsfunktion zurück geschlossen werden kann.

Die Auswertung der Daten dieses Prüfprogramms liefert auch eine Antwort auf die häufig von Anwendern gestellte Frage, wie hoch das Energieaufnahmevermögen eines MO-Widerstandes bei einmaliger Belastung ist. Allerdings sei hierbei erwähnt, dass die Untersuchung keine Aussage über die thermische Stabilitätsgrenze eines Ableiters treffen kann, da diese vom Design des Ableiters und dessen Bemessungs- und Dauerspannung abhängt. Allerdings können die durchgeführten Referenzspannungsbewertungen Hinweise auf mögliche Probleme mit der thermischen Stabilität geben. Es wurden nur die Materialeigenschaften der verwendeten ZnO-Keramiken und deren Glasur (engl. "coating") untersucht. Ebenfalls kann die Frage, welches Energieaufnahmevermögen ein in solcher Weise belasteter Widerstand nach der Prüfung noch aufweist mit Hilfe dieser Untersuchung, nicht beantwortet werden.

3 Energieaufnahmevermögen von MO-Ableitern - Stand des Wissens

3.1 Stand der Normung

Die Hauptaufgabe von Überspannungsableitern besteht im Schutz von elektrotechnischen Einrichtungen, wie z.B. Transformatoren, vor atmosphärisch bedingten Überspannungen sowie dem Schutz gegen durch Schalthandlungen hervorgerufenen Überspannungen. Im Gegensatz zu den früher verbreiteten SiC-Ableitern mit integrierter Funkenstrecke bezieht sich diese Arbeit ausschließlich auf Ableiter aus ZnO-Material. Bei den Betrachtungen zum Energieaufnahmevermögen müssen zwei grundsätzlich verschiedene Sachverhalte betrachtet und sauber von einander getrennt werden:

1. Das **Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen**. Hierbei wird durch einen einzelnen Impuls Energie in den MO-Widerstand eingebracht. Diese innerhalb von Mikrosekunden bis Millisekunden eingebrachte Energie führt zu einer starken Erwärmung und damit Ausdehnung des ZnO-Materials. Aus diesem mechanischen Stress können kleinste Risse im Material resultieren, die bis zum Bruch des Widerstands führen können.
2. Eine völlig andere Betrachtung des Energieaufnahmevermögens stellt das **thermische Energieaufnahmevermögen** dar, welches für die Konstruktion von Ableitern von besonderem Interesse ist. Hierbei geht es um die Energie, welche in einen Ableiter eingebracht werden kann, ohne dass dieser beim Betrieb am Netz thermisch instabil wird.

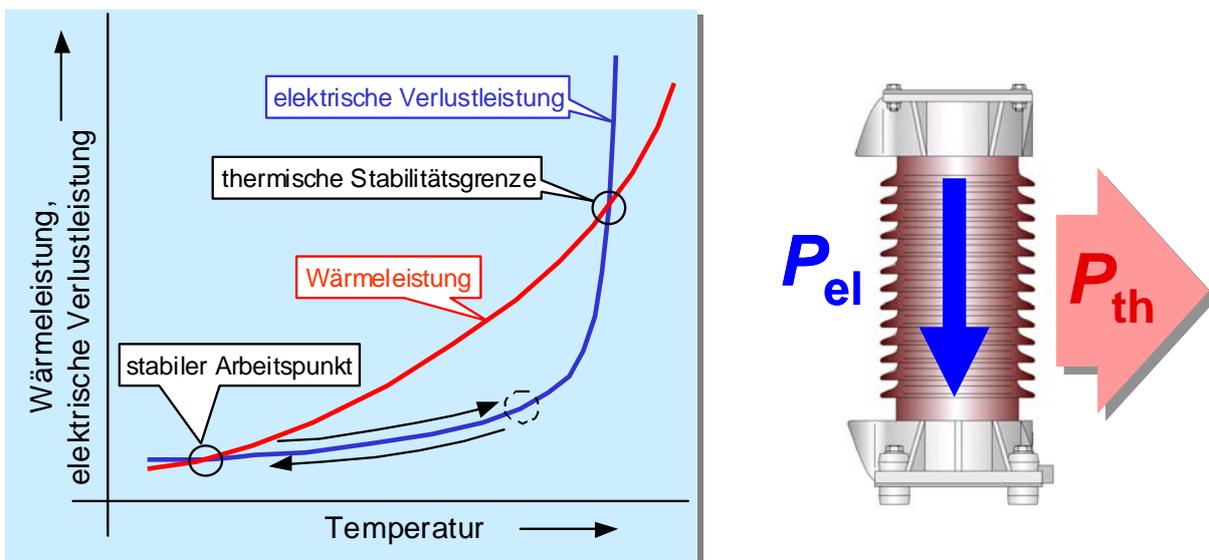


Abbildung 3.1: Zur thermischen Stabilität eines Ableiters (Quelle: [Hinr-00])

Durch Energieeintrag heizt sich der Ableiter auf. Dieser Temperaturanstieg führt aufgrund des NTC-Verhaltens dazu, dass mehr elektrische Wirkleistung im Ableiter umgesetzt wird. Ist der Ableiter aufgrund seiner Dimensionierung in der Lage, mehr Wärme durch sein Gehäuse nach außen abzugeben, als aufgrund von elektrischer Wirkleistung in ihm erzeugt wird, so wird er wieder abkühlen und erreicht nach einiger Zeit wieder seinen stabilen Arbeitspunkt (siehe **Abbildung 3.1**). Wurde allerdings soviel Energie in den Ableiter eingebracht, dass infolge der erhöhten Temperatur mehr Verlustleistung in dem Ableiter erzeugt wird, als dieser über sein Gehäuse nach außen abgeben kann, so wird er sich weiter erwärmen, was schließlich zu seiner Zerstörung führt. Diese thermische Grenzenergie wird unter anderem von der Wahl der Bemessungsspannung U_r , der Dauerspannung U_c sowie dem Gehäuseaufbau beeinflusst. Die thermische Stabilitätsgrenze liegt bei üblichen Ableiterkonstruktionen bei 170...200 °C [Hir-00]. Um hieraus auf den dazugehörigen Energieeintrag zurück zuschließen, können die empirisch gefundenen Ergebnisse von Lat (siehe [Lat-83]) verwendet werden. Nach Lat gilt folgender Zusammenhang für die Wärmekapazität eines MO-Widerstandes:

$$C = V \cdot (C_0 + \alpha \cdot T) \quad (3.1)$$

C : Wärmekapazität in J/K

V : Volumen in cm^3

C_0 : spezifische Wärmekapazität ($\text{ZnO} = 2,59 \text{ J}/(\text{cm}^3\text{K})$)

α : Temperaturkoeffizient der Wärmekapazität ($\text{ZnO} = 0,0044 \text{ J}/(\text{cm}^3\text{K}^2)$)

T : Temperatur in °C

Für die Wärmeenergie gilt folgender Zusammenhang von der Temperatur (siehe [Kuch-95]):

$$Q = W = C \cdot T \quad (3.2)$$

Q : Wärmehalt in J

W : Wärmeenergie in J

Aus Gleichung (3.1) und Gleichung (3.2) ergibt sich damit folgender Zusammenhang zwischen dem auf das Volumen bezogenen Energieinhalt eines MO-Widerstandes und seiner Temperatur:

$$\frac{W}{V} = T \cdot 2,59 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3 \cdot \text{K}} + 0,0044 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3 \cdot \text{K}^2} \cdot T^2 \quad (3.3)$$

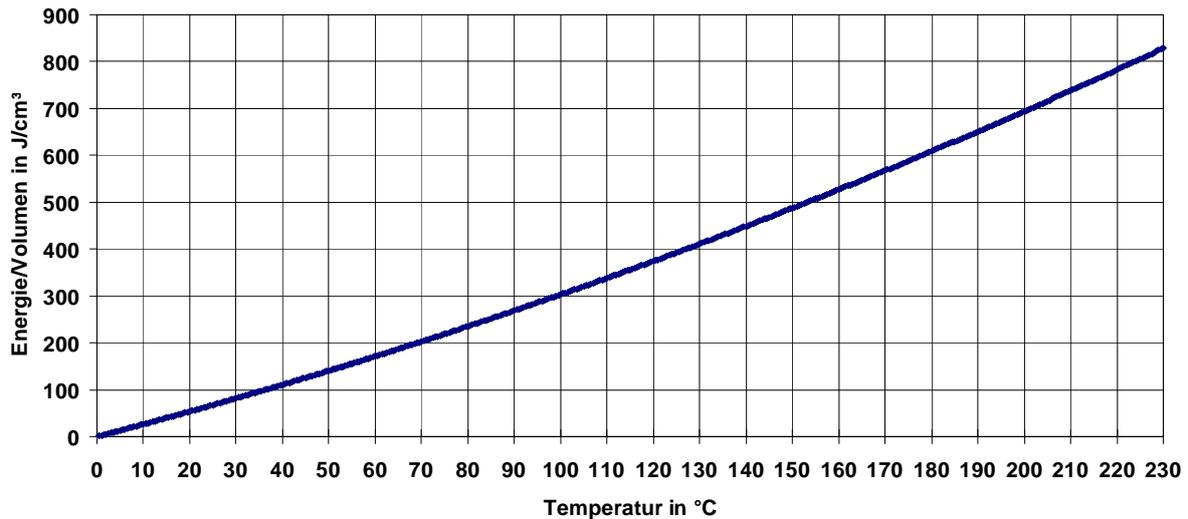


Abbildung 3.2: Zusammenhang zwischen der Energie pro Volumen und der Temperatur eines MO-Widerstandes (nach [Lat-83])

Abbildung 3.2 stellt den Zusammenhang zwischen der Energie pro Volumen und der Temperatur eines MO-Widerstandes aus Gleichung (3.3) dar. Geht man nun von einer thermischen Stabilitätsgrenze von 170 °C für einen Ableiter und einer Ableiterstarttemperatur von 40 °C aus, so ergibt sich ein maximaler möglicher Energieeintrag von 455 J/cm³ bis zur thermischen Stabilitätsgrenze. Hierbei wurde ein adiabatischer Vorgang vorausgesetzt, was für kurze Impulse zulässig ist. Erfolgt der Energieeintrag langsamer, wie es zum Beispiel bei zeitweiligen Überspannungen (engl. TOV “Temporary overvoltage“) der Fall ist, so kann der Ableiter schon während des Energieeintrags Wärme nach Außen abführen, wodurch er mehr Energie bis zum Erreichen seiner thermischen Stabilitätsgrenze umsetzen kann. Wie sich im Gespräch mit Herstellern von Ableitern ergab, sind die derzeit für die Konstruktion von Ableitern zu Grunde gelegten Energien aus Sicherheitsgründen allerdings deutlich niedriger. Sie liegen im Bereich um 200 J/cm³ für einzelne Impulse, wobei die thermische Grenze etwa bei 400 bis 700 J/cm³ liegt. Die angesetzte Auslegungsenergie von 200 J/cm³ korreliert dabei mit einer sehr niedrigen Ausfallrate von weniger als 0,01 %. Das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen eines MO-Widerstandes liegt deutlich oberhalb der thermischen Grenzenergie eines Ableiters. Bei der Untersuchung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens von MO-Widerständen wird eine deutlich höhere Energie als die thermische Grenzenergie eines Ableiters eingebracht, da nach dem Einbringen der Energie keine Spannung mehr an dem Widerstand anliegt und somit auch keine thermische Instabilität auftreten kann. Es ergibt auch keinen Sinn, eine thermische Grenzenergie für einen MO-Widerstand anzugeben, da dieser Wert überhaupt erst nach Auswahl der Bemessungs- und Dauerspannung sowie der Festlegung des Gehäusedesigns ermittelt werden kann.

In der wichtigsten Norm für funkenstreckenlose Ableiter [IEC 60099-4] geht das Energieaufnahmevermögen nur indirekt ein. In der Norm werden 5 Leitungsentladungsklassen definiert. Deren Grundannahme ist, dass sich eine auf eine Schaltüberspannung aufgeladene Freileitung in Form eines Wanderwellenvorgangs in den Ableiter entlädt [Hintr-00]. Der Strom durch den Ableiter wird dabei durch die Spannungshöhe und den Wellenwiderstand bestimmt. Die Stromflussdauer ist abhängig von der Länge der Leitung und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Eine solche Entladung hat im Idealfall einen rechteckförmigen Stromverlauf zur Folge, welcher im Labor durch einen sogenannten Kettenleiter oder auch Langwellengenerator, in Form eines Rechteckstoßstromes, nachgebildet wird (siehe auch Kapitel 5.2).

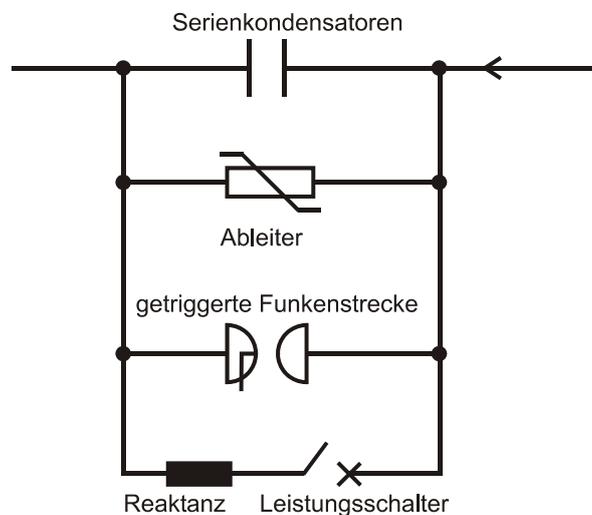


Abbildung 3.3: Schutzkonzept für Serienkompensationskondensatoren

Die Leitungsentladungsklassen (siehe auch Tabelle 2) leiten sich also aus der klassischen Anwendung eines Ableiters, der an eine Freileitung angeschlossen ist, ab. Damit ist die derzeitige Definition der Energieaufnahme über Leitungsentladungsklassen allerdings nicht geeignet, die Anforderungen heutiger Spezialanwendungen, wie Serienkompensationsanlagen, Leitungsableiter, Filterableiter in HGÜ-Anwendungen etc, abzudecken. Abbildung 3.3 zeigt beispielsweise das Schutzkonzept für Serienkompensationskondensatoren, die zur elektrischen Verkürzung von Freileitungen eingesetzt werden. Tritt ein Kurzschluss auf, so fließt der gegenüber dem Nennstrom der Kondensatoren wesentlich höhere Kurzschlussstrom. Dadurch würde die Spannung über den Kondensatoren soweit ansteigen, dass diese zerstört werden. Im ersten Moment schützt daher eine Ableiterbank die Kondensatoren vor dieser Überspannung. Kurz danach wird bei Bedarf (d.h. bei einer zu erwartenden energetischen Überlastung der Ableiter) eine Funkenstrecke gezündet, die die Ableiterbank entlastet. Als letztes überbrückt ein Leistungsschalter schließlich die Kondensatoren. Eine solche Ableiterbank zum Schutz von Serienkompensationskondensatoren kann aus mehreren tausend MO-Widerständen beste-

hen. Bei diesen Ableitern ist die Belastung im Falle eines Erdschlusses auf der Leitung eine Wechselstrombelastung, die völlig unterschiedlich zu jener ist, die in einer Leitungsentladungsklasse nachgebildet wird. In der Norm fehlt ebenso eine Definition für eine Leitungsentladungsklasse für UHV-Systeme mit einer maximalen Betriebsspannung $U_m > 800$ kV.

Die Norm [IEC 60099-4] definiert zwei Prüfungen zum Bereich des Energieaufnahmevermögens, die „Prüfung mit Rechteckstoßstrom“ und die „Arbeitsprüfung“. Im Weiteren wird nur noch auf Ableiter mit einem genormten Nenn-Ableitstoßstrom von 10 bzw. 20 kA eingegangen, da nur diese für die vorliegende Arbeit interessant sind.

Die Prüfung mit Rechteckstoßstrom besteht aus der Belastung des Ableiters mit 18 Rechteckstoßströmen, die in jeweils 6 Gruppen à 3 Stößen eingebracht werden. Die Zeit zwischen den Stößen soll zwischen 50 und 60 s betragen. Zwischen den einzelnen Gruppen soll der Prüfling auf Umgebungstemperatur abkühlen. Die durch einen Stoß einzubringende Energie ist dabei vor Beginn der Prüfung zu ermitteln und die Prüftechnik entsprechend einzustellen. Für Ableiter mit einem Nennableitstrom von 10 bzw. 20 kA ab Leitungsentladungsklasse 2 wird dazu zunächst nach folgender Gleichung die mit einem Rechteckstoßstrom zuzuführende Energie bestimmt:

$$W = U_{\text{res}} \cdot (U_L - U_{\text{res}}) \cdot \frac{1}{Z} \cdot T \quad (3.4)$$

W : während des Rechteckstoßes zugeführte Energie

U_{res} : niedrigster Wert der an den drei Prüflingen gemessenen Restspannung bei Schaltstoßstrom mit der niedrigsten in Tabelle 3 angegebenen Stromstärke

U_L : Ladespannung

U_r : Bemessungsspannung des Prüflings in kV (Effektivwert)

Z : Wellenwiderstand der Leitung in Ω

T : Scheiteldauer in μs

Zur Berechnung sind zusätzlich die Daten aus den folgenden Tabellen zu entnehmen:

Tabelle 2: Werte für die Prüfung mit Rechteckstoßstrom an 20-kA und 10-kA-Ableitern nach [IEC 60099-4]

Ableiter-Einteilung	Leitungsentladungsklasse	Wellenwiderstand der Leitung Z in Ω	Scheiteldauer T in μs	Ladespannung U_L (Gleichspannung) in kV
10 kA	1	$4,9 U_r$	2000	$3,2 U_r$
10 kA	2	$2,4 U_r$	2000	$3,2 U_r$
10 kA	3	$1,3 U_r$	2400	$2,8 U_r$
20 kA	4	$0,8 U_r$	2800	$2,6 U_r$
20 kA	5	$0,5 U_r$	3200	$2,4 U_r$

Tabelle 3: Schaltstoßströme für Restspannungsprüfung nach [IEC 60099-4]

Ableiter-Einteilung	Strom-Scheitelwert in A
20 kA, Leitungsentladungsklassen 4 und 5	500 und 2000
10 kA, Leitungsentladungsklasse 3	250 und 1000
10 kA, Leitungsentladungsklassen 1 und 2	125 und 500

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn sich die vor und nach der Prüfung gemessenen Restspannungen um nicht mehr als 5 % unterscheiden und keine Beschädigungen an den MO-Widerständen erkennbar sind.

Die zweite Prüfung, die sich mit dem Energieaufnahmevermögen von Ableitern [IEC60099-4] beschäftigt, ist die **Arbeitsprüfung**. In der Arbeitsprüfung geht es um den Nachweis der thermischen Stabilität eines dauerhaft am Netz arbeitenden Ableiters.

Die Arbeitsprüfung besteht aus vier Teilen:

- Anfangsmessung,
- Konditionierung,
- Arbeitsprüfung,
- Abschlussmessung und Überprüfung.

Vor Beginn der Arbeitsprüfung müssen in einem zeitraffenden Alterungsversuch (1000 h) die erhöhten Prüfspannungen U_c^* , U_r^* bestimmt werden. Hierbei sollen die durch Alterung bedingte evtl. erhöhte Verlustleistung eines Ableiters im Betrieb an neuen MO-Widerständen nachgebildet werden. Den Ablauf einer Arbeitsprüfung für 10-kA-Ableiter der Leitungsentladungsklassen 2 und 3 bzw. 20-kA-Ableiter der Leitungsentladungsklassen 4 und 5 zeigt **Abbildung 3.4**. Hierbei wird während der Anfangsmessung zunächst die Restspannung bei Nennableitstoßstrom (10 oder 20 kA) ermittelt. Danach erfolgt eine Konditionierung des Ab-

leiters mit 20 Blitzstoßströmen (8/20 μ s) bei Nennableitstoßstrom, eingebracht in 4 Gruppen à 5 Stößen, mit anliegender 1,2-facher Dauerspannung¹. Nach Abkühlen des Widerstandes wird der Ableiter mit zwei Hochstoßströmen (4/10 μ s) 100 kA belastet, wobei der Ableiter zwischen den Stößen auf Umgebungstemperatur abkühlen kann. Vor dem nächsten Abschnitt der Arbeitsprüfung wird der Ableiter im thermischen Äquivalent auf $(60 \pm 3) ^\circ\text{C}$ erwärmt. Danach folgt ein Rechteckstoßstrom, durch welchen die zuvor ermittelte Energie eingebracht wird (siehe auch Tabelle 2). Nach einer Pause von 50 bis 60 s erfolgt ein zweiter Rechteckstoßstrom, mit dem dann die gesamte Energie eingebracht sein muss. Danach muss so schnell wie möglich (innerhalb von 100 ms) eine Spannung in Höhe der erhöhten Bemessungsspannung U_r^* an den Ableiter angelegt werden. Nach 10 s wird die Spannung auf eine Spannung in Höhe der erhöhten Dauerspannung U_c^* reduziert, diese liegt dann für weitere 30 min an.

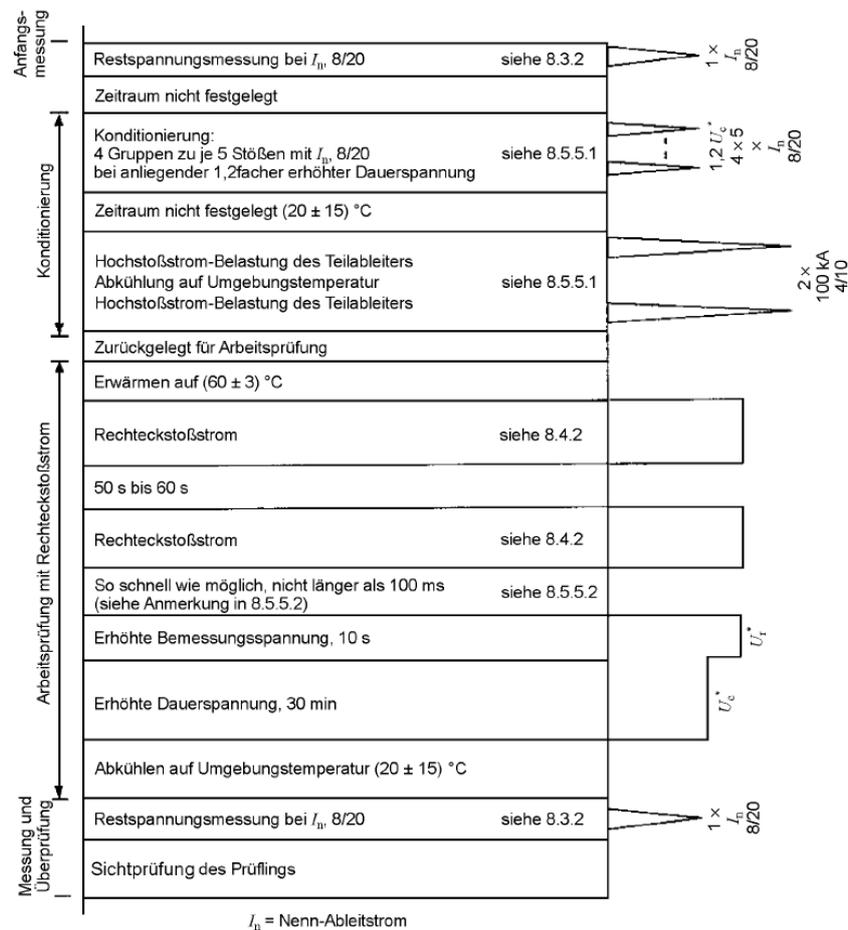


Abbildung 3.4: Ablaufplan einer Arbeitsprüfung für Ableiter mit 10 kA Nennableitstoßstrom der Leitungsentladungsklassen 2 und 3 und Ableiter mit Nennableitstoßstrom 20 kA der Leitungsentladungsklassen 4 und 5 (Quelle: [DIN EN 60099-4])

¹ Dieser Teil der Norm stammt noch aus der Zeit der SiC-Ableiter mit Funkenstrecke. Hiermit sollte eine Alterung der Funkenstrecke simuliert werden.

Am Ende der Prüfung, nach dem Abkühlen des Prüflings, wird erneut die Restspannung gemessen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn während des Anliegens der Wechsellspannung thermische Stabilität nachgewiesen wird, der Strom also abklingt, die Messungen der Restspannungen um nicht mehr als 5 % voneinander abweichen und keine Schäden an den MO-Widerständen zu erkennen sind. Die gesamte Arbeitsprüfung ist an einem thermischen Äquivalent durchzuführen. Bei einem thermischen Äquivalent handelt es sich um ein speziell für die Arbeitsprüfung angefertigtes Gehäuse, welches das gleiche thermische Verhalten wie der zu prüfende Ableiter aufweist. Zumeist handelt es sich um einen Ausschnitt aus dem Originalableiter, welcher oben und unten besonders gut thermisch isoliert ist, um eine Wärmeabgabe in axialer Richtung zu unterbinden. Die Gleichheit des thermischen Verhaltens von Ableiter und thermischem Äquivalent muss von dem Hersteller vor der Prüfung (siehe [IEC 60099-4] – Annex B) nachgewiesen werden.

Neben dieser Art der Arbeitsprüfung gibt es auch noch eine Arbeitsprüfung für 10-kA Ableiter der Leitungsentladungsklasse 1 und 5-kA, 2,5-kA bzw. 1,5-kA Ableitern, die sich von der eben beschriebenen unterscheidet (für nähere Informationen siehe [IEC 60099-4]). Eine weitere Variante, die allerdings nicht sehr häufig zur Anwendung kommt, ist in Anhang C der [IEC 60099-4] beschrieben. Sie betrifft Ableiter im Spannungsbereich 1 kV bis 52 kV mit hohen Blitzstrombelastungen.

Eine weitere Prüfprozedur zum Energieaufnahmevermögen stellt die neu in Anhang N der Norm aufgenommene Prüfung mit Blitzströmen der Dauer 200 μ s dar. Hierzu wird ein Impuls definiert, welcher näherungsweise einer halben Sinusschwingung entspricht und dessen Dauer etwa bei 200 μ s liegt. Die Basisbreite, die Zeit in der der Strom größer als 5 % des Maximalwertes ist, soll dazu etwa zwischen 200 und 230 μ s liegen. Dieser neue Impuls soll die Lücke zwischen dem Blitzstoßstromimpuls 8/20 μ s und den Rechteckimpulsen von einigen Millisekunden Dauer schließen. Hintergrund ist der zunehmende Einsatz von Leitungsableitern (engl. TLA "Transmission line arrester") in Freileitungen mit einer Nennspannung > 52 kV. Die dort zu erwartenden Blitzstrombelastungen von mehreren 10 μ s Dauer bei geschirmten und mehreren 100 μ s Dauer bei ungeschirmten Leitungen weichen stark von den Maßgaben der Prüfung mit Rechteckstoßstrom sowie denen der Arbeitsprüfung ab. Daher wurde dieser neue Impuls als Kompromiss für diese Anwendung in die Norm aufgenommen. Die Energie eines Impulses soll gemäß der Leitungsentladungsklasse des Ableiters (2 bis 5) nicht höher als das Doppelte der Energie eines Rechteckstoßstromes sein. Die Prüfung selbst wird dann in starker Anlehnung an die Prüfung mit Rechteckstoßstrom durchgeführt. Es werden 18 Stöße, in 6 Gruppen à 3 Stößen, eingebracht. Zwischen den Gruppen soll der Prüfling auf Umge-

bungstemperatur abkühlen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die vor und nach der Prüfung gemessene Restspannung um nicht mehr als 5 % voneinander abweicht und keine Schäden an den MO-Widerständen erkennbar sind.

Sowohl für diese Prüfung, als auch für die Arbeitsprüfung und die Prüfung mit Rechteckstoßstrom sind jeweils 3 Ableiter bzw. Tei­lableiter zu testen. Nur bei Bestehen aller 3 Prüflinge gilt die Gesamtprüfung als bestanden.

Eine weitere international verbreitete Norm zu Überspannungsableitern ist die [IEEE C62.11-2005]; in ihr werden ähnliche Prüfprozeduren wie in der [IEC 60099-4] verwendet. Für Unterschiede und Gemeinsamkeiten sei zum einen auf die Normen selbst sowie auf die Veröffentlichung [Hir-07] verwiesen.

3.2 Stand der Forschung

Schon seit der Ablösung von Funkenstrecken zum Überspannungsschutz durch SiC-Ableiter stellt sich die Frage nach dem Energieaufnahmevermögen von Ableitern. In einem Vergleich zwischen SiC- und ZnO-Ableitern kommt Sakshaug (siehe [Saks-89]) zu dem Schluss, dass ZnO-Widerstände ein höheres Energieaufnahmevermögen besitzen als SiC-Widerstände. Als Energieaufnahmevermögen für ZnO-Ableiter gibt er ca. 170...200 J/cm³ an. Wie schon weiter oben ausgeführt, handelt es sich dabei somit nicht um eine mechanische Zerstörungsgrenze, sondern um eine vom Design des Gehäuses und der Wahl der Dauer- und Bemessungsspannung abhängigen Grenze. Sakshaug verweist weiterhin auf die Beobachtung von höheren Energieaufnahmen (im Bereich von 450...700 J/cm³), allerdings bei Wechselstrombeanspruchung von 60 Hz und einer Stromdichte um 2 A/cm². Hierbei handelt es sich aber um zerstörende Prüfungen, die keine thermische Stabilität berücksichtigen.

Eine der ersten experimentellen Untersuchungen des Energieaufnahmevermögens stammt von Eda (siehe [Eda-84]). Untersucht wurden dabei MO-Widerstände mit Durchmessern zwischen 10...115 mm und Höhen zwischen 1...20 mm. Indes handelt es sich hierbei nicht um am Markt erhältliche, sondern um von Eda selbst hergestellte MO-Widerstände. Hierzu wurde ZnO-Material (96,4 %) mit anderen Inhaltsstoffen z.B. Bi₂O₃ (1 %), CoO (1 %) etc. 24 Stunden lang gemischt und danach bei einem Druck von 250...400 kg/cm² zu Scheiben gepresst. Diese Scheiben wurden anschließend 2 Stunden lang bei 1250 °C gesintert und danach auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach dem Läppen der Oberflächen wurden die obere und untere Fläche mit einer Aluminiumschicht versehen. Die so hergestellten MO-Widerstände untersuchte Eda auf ihr Energieaufnahmevermögen. Er fand zwei Fehlermoden: Bruch und Durch-

schlag. Überschlag als Fehlerursache berichtete er jedoch nicht. Die Darstellung seiner experimentellen Ergebnisse bezieht er im Wesentlichen auf Scheiben einer Höhe von 1,3 mm; nur ein Ergebnis bezieht sich auf Scheiben von 114 mm Durchmesser und einer Höhe von 10 mm.

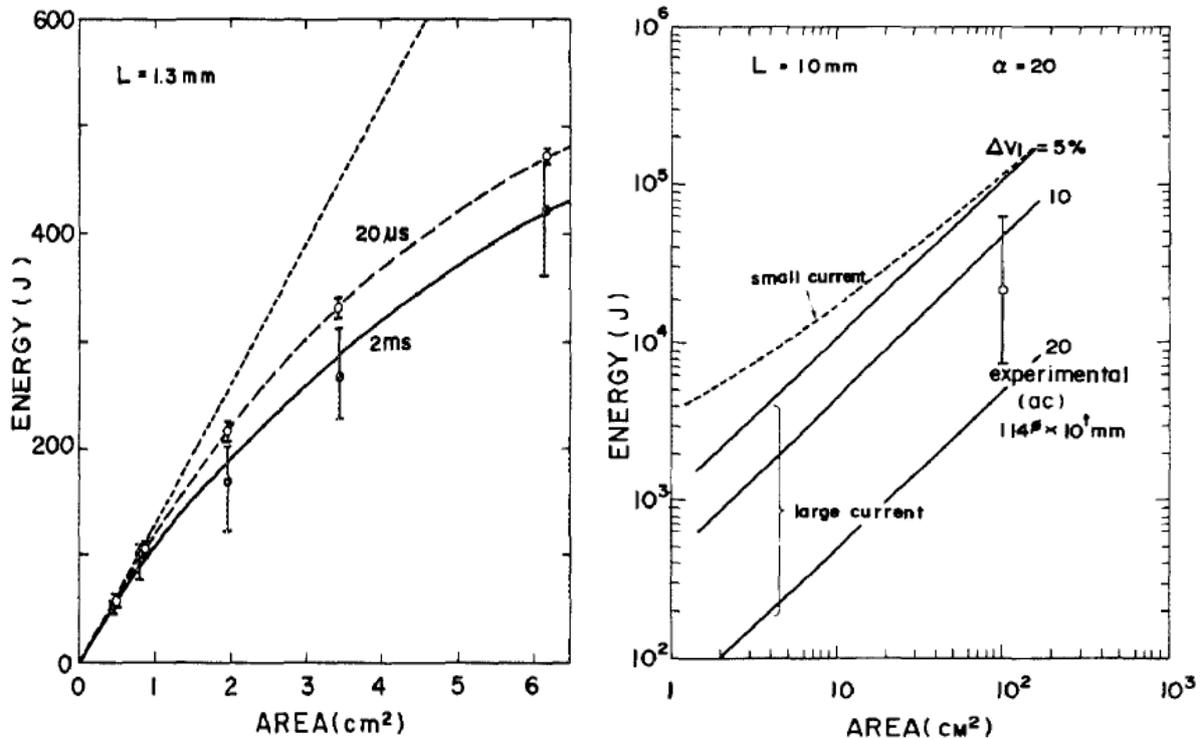


Abbildung 3.5: Versuchsergebnisse nach [Eda-84], links: Energieaufnahmevermögen von Scheiben der Höhe 1,3 mm, rechts: Energieaufnahmevermögen von Scheiben der Größe: $\varnothing = 114$ mm, Höhe = 10 mm (das Diagramm enthält nur einen Messpunkt)

Abbildung 3.5 zeigt Versuchsergebnisse aus [Eda-84] für verschiedene MO-Widerstände. Der linke Teil des Bildes bezieht sich auf MO-Widerstände der Höhe 1,3 mm. Rechnet man die dort gemessenen Energiewerte auf das Volumen der MO-Widerstände um, so ergibt sich etwa ein Energieaufnahmevermögen von 750 J/cm^3 für MO-Widerstände der Fläche 1 cm^2 (Durchmesser ca. 1,1 cm) und ein Energieaufnahmevermögen für MO-Widerstände der Fläche 6 cm^2 (Durchmesser ca. 2,76 cm) von ca. 520 J/cm^3 (2-ms-Impuls) bzw. 615 J/cm^3 (20-µs-Impuls). Es zeigt sich also, dass mit größerem Durchmesser und damit größerem Volumen das volumenbezogene Energieaufnahmevermögen absinkt. Ursächlich dafür dürfte eine produktionstechnisch bedingte Zunahme von Inhomogenitäten im Material sein. Auch heute werden MO-Widerstände aus diesem Grund nur bis zu einem Durchmesser von etwa 100 mm gefertigt. Ein weiterer, aus den Untersuchungen von Eda zu entnehmender Effekt ist die Zunahme des Energieaufnahmevermögens bei kürzeren Impulsen. Zum Beispiel weisen die MO-Widerstände mit einer Fläche von 6 cm^2 bei einer Belastung mit 20-µs-Impulsen ein etwa 18 % höheres Energieaufnahmevermögen als bei 2-ms-Impulsen auf. Für den im rechten Bild

dargestellten Widerstandstyp der Größe: $\varnothing = 114$ mm, Höhe = 10 mm ergibt sich ein Energieaufnahmevermögen von ca. 215 J/cm^3 bei einer Belastung mit Wechselstrom von etwa 100 A. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses müssen allerdings zwei Umstände berücksichtigt werden. Zum einen fertigte Eda fast nur MO-Widerstände mit einer Höhe von 1,3 mm an, was darauf hinweist, dass seine produktionstechnischen Möglichkeiten besonders für diese Höhe geeignet waren und somit bei MO-Widerständen der Höhe 10 mm und einem Durchmesser von 114 mm mit einem starken Anstieg von Inhomogenitäten zu rechnen ist. Zum anderen fällt das Energieaufnahmevermögen bei Wechselstrombelastung, in Abhängigkeit der Stromhöhe, im Vergleich zum Impulsenergieaufnahmevermögen, ab. Daher kann aus diesem Messpunkt (siehe Abbildung 3.5 rechts) keine eindeutige Schlussfolgerung gezogen werden. Der Vergleich von Edas Ergebnissen (aus den 1980er Jahren) mit den Ergebnissen neueren Untersuchungen ist auch aufgrund der Dimensionen der von Eda verwendeten Prüflinge schwierig; gerade bei sehr dünnen Scheiben von nur 1,3 mm Höhe spielt die Kontaktierung eine entscheidende Rolle, da hierüber ein signifikanter Teil der eingebrachten Energie thermisch abgegeben werden kann.

Eine Untersuchung, die der vorliegenden Arbeit am nächsten kommt, wurde von Ringler durchgeführt (siehe [Ring-97]). Ringler untersuchte 350 kommerzielle ZnO-Widerstände von drei verschiedenen Herstellern auf ihr Energieaufnahmevermögen, wobei er jeweils 25...50 MO-Widerstände pro Testreihe verwendete. Die verwendeten MO-Widerstände hatten eine Höhe von 23...24 mm und einen Durchmesser von 62...64 mm. Die Bemessungsspannung der MO-Widerstände lag bei etwa 3 kV. Es wurden Prüfungen mit Langwellenimpulsen und mit Wechselstrom (60 Hz) durchgeführt. Jede Prüfung wurde bis zur Zerstörung des Prüflings ausgeführt. Dies ist, zumindest was die Impulsprüfungen angeht, ein wesentlicher Unterschied zu der hier vorliegenden Arbeit, bei der ein komplexes Fehlerkriterium angewendet wurde (siehe auch Kapitel 7.1.1). Die Prüflinge wurden in einer pneumatischen Prüflingsaufnahme eingespannt, bei der oben und unten Wärmeisolationsscheiben verwendet wurden, um axialen Wärmefluss zu unterbinden.

Tabelle 4: Prüfprogramm nach [Ring-97]

Stromamplitude in A	Stromform
0,8	60 Hz
7	
70	
600	
4000	Rechteckstoßstrom
35000	

Tabelle 4 zeigt das Prüfprogramm nach [Ring-97]. Es wurden Wechselstromprüfungen mit einer Stromamplitude von 0,8...600 A und Rechteckstoßstromprüfungen mit einer Stromamplitude von 4...35 kA durchgeführt. **Tabelle 5** gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Prüfungen für Hersteller 3. Die grau eingefärbten Spalten wurde in dieser Arbeit hinzugefügt, um eine Darstellung der mittleren Stromdichte und der mittleren Ausfallenergie in J/cm³ zu erhalten. Dies wurde erreicht, indem die Angaben von Ringler, die als Strom bzw. Energie vorlagen, durch eine Fläche von 31,17 cm² bzw. durch ein Volumen von 73,3 cm³ dividiert wurden. Die Fläche ergab sich aus dem von Ringler angegebenen mittleren Durchmesser von 63 mm, das Volumen ergab sich unter Berücksichtigung einer mittleren Höhe von 23,5 mm.

Tabelle 5: Übersicht der Ergebnisse der Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers 3 nach [Ring-97]²

Anzahl der Prüflinge in Stück	Mittlere Stromdichte in A/cm ²	Mittlere Ausfallenergie in J/cm ³
19	0,03	463
24	0,24	440
49	2,15	645
47	20,72	808
47	139,55	1038
55	1129,20	1692

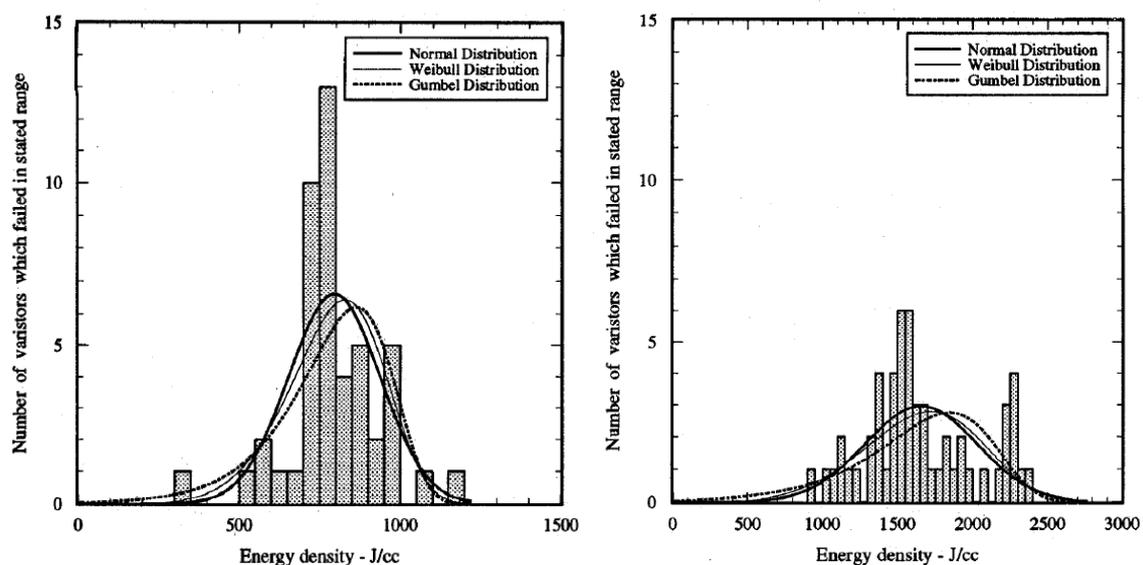


Abbildung 3.6: Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen des Herstellers 3 nach [Ring-97], links: Wechselstrombelastung 60 Hz – Stromamplitude 600 A, rechts: Rechteckstoßstrombelastung – Stromamplitude 35 kA

² Die grau eingefärbten Spalten wurden für diese Arbeit ergänzt.

Abbildung 3.6 zeigt die Anzahl der Ausfälle über der eingebrachten Energie für MO-Widerstände des Herstellers 3 nach [Ring-97]. Der linke Teil des Bildes bezieht sich dabei auf die Prüfungen mit Wechselstrom (60 Hz) bei einer Amplitude von ca. 600 A. Die Ergebnisse der Prüfungen mit Rechteckstoßstrom bei einer Amplitude von 35 kA sind dem rechten Bild zu entnehmen. In beiden Bildteilen sind die genäherten Dichtefunktionen für folgende Verteilungen

- Normalverteilung,
- Weibullverteilung,
- Gumbelverteilung

dargestellt. Die Berechnung der Verteilungsparameter erfolgte durch die Anwendung der Maximum Likelihood Methode (siehe auch Kapitel 4.1). Wie Ringler berichtet und wie auch zu erkennen ist, deckt keine der Verteilungsfunktionen die Ergebnisse vollständig ab. Daher schlägt Ringler die Verwendung der Normalverteilung (siehe auch Kapitel 4) vor, um die Versuchsergebnisse zu vergleichen. Vergleicht man beide Abbildungen, erkennt man eine deutliche Zunahme des Energieaufnahmevermögens mit steigender Stromstärke und damit abnehmender Zeitdauer. Lag die mittlere Energie bei den Versuchen mit 600 A Wechselstrom noch bei ca. 800 J/cm^3 , so liegt sie bei den Versuchen mit Rechteckstoßströmen von 35 kA schon bei ca. 1700 J/cm^3 . Es liegt folglich mehr als eine Verdopplung des Energieaufnahmevermögens zwischen diesen beiden Belastungsarten vor. Diese Tendenz deckt sich mit den Ergebnissen von Eda, bei welchem auch schon ein Anstieg bei kürzeren Impulsdauern und damit höheren Stromdichten festzustellen war.

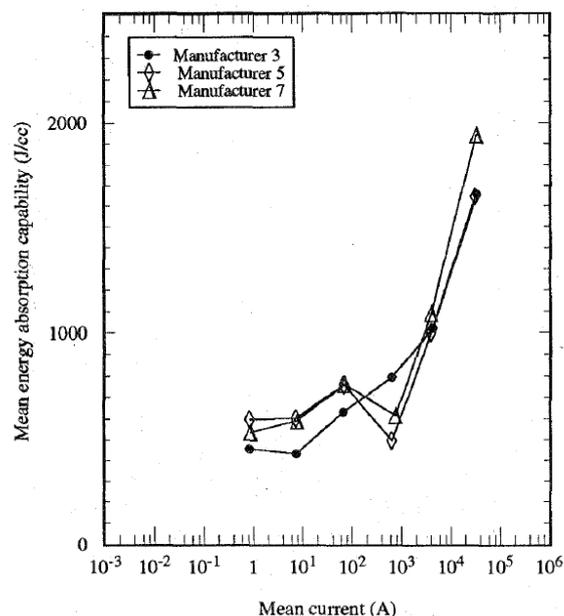


Abbildung 3.7: Ergebnisse der Prüfungen für Hersteller 1-3 nach [Ring-97]

Abbildung 3.7 zeigt die Ergebnisse an MO-Widerständen der Hersteller 3, 5, 7 nach [Ring-97], wobei das mittlere Energieaufnahmevermögen durch Anwendung einer Normalverteilung ermittelt wurde. Es ist deutlich ein Trend zu erkennen, dass das Energieaufnahmevermögen mit steigender Stromstärke ansteigt. Lediglich die MO-Widerstände der Hersteller 5 und 7 zeigen eine Schwäche bei der 600-A-Wechselstromprüfung.

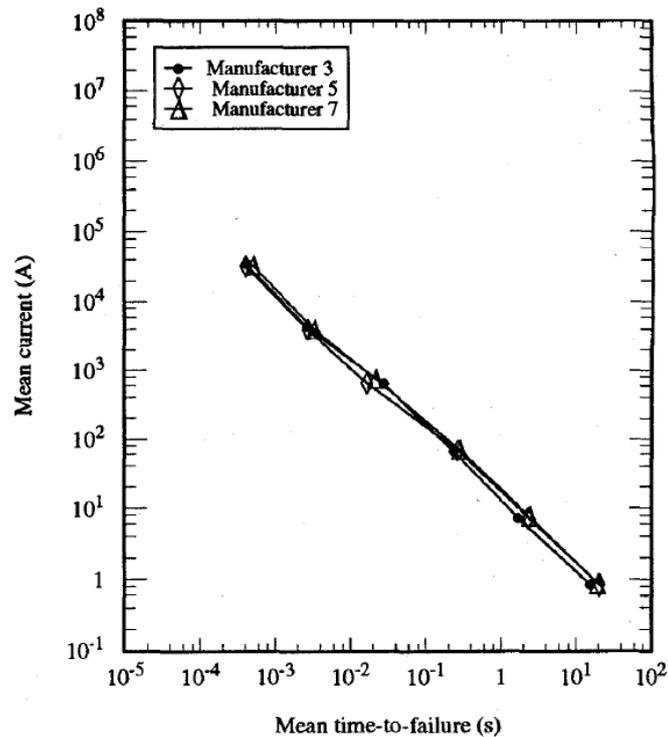


Abbildung 3.8: Mittlere Stromamplitude über mittlerer Dauer bis zum Ausfall nach [Ring-97]

Abbildung 3.8 zeigt die mittlere Stromamplitude während der Prüfungen als Funktion der mittleren Dauer bis zum Ausfall für MO-Widerstände verschiedener Hersteller nach [Ring-97]. Die Skalierung der Achsen ist doppeltlogarithmisch. Es ergibt sich in dieser Darstellung für jeden Widerstandstyp eine Gerade. Es ist allerdings kritisch anzumerken, dass Unterschiede in den Messwerten durch die logarithmische Darstellung nicht so stark in Erscheinung treten, wie dies zum Beispiel bei einer linearen Skalierung der Fall wäre. Da bei dieser Darstellung nur der Strom und nicht auch die Spannung über dem MO-Widerstand berücksichtigt wird, kann das Energieaufnahmevermögen der MO-Widerstände nicht direkt aus dem Diagramm entnommen werden. Bei gleicher Restspannung, auch wenn diese von ihrem Wert her unbekannt sein sollte, kann allerdings ein Vergleich des Energieaufnahmevermögens abgeleitet werden. So würden MO-Widerstände mit einem höheren Energieaufnahmevermögen in dem Graphen zu einer größeren Stromhöhe hin verschoben sein. Besonders geeignet ist die doppelt logarithmische Darstellung von Ringler für die vorab durchgeführte Abschätzung von

Prüfdauern bzw. Stromhöhen bei Untersuchungen im Labor. Sind zum Beispiel die Daten von Wechselstromprüfungen bei 300 und 100 A bekannt, kann leicht auf die zu erwartende Prüfdauer bei einer Wechselstromprüfung mit 10 A geschlossen werden. Ringler berichtet, dass für die Wechselstromprüfungen die Prüflinge hauptsächlich durch Durchschlag in der Nähe des Randes ausfielen. Bei den Impulsstromprüfungen mit 35 kA berichtet Ringler von kleinen Löchern, die auf der Oberfläche der Elektroden, einschließlich des Außenrandes, auftreten. Er stellt weiterhin dar, dass vielfach Durchschlag als Fehler aufgetreten ist oder sich "tracking"-Spuren am Rand des Widerstandes zeigten. Nur selten sei das Phänomen des Bruchs zu beobachten gewesen. Die kleinen Löcher am Außenrand der Metallisierung, die er beschreibt, könnten eventuell auf die Ausführung der Metallisierung zurückzuführen sein.

Boggs et al. (siehe Bogg-00]) haben das Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen in Abhängigkeit von der Metallisierung der Aluminiumkontaktoberflächen untersucht.

Ziel dieser Untersuchungen war es, herauszufinden, ob die Metallisierung bis an den Rand des Widerstandes ausgeführt werden oder ob zwischen der Metallisierung und dem Rand des MO-Materials ein kleiner Abstand verbleiben sollte und welche Auswirkungen dies auf das Energieaufnahmevermögen hat. Die Simulation in **Abbildung 3.9** zeigt einen Schnitt durch einen MO-Widerstand und den Temperaturverlauf innerhalb des MO-Materials bei einem Energieeintrag von 250 J/cm^3 und einer Starttemperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Es ist deutlich eine erhöhte Temperatur an der Kante der Metallisierung zu erkennen. [Bogg-00] schlägt als optimalen Randabstand 0,3...0,6 mm vor, ein kleinerer Randabstand scheint ihm hingegen nicht sinnvoll, da dieser die dielektrische Festigkeit reduziere.

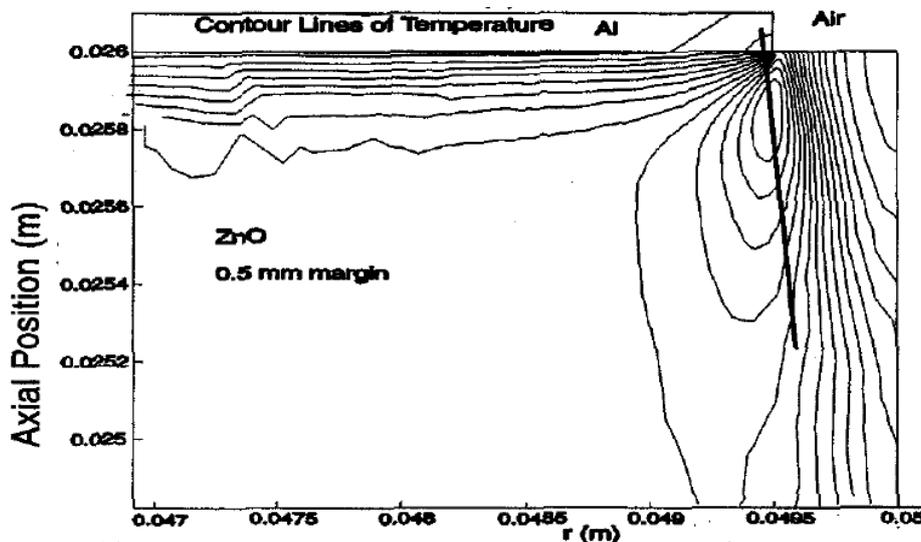


Abbildung 3.9: Temperaturverlauf an der Metallisierungskante eines MO-Widerstandes nach [Bogg-00]

Die Untersuchungen von Boggs haben gezeigt, dass die Metallisierung eines MO-Widerstandes einen Einfluss auf dessen maximales Energieaufnahmevermögen hat. Beginnt die Metallisierung zu weit entfernt vom eigentlichen Rand des MO-Widerstandes, so kann am Rand der Metallisierung eine zu hohe Stromdichte auftreten, die die Entwicklung eines Durchschlagkanals begünstigt.

Die Simulation des Energieaufnahmevermögens ist von Bartkowiak et al. [Bart-96] intensiv bearbeitet worden. In [Bart-96] werden zwei Typen von MO-Widerständen simuliert. Zum einen MO-Widerstände mit einer Höhe von 45 mm und einem Durchmesser von 32 mm, wie sie in Mittelspannungsnetzen (amerik. distribution-class) zum Einsatz kommen, sowie MO-Widerstände mit einer Höhe von 23 mm und einem Durchmesser von 63 mm, wie sie in Hochspannungsnetzen (amerik. station-class) zum Einsatz kommen. Bartkowiak betrachtet dabei auch das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser, den sogenannten "aspect-ratio". Als Fehlerkriterium unterscheidet er zwischen Durchschlag und Bruch sowie thermischer Instabilität. Für den Wärmetransport zieht er nur die radiale Abgabe von Wärme mit der Begründung in Betracht, dass bei einem realen Ableiter auch praktisch keine Wärme in axialer Richtung abgegeben wird, weil die MO-Widerstände ober- und unterhalb des betrachteten Widerstandes etwa die gleiche Temperatur aufweisen. Mögliche Inhomogenitäten des Materials berücksichtigt er durch einen Kanal in der Mitte des simulierten Widerstandes, wobei er für diesen Kanal eine um 5 % reduzierte Varistorspannung ansetzt. Um den Energieeintrag zu simulieren, setzt er einen Gleichstrom an, der das Material aufheizt. Eine weitere Randbedingung ist die freie Ausdehnungsmöglichkeit des Widerstandes in axialer Richtung, so dass er also keiner statischen Vorspannung unterliegt. Hierbei ist jedoch kritisch anzumerken, dass in einer realen Ableiterkonstruktion die MO-Widerstände verspannt montiert werden, was einer etwaigen Expansion Grenzen setzt und damit eine andere Verteilung von Zug- und Druckkräften erzeugt.

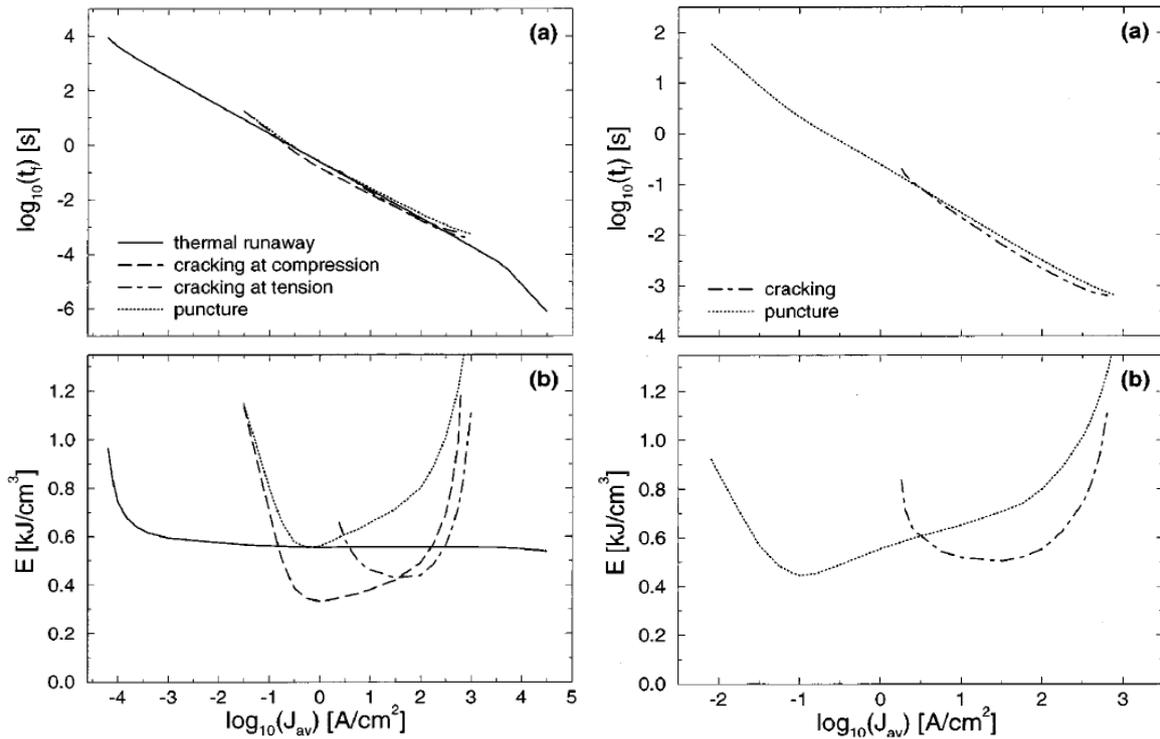


Abbildung 3.10: Ergebnisse der Simulationen des Energieaufnahmevermögens nach [Bart-96], links: Mittelspannungs-MO-Widerstände (“distribution-class“), rechts: Hochspannungs-MO-Widerstände (“station-class“)

Abbildung 3.10 zeigt das Ergebnis der Simulationen nach [Bart-96]. Im linken Bildteil sind die Ergebnisse für Mittelspannungs-MO-Widerstände (“distribution-class“) und im rechten Bildteil die Ergebnisse für Hochspannungs-MO-Widerstände (“station-class“) dargestellt. Die Bilder mit der Beschriftung (a) zeigen die Zeitdauer bis zum Ausfall über der Stromdichte. In den Bildteilen mit der Beschriftung (b) ist das Energieaufnahmevermögen abhängig vom Ausfallmechanismus über der Stromdichte abgetragen. Die Simulationen ergeben ein Minimum im Energieaufnahmevermögen abhängig von der Ausfallart. Für Mittelspannungs-MO-Widerstände ist aus Abbildung 3.10 ein Minimum des Energieaufnahmevermögens mit etwa 310 J/cm^3 bei einer Stromdichte von ca. 1 A/cm^2 abzulesen. Hierbei tritt Bruch (“cracking“) als Fehlerart auf. Mit steigenden Stromdichten steigt dann das Energieaufnahmevermögen an. Für die Fehlerart Durchschlag (“puncture“) liegt das Minimum des Energieaufnahmevermögens in etwa auch bei einer Stromdichte von 1 A/cm^2 , allerdings bei einer höheren Ausfallenergie von ca. 600 J/cm^3 . Für thermische Instabilität beginnt die Kurve im Bereich sehr kleiner Stromdichten ($< 0,0001 \text{ A/cm}^2$) bei ca. 980 J/cm^3 und sinkt dann auf einen fast konstanten Wert von ca. 580 J/cm^3 über den gesamten Stromdichtebereich von $0,001 \text{ A/cm}^2$ bis 50 kA/cm^2 ab. Anzumerken ist hierbei, dass thermische Instabilität für sich genommen keine Ausfallart ist, sondern diese einen Prozess einleitet, der am Ende zum Versagen des MO-

Widerstandes führt. Während für Mittelspannungs-MO-Widerstände das Minimum des Energieaufnahmevermögens, sowohl für Bruch als auch für Durchschlag, in etwa bei einer Stromdichte von 1 A/cm^2 auftrat, treten diese Minima des Energieaufnahmevermögens bei Hochspannungs-MO-Widerständen bei unterschiedlichen Stromdichten auf. Für den Durchschlag errechnet Bartkowiak ein Minimum des Energieaufnahmevermögens bei etwa 420 J/cm^3 bei einer Stromdichte von ca. $0,1 \text{ A/cm}^2$. Das Energieaufnahmeminimum für Bruch liegt mit ca. 500 J/cm^3 etwas höher und tritt bei einer Stromdichte von ca. 20 A/cm^2 auf. In einer anderen Publikation führt Bartkowiak (siehe [Bart-99]) die Ergebnisse seiner Simulationen noch einmal genauer aus und trifft eine Aussage über Zug- und Druckkräfte im Material. **Abbildung 3.11** zeigt den von Bartkowiak simulierten Temperatur- und Kräfteverlauf in einem MO-Widerstand bei einer angenommenen Stromdichte von $6,3 \text{ A/cm}^2$. Für das Versagen des Widerstandes setzt er dabei folgende Kriterien an:

- Zugspannung S in axialer Richtung größer als $70 \cdot 10^3 \text{ psi} \approx 483 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ führt zu Bruch,
- Zugspannung S in tangentialer Richtung größer als $20 \cdot 10^3 \text{ psi} \approx 138 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ führt zu Bruch,
- mittlere Temperatur im MO-Widerstand größer als $190 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu thermischer Instabilität,
- Temperatur des Kanals in der Mitte größer als $800 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu thermischen Durchschlag.

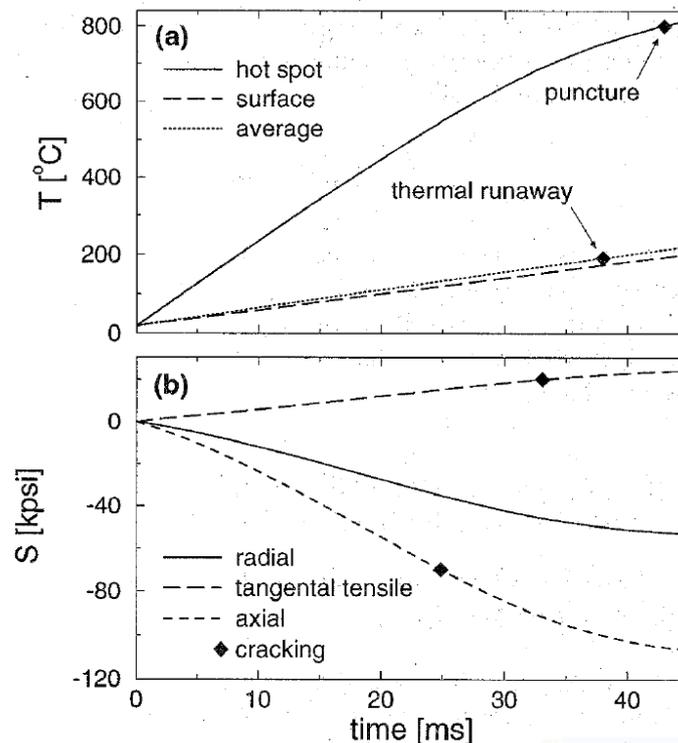


Abbildung 3.11: Temperatur- und Kräfteverlauf in einem MO-Widerstand nach [Bart-99]

Bartkowiak hat neben seinen Aufsätzen zum Energieaufnahmevermögen auch eine Publikation zur Simulation des elektrischen Verhaltens von MO-Widerständen auf Grundlage eines Voronoi-Modells³ verfasst. In [Bart-96a] modelliert er das elektrische Verhalten auf Grundlage eines zwei-dimensionalen zufällig erzeugten Voronoi-Netzwerkes. Dieses setzt er aus drei Bestandteilen zusammen (siehe auch **Abbildung 3.12**):

- gute ("good") Korngrenzen mit stark nichtlinearer Kennlinie,
- schlechte ("bad") Korngrenzen mit schlechter Nichtlinearität,
- niederohmige ("ohmic") Korngrenzen.

Weitere Ausführungen zu dieser Modellbildung finden sich auch in [Bart-96b].

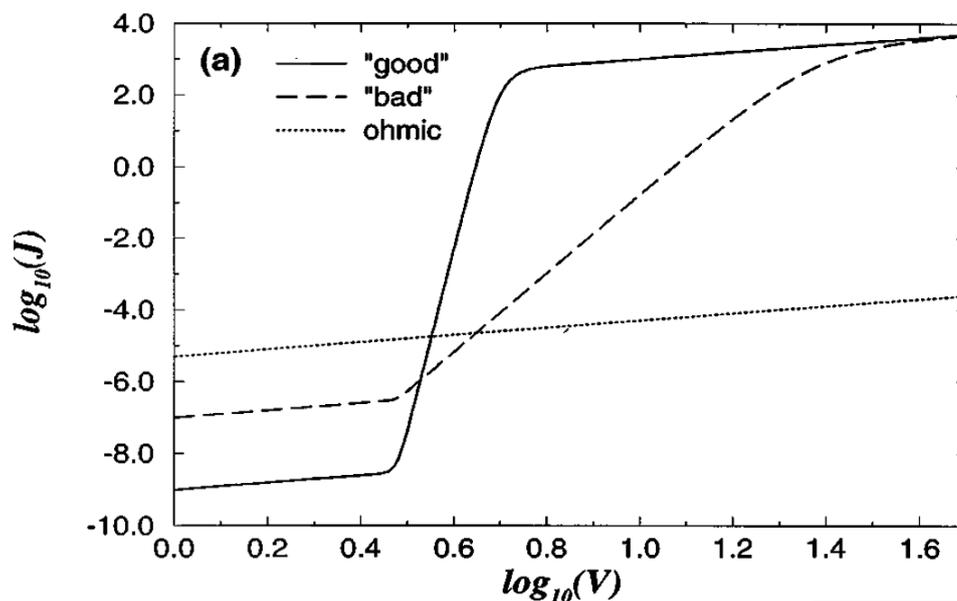


Abbildung 3.12: Drei Typen von Korngrenzen zur Simulation des Verhaltens eines ZnO-Varistors nach [Bart-96a]

Eine der neuesten Untersuchungen zum Thema Energieaufnahmevermögen stammt aus China von He (siehe [He-07]). He berichtet von Prüfungen mit kommerziell hergestellten Varistoren zweier unterschiedlicher Größen: Typ A mit einer Höhe von 10 mm und einem Durchmesser von 32 mm und Typ B ebenfalls mit einer Höhe von 10 mm und einem Durchmesser von 52 mm. Für Rechteckstoßstromprüfungen mit 2 bzw. 8 ms Länge gibt He Bruch und Durchschlag als dominierende Ausfallarten an. Für die MO-Widerstände mit einem Durchmesser von 32 mm nennt He, im Vergleich zu Ringler, erstaunlich niedrige Energieaufnahmevermögen.

³ Voronoi-Polygone nach dem russischen Mathematiker Georgi Feodosjewitsch Woronoi (1868-1908).

Voronoi-Polygone werden in der Materialwissenschaft benutzt, um eine zufällige Anordnung von Kristallen in einem polykristallinen Material zu simulieren - als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen.

Quelle: www.wikipedia.de (9.6.2008)

gen zwischen 216 bis 575 J/cm³. He führt auch Simulationen zum Energieaufnahmevermögen durch und verfolgt dabei einen ähnlichen Ansatz wie [Bart-96a] mit einem 2-D-Voronoi-Modell, um den Einfluss von Inhomogenitäten auf das Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen zu simulieren. He untersucht damit unter anderem den Einfluss der Stromhöhe und der Inhomogenität und deren Zusammenhang.

Verdolin (siehe [Verd-92]) berichtet von Prüfungen mit kommerziell hergestellten MO-Widerständen eines brasilianischen Herstellers. Die MO-Widerstände besaßen eine Höhe von 22 mm und einen Durchmesser von 53 mm. Die Dauerspannung der MO-Widerstände lag bei 2,5 kV und ihr Nennableitstoßstrom bei 10 kA. Leider gibt Verdolin keine Werte für das Energieaufnahmevermögen an, sondern beschränkt sich auf eine unskalierte Darstellung mit grundsätzlichen Tendenzen (siehe **Abbildung 3.13**). Auffällig ist hierbei, dass die dargestellten Tendenzen allen anderen bisher bekannten Ergebnissen widersprechen. Sowohl die experimentellen Untersuchungen von Ringler als auch die Simulationen von Bartkowiak weisen einen Anstieg des Energieaufnahmevermögens bei steigender Stromdichte aus. Bei Verdolin hingegen fällt das Energieaufnahmevermögen mit steigendem Strom ab.

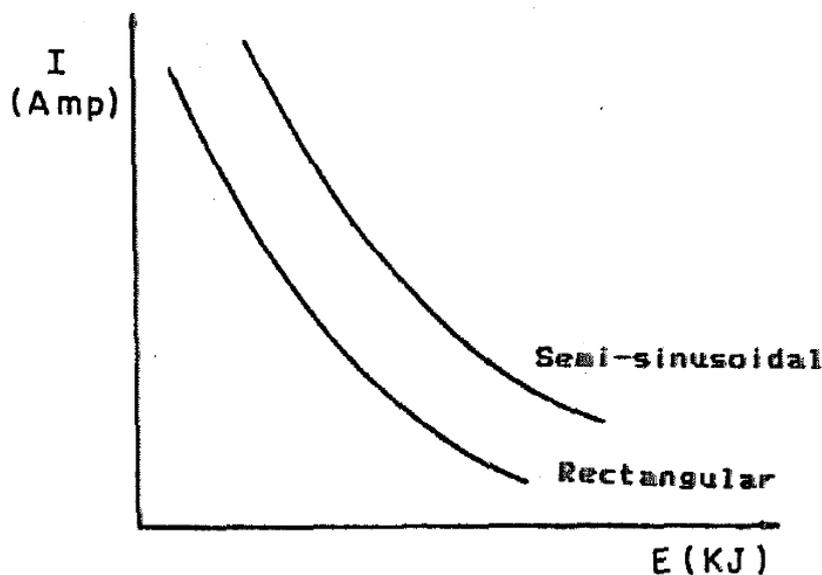


Abbildung 3.13: Tendenzen des Energieaufnahmevermögens nach [Verd-92]

Alle weiteren Ausführungen des Aufsatzes beziehen sich auf mögliche Verfahren zur Evaluierung des Energieaufnahmevermögens. Die sogenannte Multi Level Method (MLM) (siehe auch Kapitel 4.4) wird hierbei als die zweckmäßigste Methode zur Evaluierung des Energieaufnahmevermögens herausgearbeitet.

Darveniza (siehe [Darv-98]) untersucht das Verhalten von Ableitern bei multipler Impulsbelastung. Dabei wurden 21 porzellanisierte Ableiter von 6 verschiedenen Herstellern geprüft. Auch kamen MO-Widerstände mit unterschiedlicher Glasur (engl. coating) eines Herstellers zur Prüfung sowie MO-Widerstände verschiedener Hersteller in unterschiedlichen Umgebungen. Die meisten hatten einen Nennableitstoßstrom von 5 kA, manche aber auch 10 kA. Die MO-Widerstände mit 5 kA Nennableitstoßstrom hatten eine Höhe von 33 mm und einen Durchmesser von 40 mm. Zur Bewertung des Zustandes der Ableiter wurden die Referenzspannung (bei $I_{\text{ref}} = 1 \text{ mA}$) sowie die Restspannung vor und nach der Prüfung herangezogen. Ebenfalls wurde die thermische Stabilität untersucht und abschließend eine Sichtkontrolle der MO-Widerstände durchgeführt. Als Prüfimpulse kamen 8/20-Impulse mit einer Amplitude von 5...11 kA und Impulse der Form 4/10 μs mit Amplituden zwischen 40 und 100 kA zum Einsatz. Die 8/20 μs Impulse wurden dabei als multiple Impulse eingebracht mit Pausenzeiten von 15...150 ms. Darveniza trifft zwar keine Aussage zum Energieaufnahmevermögen, schildert aber ein interessantes Ausfallbild. Beschrieben werden Überschlag-Ausfallbilder, deren Ursprung nicht in einer dielektrischen Überlastung im Außenbereich des MO-Widerstandes, also z.B. im gasgefüllten Teil des Ableiters, zu suchen sind, sondern deren Ursprung in der Glasur des MO-Widerstandes liegt. Darveniza berichtet hierzu, dass eine intensive visuelle Untersuchung der Strompfade der Überschlagfehler einen Verlauf der Strompfade direkt unterhalb oder sogar weit innerhalb der Glasur ergeben hat. Um diesen Effekt (Beginn des Überschlags innerhalb der Glasur) zu verifizieren, führt Darveniza Versuche mit MO-Widerständen unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (normale Luft, Luft unter reduziertem Druck, SF_6) durch. Aus dem Umstand des weiteren Auftretens der Überschlagfehler - also unabhängig von dem den MO-Widerstand umgebenden Gas - kann als Fehlerursache ein Versagen der Glasur gefolgert werden.

Dengler (siehe [Deng-98]) untersucht die Degradation von MO-Widerständen infolge von Belastungen mit Strömen im Bereich der Nennableitstoßströme und leitet daraus unter anderem ein Verfahren, das die Auswertung der Harmonischen des Leckstroms benutzt, für die Überwachung von Überspannungsableitern ab. Bei seinen Untersuchungen beaufschlagte er zwei verschiedene Widerstandstypen (Material A: Höhe 46 mm, Durchmesser 38 mm, Nennableitstoßstrom 5 kA; Material B: Höhe 40 mm, Durchmesser 74 mm, Nennableitstoßstrom 20 kA) mit einer Vielzahl von Impulsen (typischerweise 400 Impulse) und untersuchte dabei den Einfluss dieser Impulse auf die Verlustleistung und den Leckstrom der MO-Widerstände. Zur genaueren Untersuchung des Leckstroms unterzieht er diesen einer Frequenzanalyse und

leitet später daraus ein Online-Überwachungsverfahren ab. Bei seinen Untersuchungen untersuchte er unter anderem den Einfluss der Temperatur, der zeitlichen Verteilung der Impulse, der Stromsteilheit, des Stromscheitelwertes auf die Degradation der Verlustleistung sowie die Möglichkeit der Regeneration. Als Grund für die Degradation der Verlustleistung infolge von Impulsbelastungen nennt Dengler das Wandern von negativ geladenen Sauerstoffionen in Richtung des Inneren der ZnO-Körner. Durch die Konzentration der Sauerstoffionen am Kornrand wird die Barrierspannung der ZnO-Körner entscheidend beeinflusst. Eine Regeneration der Verlustleistung ist demnach durch eine Rückwanderung der Sauerstoffionen an das Kornäußere möglich. Dengler bildet auch ein Modell für die Abhängigkeit der Verlustleistung von der Temperatur. Hierzu gibt er folgende empirisch gefundene Formel für die spezifische Verlustleistung an:

$$P_V(\theta) = k_0 \cdot P_{V0} \cdot e^{k_0 \frac{\theta}{\theta_0}} \quad (3.5)$$

Für Material A gibt er folgende Werte für die Konstanten an:

$$k_0 = 0,64$$

$$P_{V0} = 2,0633 \text{ mW/cm}^3$$

$$\theta_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Wertet man Gleichung (3.5) graphisch aus, ergibt sich der in **Abbildung 3.14** dargestellte Verlauf.

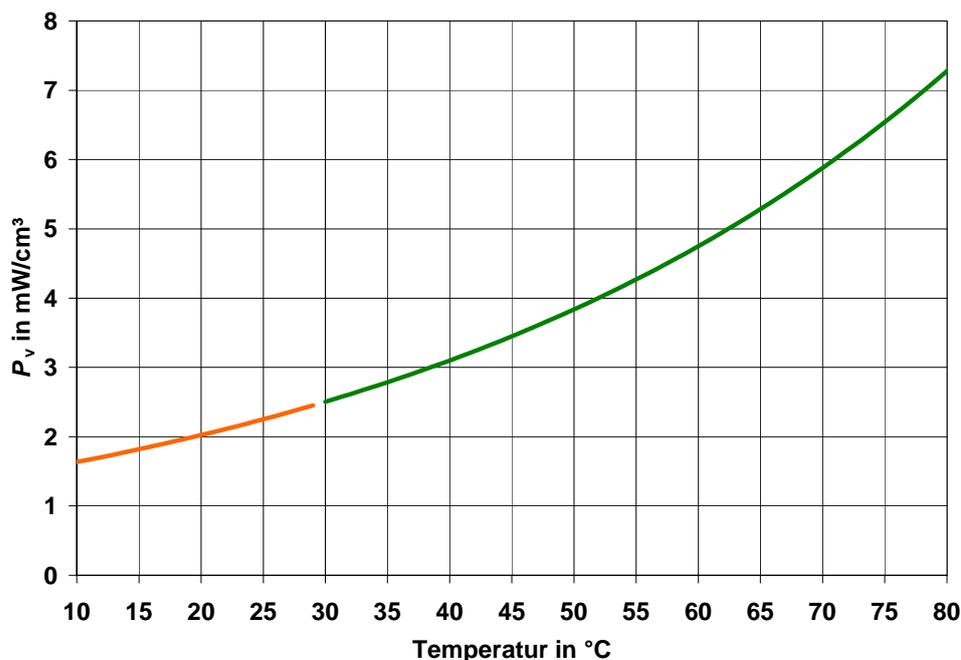


Abbildung 3.14: Abhängigkeit der spezifischen Verlustleistung von der Temperatur nach [Deng-98]

Dengler setzt die Starttemperatur mit 30 °C an. Da er keine Angaben darüber macht, ob es zulässig ist, die Darstellung auch auf Temperaturen kleiner als 30 °C zu erweitern, ist dieser Bereich in Abbildung 3.14 anders farbig (orange) gekennzeichnet.

Klein (siehe [Klein-04]) untersucht Veränderungen in den Materialeigenschaften von MO-Widerständen durch Impulsströme. Hierbei stützt er sich auf die Messung der Leckströme und damit auch auf die Referenzspannung und die Verlustleistung. Gleichzeitig untersucht er ebenfalls die Oberflächen der geprüften MO-Widerstände auf etwaige Risse oder sonstige Schäden. Er arbeitet dabei unter anderem mit einer durchmesserabhängigen Referenzstromdichte von $J_{\text{ref}} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$ zur Messung der Referenzspannung. Er vergleicht hierbei zwei Verfahren im Zusammenhang mit Referenzstrom- und Referenzspannungsmessung. Eine übliche Möglichkeit besteht darin, einen Referenzstrom einzustellen und die dazugehörige Referenzspannung zu ermitteln. Die andere Möglichkeit ist es, eine Referenzspannung einzustellen und den sich daraus ergebenden Referenzstrom für Vergleiche heranzuziehen. Klein kommt zu dem Schluss, dass die zweite Möglichkeit zwar sensibler aber bei stärkeren Schädigungen nicht mehr einsetzbar ist, da die sich ergebenden Ströme zu hoch sind. Zu beachten ist bei den Ergebnissen von Klein, dass er, um Polaritätseffekte zu unterdrücken, nicht den größten positiven oder negativen Scheitelwert des Stromes als Referenzstrom angenommen, sondern den Mittelwert aus positivem und negativem Scheitelwert gebildet hat. Daher sind viele seiner Untersuchungen mit Arbeiten, die den Referenzstrom normgerecht ermitteln, nur schwer zu vergleichen. Er beschreibt für Prüfungen mit Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ einen starken Abfall der Referenzspannung und eine starke Zunahme in der Asymmetrie des Referenzstroms mit zunehmendem Energieeintrag.

In [Clar-99] findet sich ein ausführlich zusammenfassender Artikel zu ZnO-Material. Hierin wird eingehend auf den Herstellungsprozess und die Entwicklungsgeschichte des Materials sowie auf die physikalischen Prozesse in den Korngrenzen eingegangen. Auch finden sich hier Hinweise auf mögliche Fehlerarten (Durchschlag, Bruch), Alterungseffekte und Energieaufnahmevermögen.

In [Lat-83] und [Lat-85] finden sich erstmalig Ausführungen zum thermischen Verhalten und zur thermischen Stabilitätsgrenze von MO-Widerständen und ganzen Ableitern.

4 Statistische Auswertungen

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Möglichkeiten der statistischen Auswertung gegeben werden. Hierbei wird der Fokus auf die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Auswertungsmethoden gelegt. Hierzu werden die Normal- und die Weibullverteilungen erläutert. Die Schätzung der Parameter erfolgt durch die Maximum-Likelihood-Methode auf Basis der Auswerteverfahren Multiple-Level-Method (MLM) und Progressive-Stress-Method (PSM).

Die vielleicht am häufigsten verwendete Verteilung ist die Normalverteilung. Ihre Dichtefunktion f lautet (siehe [Finc-02]):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Die Verteilungsfunktion F ergibt sich als das Integral der Dichtefunktion f :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4.2)$$

μ : Mittelwert

σ : Standardabweichung

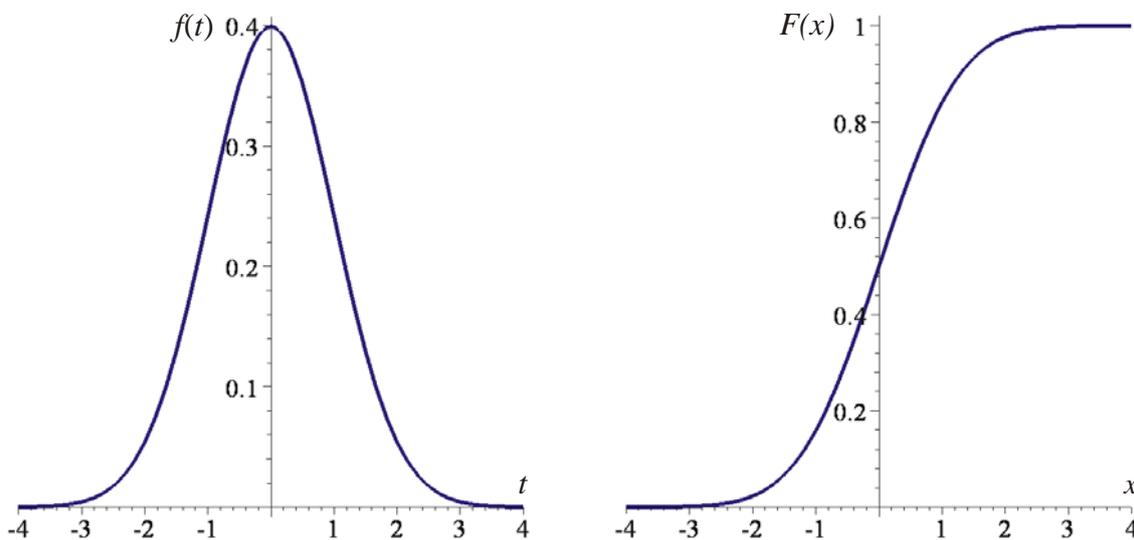


Abbildung 4.1: Links: Dichtefunktion f einer $N(0,1)$ verteilten Zufallsvariablen, rechts: Verteilungsfunktion F der links dargestellten Dichtefunktion f

Abbildung 4.1 zeigt die Dichtefunktion f und die Verteilungsfunktion F einer Standard-normalverteilten⁴ Zufallsvariablen.

Für die Auswertung von Lebensdauerversuchen bietet sich oftmals die Anwendung einer Weibullverteilung an. Die zweiparametrische Weibullverteilung besitzt folgende Dichtefunktion f_{W_2} [Lehn-06]:

$$f_{W_2}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq 0 \\ \alpha \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha t^\beta} & \text{für } t > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

α, β : Parameter der Weibullverteilung

Ihre Verteilungsfunktion F_{W_2} lautet:

$$F_{W_2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq 0 \\ 1 - e^{-\alpha x^\beta} & \text{für } x > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Für $\beta = 1$ geht die Weibullverteilung in eine Exponentialverteilung über.

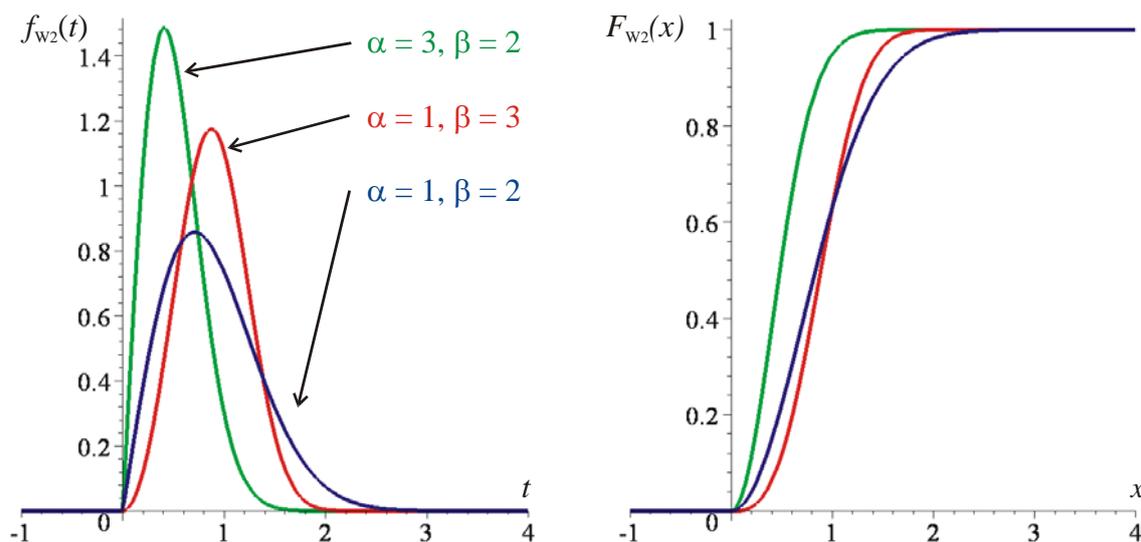


Abbildung 4.2: Links: Dichtefunktion f_{W_2} einer zwei-parametrischen weibullverteilten Zufallsvariablen, rechts: Verteilungsfunktion F_{W_2} der links dargestellten Dichtefunktion f_{W_2}

Von der Weibullverteilung existiert neben der zwei- auch eine dreiparametrische Variante. Ihre Dichtefunktion f_{W_3} lautet:

$$f_{W_3}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq t_0 \\ \alpha \cdot \beta \cdot (t - t_0)^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha(t-t_0)^\beta} & \text{für } t > t_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Die dazugehörige Verteilungsfunktion F_{W_3} lautet:

⁴ Für die Parameterkombination $\mu = 0, \sigma^2 = 1$ spricht man von einer Standard-Normalverteilung.

$$F_{W_3}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq x_0 \\ 1 - e^{-\alpha(x-x_0)^\beta} & \text{für } x > x_0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Abbildung 4.3 zeigt die Dichtefunktion f_{W_3} und Verteilungsfunktion F_{W_3} für eine solche dreiparametrische Weibullverteilung mit $t_0 = 1$.

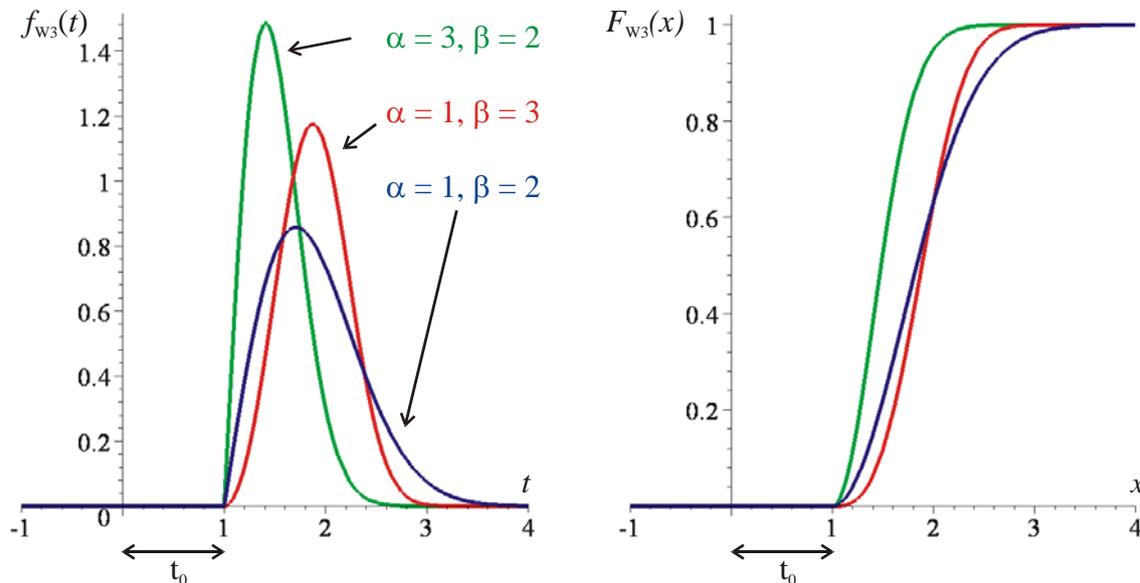


Abbildung 4.3: Links: Dichtefunktion f_{W_3} einer drei-parametrischen Weibull-verteilten Zufallsvariablen $t_0 = 1$, rechts: Verteilungsfunktion F_{W_3} der links dargestellten Dichtefunktion f_{W_3}

Dreiparametrische Weibullverteilungen können eingesetzt werden, wenn unterhalb eines gewissen Wertes kein Ereignis auftreten kann. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn unterhalb einer gewissen Spannung kein Durchschlag einer Funkenstrecke zu erwarten ist. Problematisch ist in solchen Fällen allerdings die genaue Bestimmung dieses Punktes. Nach dieser allgemeinen Vorstellung verschiedener Verteilungsfunktionen soll nun auf ein Verfahren zur Schätzung der Parameter einer Verteilungsfunktion eingegangen werden.

4.1 Maximum-Likelihood-Methode

Über die Auswertung von Experimenten, die mit hochspannungstechnischen Fragestellungen in Verbindung stehen, hat sich bereits in den 1980er Jahren das Cigré Study Committee 33 befasst. Hierzu erschien in der Zeitschrift Elektra ein Artikel (siehe [Carr-90]). In diesem Artikel werden unter anderem die “Multiple Level Method“ (MLM) (siehe auch Kapitel 4.4) und die “Progressive stress method“ (PSM) (siehe auch Kapitel 4.3) zur Auswertung von Experi-

menten vorgeschlagen. Die Auswertung greift hierzu auf die Maximum-Likelihood-Methode⁵ zum Schätzen von Parametern einer Verteilung zurück. Die Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode wird auch in der Norm [DIN IEC 60060-1] empfohlen.

Bei der Durchführung einer statistischen Untersuchung versucht man, auf Grundlage einer Stichprobe auf die Gesamtheit zurückzuschließen. Hierzu nimmt man eine mathematische Verteilung an und bestimmt aus der Stichprobe die Parameter der Verteilung. Um diese Parameter aufgrund der Stichprobe zu schätzen, bietet sich die Verwendung des Maximum-Likelihood-Schätzers an. Hierbei wird aus den empirischen Messdaten und unter Voraussetzung einer Verteilung eine Funktion, die sogenannte Likelihood-Funktion, ermittelt. Das Maximum der Likelihood-Funktion (siehe auch **Abbildung 4.6**) ist dann die wahrscheinlichste Parameterkombination für die angenommene Verteilung bei den durch die Stichprobe vorgegebenen Werten.

Sind die zugrunde liegenden Zufallsvariablen X bzw. X_1, X_2, \dots, X_n stetig verteilt, so ist ihre Verteilungsfunktion F_θ durch eine Dichtefunktion (siehe [Finc-02]):

$$f_\theta(x) \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \quad (4.7)$$

gegeben. Die **Likelihood-Funktion** für eine gegebene Messreihe x_1, x_2, \dots, x_n berechnet sich dann zu:

$$L(\theta, x_1, x_2, \dots, x_n) = f_\theta(x_1) \cdot f_\theta(x_2) \cdot \dots \cdot f_\theta(x_n) = \prod_{i=1}^n f_\theta(x_i) \quad (4.8)$$

Ein Parameterwert

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.9)$$

für den die Bedingung:

$$L(\hat{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n) \geq L(\theta, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.10)$$

gilt, heißt Maximum-Likelihood-Schätzwert.

Im Falle einer Normalverteilung lautet die Likelihood-Funktion L_{NV} :

$$L_{NV}(\theta_1, \theta_2, x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\theta_2}} \right)^n \cdot e^{-\frac{1}{2\theta_2} \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_1)^2} \quad (4.11)$$

Durch Berechnung des Maximums dieser Funktion erhält man die Schätzer für die Normalverteilung:

⁵ Als der „Erfinder“ der Maximum-Likelihood-Methode gilt Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962).
Quelle: www.mathematik.uni-ulm.de/stochastik/lehre/ss01/stochInfWi/vs1/node59.html (06.06.2008)

$$\hat{\theta}_{1NV}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.12)$$

$$\hat{\theta}_{2NV}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 \quad (4.13)$$

Im Falle einer Weibullverteilung (2 Parameter) lautet die Likelihood-Funktion L_{W2} dann:

$$L_{W2}(\theta_1, \theta_2, x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot x_i^{\theta_2-1} \cdot e^{-\theta_1(x_i)^{\theta_2}} \quad (4.14)$$

4.2 Konfidenzintervalle

Ein Konfidenzintervall (auch Vertrauensbereich genannt) trifft eine Aussage über die Präzision geschätzter Parameter. Hat man die Likelihood-Funktion berechnet, ist es relativ einfach, eine Aussage über die Vertrauensbereiche zu treffen. Hierzu muss man die Likelihood-Funktion normieren:

$$L(\theta, x_1, x_2, \dots, x_n) / L(\hat{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n) = L / L_{\text{Max}} \quad (4.15)$$

Hat man die Normierung durchgeführt, kann man auf die Vertrauensbereiche schließen, indem man an der Stelle $k = f(r, C)$ die Likelihood-Funktion horizontal schneidet (siehe [Wilk-62]).

- r: Anzahl der Freiheitsgrade
C: gesuchtes Konfidenzniveau

Die Projektion dieser Fläche entspricht dann dem gesuchten Vertrauensbereich. Der Wert für k hängt von der χ^2 -Verteilung, der Anzahl der Freiheitsgrade r (Anzahl der gesuchten Parameter) und dem gesuchten Konfidenzniveau C ab. Näheres hierzu findet sich unter [Davi-88]. In **Tabelle 6** sind verschiedene Werte für den Faktor k in Abhängigkeit von üblichen Konfidenzniveaus und Freiheitsgraden angegeben.

Tabelle 6: Werte für den Faktor k nach [Davi-88]

Freiheitsgrad r	Wert für k abhängig vom Konfidenzniveau (C)		
	90 %	95 %	99 %
1	0,258	0,1465	0,03625
2	0,100	0,0500	0,01000
3	0,044	0,0200	0,00343

Die so gefundenen Konfidenzbereiche stellen alle möglichen Parameterkombinationen und damit alle unter der Bedingung der jeweiligen Versuchsdaten denkbaren Geraden im jeweiligen Wahrscheinlichkeitsnetz (Normal-, Weibullverteilung etc.) dar. Die wahrscheinlichste Gerade ergibt sich durch die Parameterkombination mit dem höchsten Funktionswert in der

Likelihood-Funktion. **Abbildung 4.4** zeigt schematisch einen Schnitt durch eine Likelihood-Funktion an einer bestimmten Stelle $k = f(r, C)$. Die wahrscheinlichste Parameterkombination findet sich im Punkt M. Die Punkte A, B, C, D sind die extremsten Parameterkombinationen und bilden die Grenzen in der Darstellung $P = f(X)$, siehe **Abbildung 4.5**.

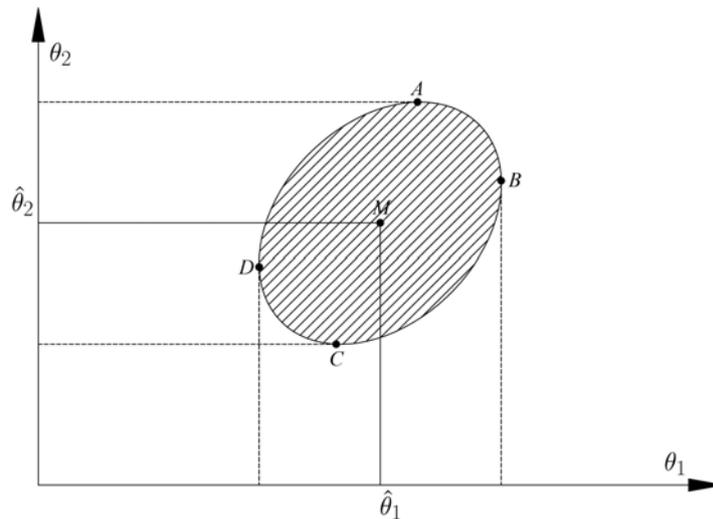


Abbildung 4.4: Schematischer Schnitt durch eine Likelihood-Funktion an der Stelle $k = f(r, C)$ nach [Carr-90]

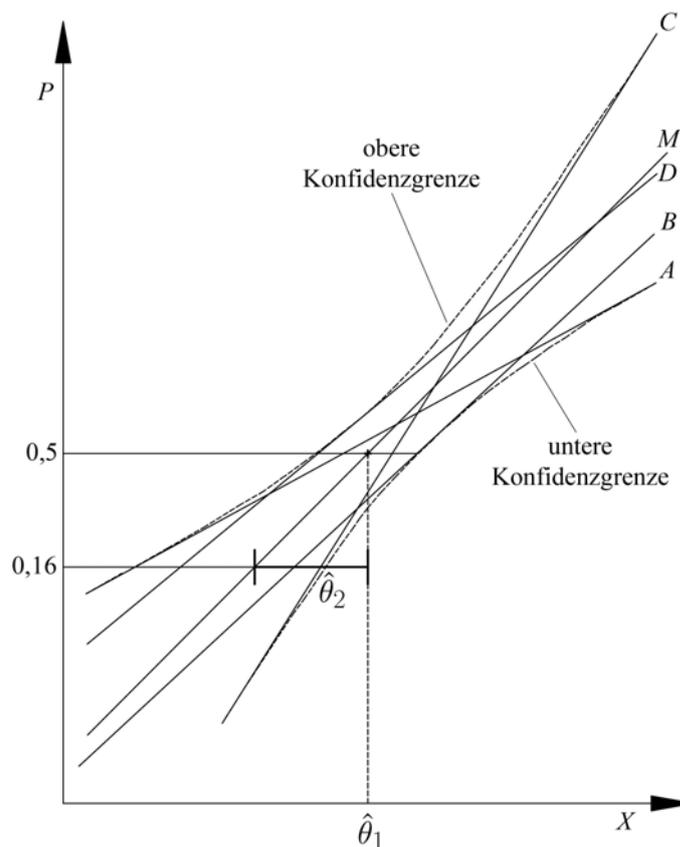


Abbildung 4.5: Konfidenzgrenzen einer Verteilung in der Darstellung $P = f(X)$ nach [Carr-90]

Mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode können unter Annahme einer Verteilungsfunktion die Parameter der Verteilung geschätzt werden. Die folgenden zwei Kapitel zeigen, wie dies für verschiedene Arten von Versuchen konkret geschehen kann.

4.3 PSM – Progressive Stress Method

Die PSM kann zur Auswertung von Versuchen herangezogen werden, bei der alle Prüfungen zur Zerstörung des Prüflings führten. Daher ist diese Methode besonders für die Auswertung der Wechselstromversuche (siehe Kapitel 7.2.2) geeignet. Hier können die obigen Ansätze für die Likelihood-Funktion direkt angewendet werden.

Zunächst soll die Auswertung unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullverteilung erläutert werden. Zu diesem Zweck wird allerdings folgende Darstellung der Dichtefunktion der 2-parametrischen Weibullverteilung f_{w2} nach [Carr-90], welche auch in [Balz-07] vorgeschlagen wird, verwendet:

$$f_{w2}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq 0 \\ \frac{\delta}{\eta^\delta} \cdot t^{\delta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\delta} & \text{für } t > 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

δ, η : Parameter der 2-parametrischen Weibullverteilung

Die dazugehörige Verteilungsfunktion F_{w2} ergibt sich dann zu:

$$F_{w2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq 0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\delta} & \text{für } x > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

Der Vorteil dieser Darstellung liegt in den Werten, die sich für δ, η ergeben, da diese nicht so klein wie die Werte in der α, β -Darstellung sind (siehe Gleichung (4.3)).

Man setzt nun die Dichtefunktion Gleichung (4.16) in Gleichung (4.8) ein und variiert die Weibullparameter δ, η . Hieraus ergibt sich dann die Likelihood-Funktion, analog zu Gleichung (4.14). Für t werden dabei die aus den Versuchen gewonnenen Daten eingesetzt.

Abbildung 4.6 zeigt eine solche Likelihood-Funktion für die Daten aus einem der später beschriebenen Wechselstromversuche (siehe Kapitel 8).

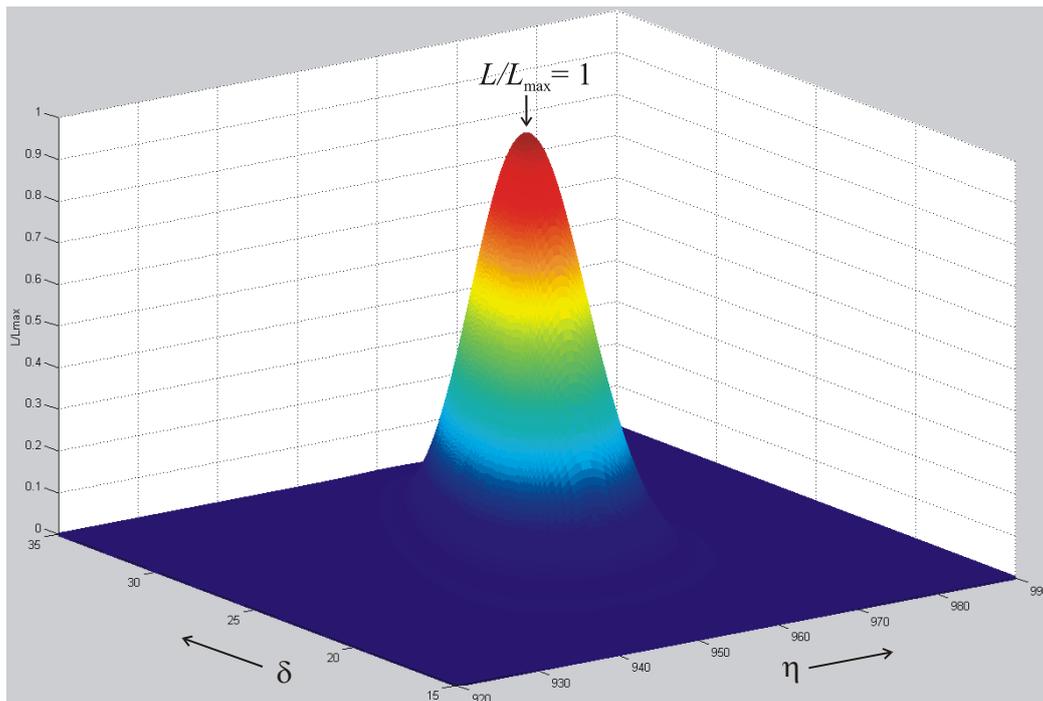


Abbildung 4.6: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullverteilung / Fall A⁶

Schneidet man die normierte Likelihood-Funktion aus Abbildung 4.6 an den in Tabelle 6 angegebenen Werten für k , so ergeben sich die Vertrauensbereiche der Verteilung und der Quantile. Zwei solche Schnitte für ein Konfidenzniveau von 95 % sind in **Abbildung 4.7** dargestellt.

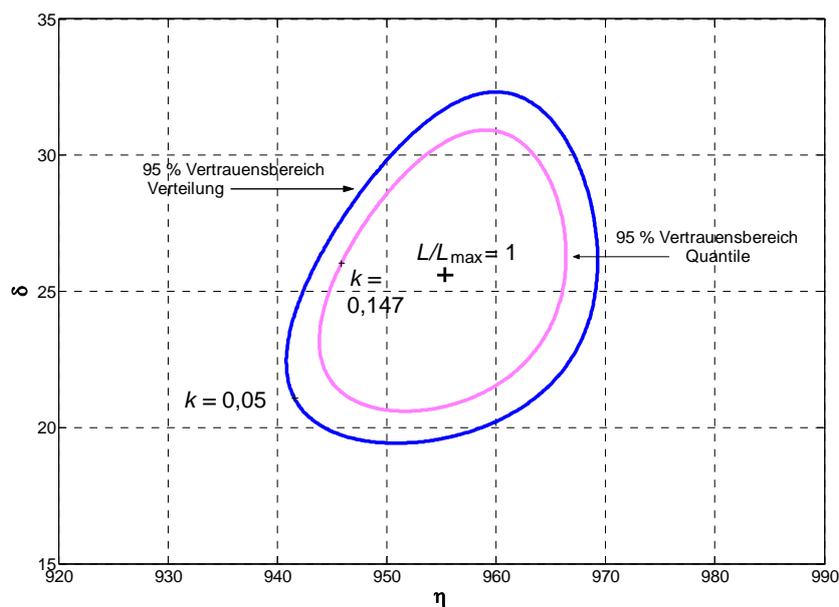


Abbildung 4.7: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall A

⁶ Fall A: AC-Versuch 100 A, Hersteller U – Größe 1

Setzt man anstelle einer Weibullverteilung eine Normalverteilung an, so muss Gleichung (4.11) zur Berechnung der Likelihood-Funktion herangezogen werden. **Abbildung 4.8** zeigt die so gewonnene Funktion für Fall A (siehe Kapitel 8). In **Abbildung 4.9** sind dann die Vertrauensbereiche für die Verteilung und die Quantile für zwei Konfidenzniveaus (90 und 95 %) dargestellt.

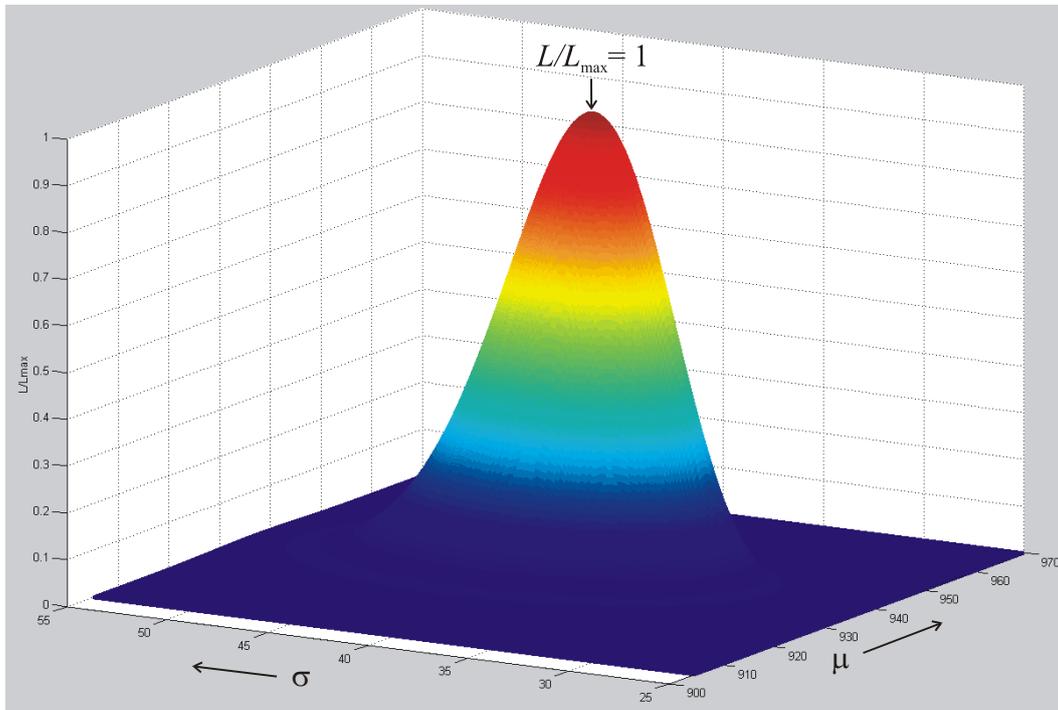


Abbildung 4.8: normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Normalverteilung / Fall A

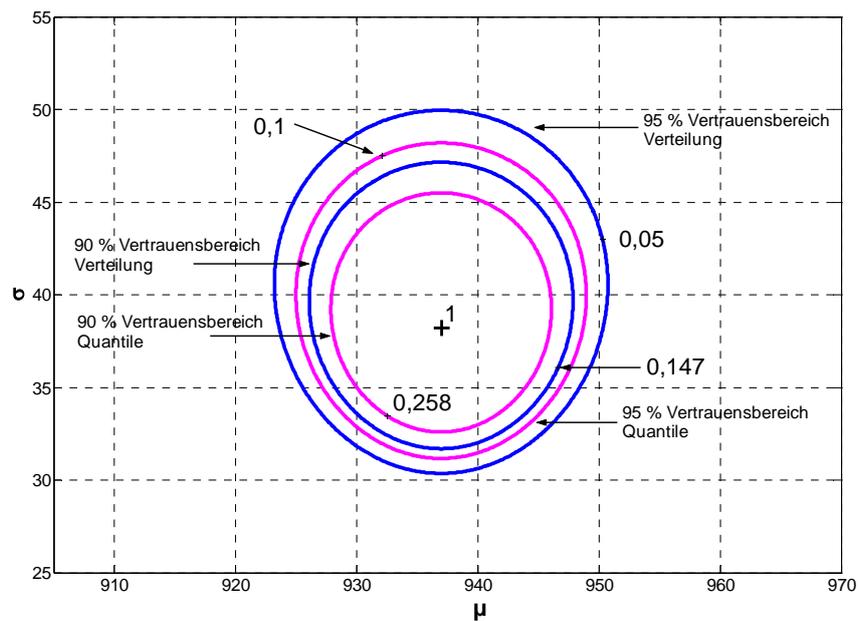


Abbildung 4.9: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 90 % und 95 % / Fall A

4.4 MLM – Multiple Level Method

Werden durch die Prüfung nicht alle MO-Widerstände zerstört, ist die Anwendung der PSM nicht möglich. Zur Auswertung von Versuchen mit defekten und nicht defekten MO-Widerständen muss daher die MLM verwendet werden. Die Verwendung der MLM wird auch von [Verd-92] zur Bestimmung des Energieaufnahmevermögens von MO-Widerständen vorgeschlagen.

Bei der MLM nach [Carr-90] wird eine Binomialverteilung angesetzt:

$$L = \prod_{i=1}^n \binom{n}{k_i} \cdot F(x, \theta_1, \theta_2)^{k_i} \cdot (1 - F(x, \theta_1, \theta_2))^{w_i} \quad (4.18)$$

- n : Anzahl der Stufen
- k_i : Anzahl der defekten MO-Widerstände pro Stufe
- w_i : Anzahl der nicht defekten MO-Widerstände pro Stufe
- F : Verteilungsfunktion mit den gesuchten Parametern θ_1, θ_2

Wird später nur die normierte Likelihood-Funktion betrachtet, kann die Berechnung zu:

$$L = \prod_{i=1}^n F(x, \theta_1, \theta_2)^{k_i} \cdot (1 - F(x, \theta_1, \theta_2))^{w_i} \quad (4.19)$$

vereinfacht werden.

Soll die Likelihood-Funktion unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullverteilung berechnet werden, so muss Gleichung (4.17) als Verteilungsfunktion F angesetzt werden.

Abbildung 4.10 zeigt die Auswertung mittels MLM für Versuche an den MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1, 90/200 μs , im Weiteren Fall B genannt (siehe Kapitel 8), unter der Annahme einer 2-parametrischen Weibullverteilung. **Abbildung 4.11** gibt Aufschluss über den 95 % Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für diesen Fall.

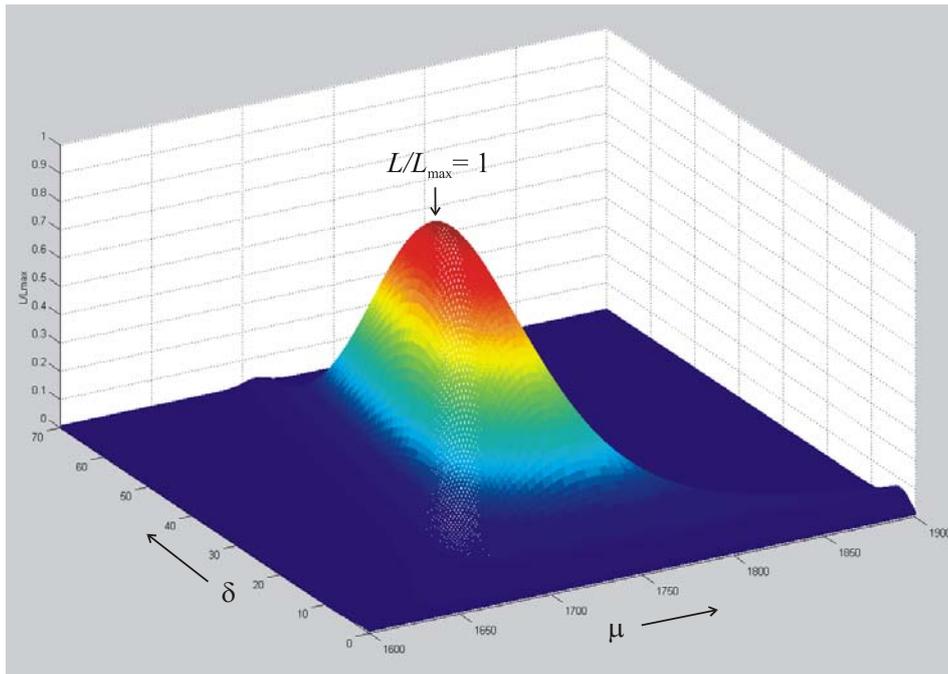


Abbildung 4.10: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Weibullverteilung / Fall B⁷

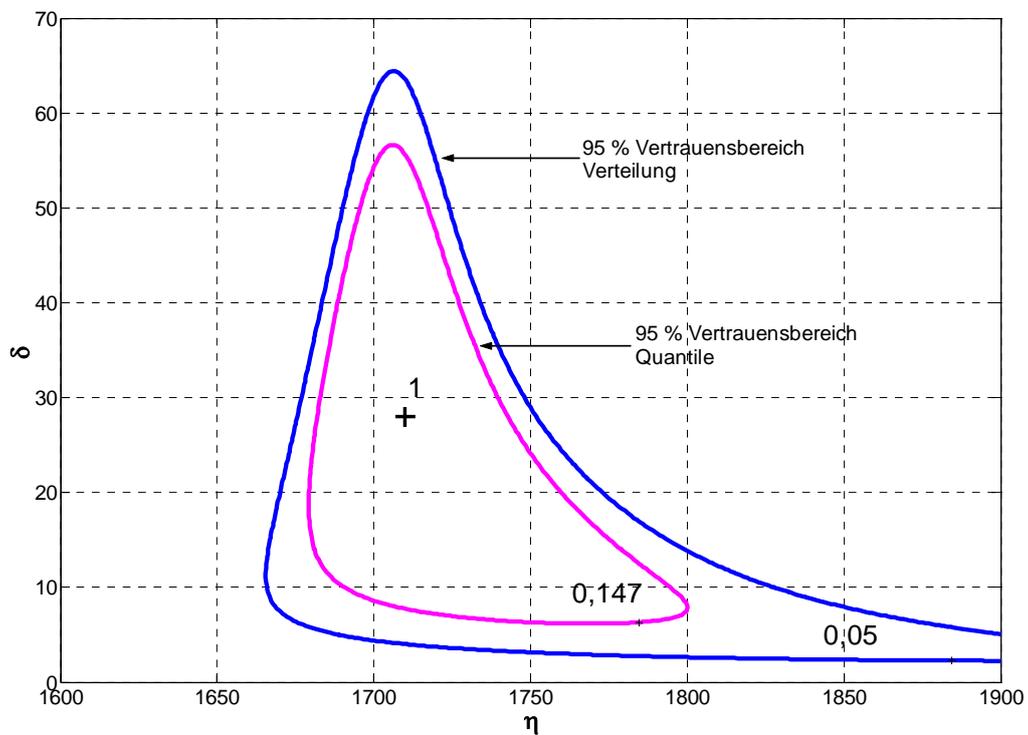


Abbildung 4.11: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall B

⁷ Fall B: 90/200- μ s-Versuch, Hersteller X – Größe 1

Soll die Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Normalverteilung berechnet werden, muss in Gleichung (4.19) für die Verteilungsfunktion F Gleichung (4.2) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich folgende Likelihood-Funktion:

$$L = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \right)^{k_i} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \right) \right)^{w_i} \quad (4.20)$$

In **Abbildung 4.12** ist Gleichung (4.20) für Fall B (Impulsstromversuche) unter Annahme einer Normalverteilung dargestellt. **Abbildung 4.13** zeigt die Vertrauensbereiche für die Verteilung und die Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 %.

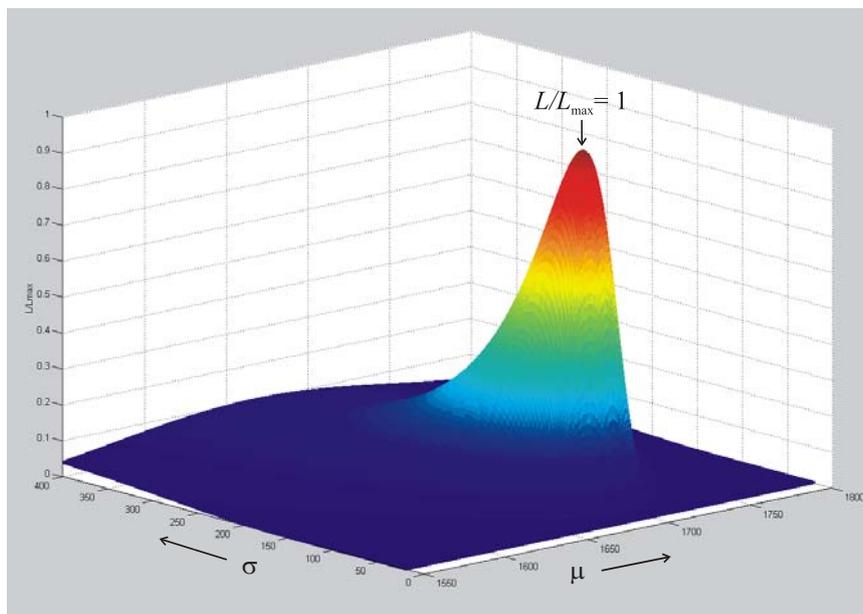


Abbildung 4.12: Normierte Likelihood-Funktion unter der Annahme einer Normalverteilung / Fall B

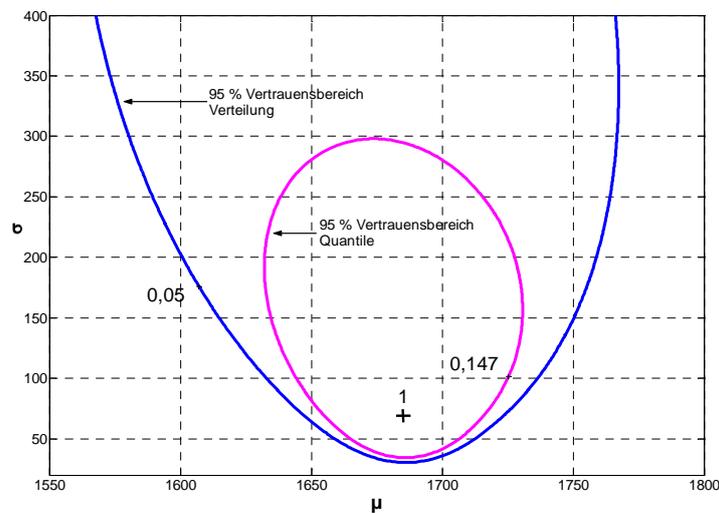


Abbildung 4.13: Vertrauensbereich der Verteilung und der Quantile für ein Konfidenzniveau von 95 % / Fall B

In diesem Kapitel wurden statistische Auswertemethoden vorgestellt. Zunächst wurden grundsätzlich drei Verteilungsfunktionen (Normal, Weibull 2-parametrig, Weibull 3-parametrig) erläutert.

Im Anschluss daran wurde das Vorgehen zum Schätzen der Parameter einer solchen Verteilungsfunktion mittels der Maximum-Likelihood-Methode vorgestellt. Durch Berechnung der Likelihood-Funktion ist es dann auch möglich, auf die Vertrauensbereiche der Verteilung zurückzuschliessen. Die Vertrauensbereiche machen dabei eine Aussage über die Präzision der Parameter. Je enger der sich ergebende Vertrauensbereich ausfällt, desto besser passt die angenommene Verteilung zu den erhobenen Versuchsdaten.

Zur konkreten Auswertung der erhobenen Versuchsdaten kommen die Progressive Stress Method (PSM) sowie die Multiple Level Method (MLM) zur Anwendung. Da bei den Wechselstromversuchen alle MO-Widerstände bis zum Ausfall geprüft wurden, wird zur Auswertung dieser Versuche die PSM verwendet. Vor dem Hintergrund der nicht vollständigen Zerstörung aller MO-Widerstände in den Impulsstromversuchen, müssen diese Versuchsreihen mit der MLM ausgewertet werden.

Für die statistische Auswertung von Versuchen, die sich mit dem Energieaufnahmevermögen von MO-Widerständen befassen, bieten sich grundsätzlich mehrere Verteilungsfunktionen an. Wie schon Ringler (siehe [Ring-97]) berichtet, deckt aber keine der Verteilungen die experimentellen Ergebnisse vollständig ab. Daher entscheidet sich Ringler für die Annahme einer Normalverteilung. Für eine gute Vergleichbarkeit werden im Weiteren die Versuchsdaten (siehe Kapitel 8) daher auch unter der Annahme einer Normalverteilung ausgewertet. Die Schätzung der Parameter und der Konfidenzintervalle erfolgt dabei immer unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Funktion. Da in der Literatur gelegentlich zur Auswertung solcher Versuchsreihen eine Weibullfunktion vorgeschlagen wird, behandelte dieses Kapitel auch die nötigen Grundlagen für die Auswertungen unter der Annahme einer Weibullverteilung.

5 Prüfkreise

In diesem Kapitel werden die Prüfkreise und Messeinrichtungen, die zur Verfügung standen, vorgestellt, zum einen solche zur eigentlichen Energiebelastung, zum anderen die Einrichtungen zur Beurteilung des Zustandes eines MO-Widerstandes. Es wurden Prüfungen mit Exponentialstoßströmen der Formen $4/10 \mu\text{s}$, $8/20 \mu\text{s}$ und $90/200 \mu\text{s}$ sowie Rechteckstoßstromprüfungen mit Dauern von 1, 2 und 4 ms durchgeführt. Weiterhin wurden Prüfungen mit Wechselstrombeanspruchung bei Stromhöhen von 10, 100, 200-300 A vorgenommen. Um den Zustand der MO-Widerstände zu beurteilen, wurden vor und nach den Prüfungen sowohl die Restspannung bei 10 kA ($8/20 \mu\text{s}$) sowie die Referenzspannung bei einer Stromdichte von $J_{\text{ref}} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$ gemessen.

5.1 Exponential-Stoßstromkreis

Zur Impulsprüfung von MO-Widerständen stand ein Exponentialstoßstromkreis der Firma Highvolt zur Verfügung.

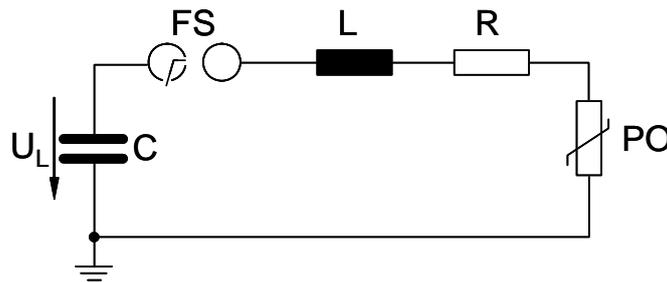


Abbildung 5.1: Ersatzschaltbild des Exponentialstoßstromkreises

Abbildung 5.1 zeigt das Ersatzschaltbild des Exponentialstoßstromkreises. Dieser besteht aus 8 Kondensatoren zu je $2 \mu\text{F}$, mit einer maximalen Ladespannung von 100 kV, und 8 $R-L$ Kombinationen zur Formung des Stoßstromverlaufs. Nach der Triggerung der Funkenstrecke entladen sich die Kondensatoren über $R-L$ Kombinationen in das Prüfobjekt. **Abbildung 5.2** zeigt den realen Aufbau aus den halbkreisförmig angeordneten Kondensatoren, den orangefarbenen $R-L$ Kombinationen und einem eingespannten MO-Widerstand. Die Funkenstrecke ist durch eine Abdeckung oberhalb des MO-Widerstandes verdeckt. Die halbkreisförmige Anordnung der Kondensatoren bewirkt eine niedrige Induktivität des Aufbaus und ist erforderlich, um alle nach [IEC 60099-4] geforderten Stoßstromformen realisieren zu können. Die Spannungsmessung erfolgt durch einen ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler, die Strommessung ist durch einen Rogowski-Wandler realisiert.



Abbildung 5.2: Exponentialstoßstromkreis

Tabelle 7 gibt die möglichen Stoßstromformen des Exponentialstoßstromkreises und seine Kenndaten wieder. Bei den Tabellenwerten handelt es sich um mit Sicherheit erreichbare Werte, abhängig von MO-Widerstand und Ladespannung können jedoch auch deutlich größere Stromamplituden realisiert werden. Zum Beispiel war es möglich, bei der Stoßform 4/10 μs bei einigen der untersuchten MO-Widerstände Amplituden von bis zu 300 kA zu realisieren.

Tabelle 7: Technische Daten (spezifizierte Nennwerte) des Exponentialstoßstromkreises

Stoßform in μs	Restspannung in kV	Stoßstrom in kA
8/20	35	52
4/10	60	100
1/<20	45	20
30/60	30	3,5

Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf der Spannung und des Stroms während einer Prüfung mit der Stoßform 8/20 μs an einem kompletten Mittelspannungsableiter mit folgenden Kenndaten: $U_r = 9 \text{ kV}$, $U_c = 7,2 \text{ kV}$, $I_n = 10 \text{ kA}$.

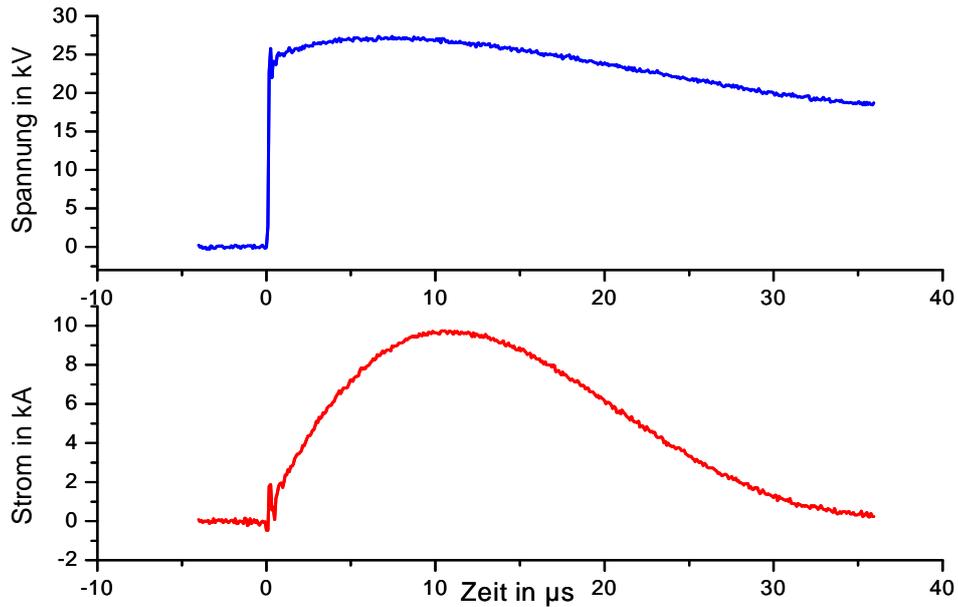


Abbildung 5.3: Spannungs- und Stromverlauf während einer Prüfung mit der Stoßstromform 8/20 μs an einem kompletten Mittelspannungsableiter

Bei schnellen Impulsformen wie zum Beispiel Hochstoßströmen der Form 4/10 μs , muss besonders auf die Ausführung der Spannungsmessung geachtet werden. Da der Messteiler meist weiter entfernt vom Prüfkreis steht, spannen Zu- und Rückleitung des Messteilers zusammen mit dem Messteiler eine Schleife auf (siehe **Abbildung 5.4**). Fließt nun ein Stoßstrom durch den Prüfling, wird in diese Schleife eine Spannung induziert, die sich der eigentlich zu messenden Spannung überlagert.

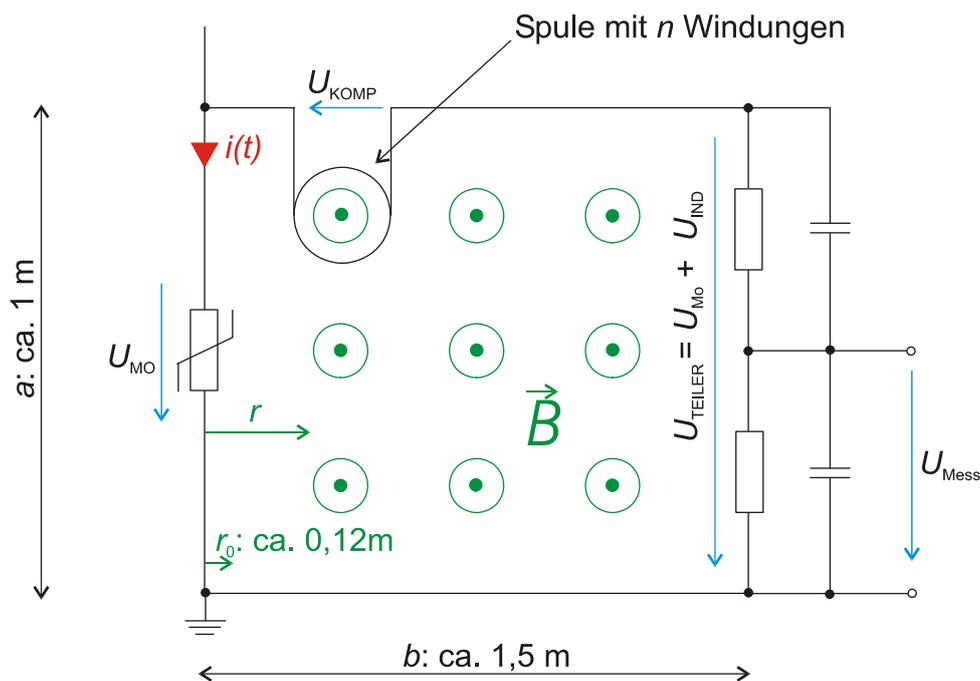


Abbildung 5.4: Ersatzschaltbild für die Kompensation, von induktiv eingekoppelten Spannungen, während der Spannungsmessung bei Stoßströmen

Die am Teiler anliegende Spannung U_{TEILER} besteht ohne eine Kompensationsspule aus der Spannung über dem Prüfling U_{MO} und dem induzierten Anteil U_{IND} :

$$U_{\text{TEILER}} = U_{\text{MO}} + U_{\text{IND}} \quad (5.1)$$

Bringt man in diesen Kreis eine zusätzliche Spule ein, in die eine gleiche aber entgegengesetzte Spannung induziert wird wie in der Messschleife, so kann die induzierte Spannung kompensiert werden (Bedingung: $U_{\text{KOMP}} = U_{\text{IND}}$). Somit liegt an dem Teiler dann nur noch die gesuchte Spannung U_{MO} an.

Nun soll beispielhaft die Spannung, die in solch einer Messschleife induziert wird, berechnet werden. Dazu wird zunächst die magnetische Feldstärke eines konzentrischen Leiters ermittelt. Hierbei wird zunächst die folgende Maxwell-Gleichung angesetzt:

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (5.2)$$

für die einfache Anordnung eines konzentrischen Leiters vereinfacht sich diese zu:

$$H = \frac{i(t)}{2\pi \cdot r} \quad (5.3)$$

Mit $B = \mu \cdot H$ und

$$\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (5.4)$$

und den in Abbildung 5.4 angegebenen geometrischen Maßen a , b , r_0 folgt damit für den magnetischen Fluss in der Schleife:

$$\Phi = \frac{a \cdot \mu}{2\pi} \cdot (\ln b - \ln r_0) \cdot i(t) \quad (5.5)$$

Ein Hochstoßstromimpuls der Form $4/10 \mu\text{s}$ kann näherungsweise mit folgender Formel nachgebildet werden (siehe [Maha-01]):

$$i(t) = C \cdot t \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (5.6)$$

mit $\tau = 4 \mu\text{s}$.

Für einen 100-kA-Hochstoßstromimpuls der Form $4/10 \mu\text{s}$ berechnet sich die Konstante C zu:

$$C = \frac{100 \text{ kA}}{\tau} \cdot e = 6,796 \cdot 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{s}} \quad (5.7)$$

Die in die Schleife induzierte Spannung ergibt sich somit zu:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{a \cdot \mu}{2\pi} (\ln b - \ln r_0) \frac{di(t)}{dt} = -\frac{C \cdot a \cdot \mu}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{r_0}\right) \cdot \left(e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} - \frac{t}{\tau} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right) \quad (5.8)$$

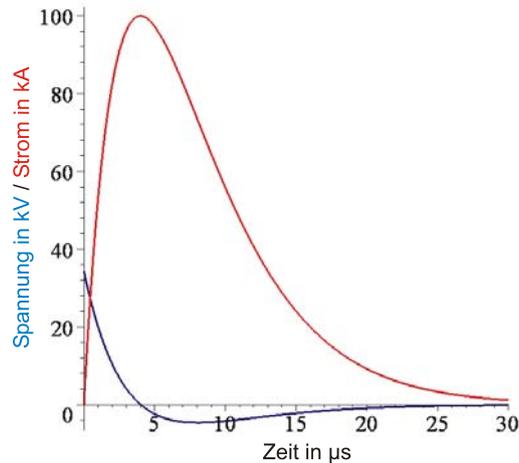


Abbildung 5.5: Verlauf der Induktionsspannung, hervorgerufen in der Messschleife durch einen Hochstoßstromimpuls der Form 4/10 μs bei einer Stromhöhe von 100 kA

Abbildung 5.5 zeigt den Verlauf der in der Messschleife hervorgerufenen Induktionsspannung über der Zeit für einen Hochstoßstromimpuls der Form 4/10 μs bei einer Stromhöhe von 100 kA. Als geometrische Maße für die Berechnung sind dabei die Werte aus **Abbildung 5.4** verwendet worden.

Bringt man nun eine Kompensationsspule in die Zuleitung des Messteilers ein, wobei auf den Wickelsinn zu achten ist, so kann die in die Messschleife induzierte Spannung kompensiert werden. Um die Kompensation in der Praxis zu überprüfen, wird der zu prüfende MO-Widerstand durch einen Metallblock gleicher Größe ersetzt und die Spannungsmessung an diesem durchgeführt. Damit die Kurvenform während des Stoßes gewährleistet werden kann, muss sich der MO-Widerstand während des Stoßes ebenfalls im Stoßkreis befinden, allerdings an einer Stelle, an der er die Spannungsmessung nicht beeinflusst (siehe **Abbildung 5.6**).

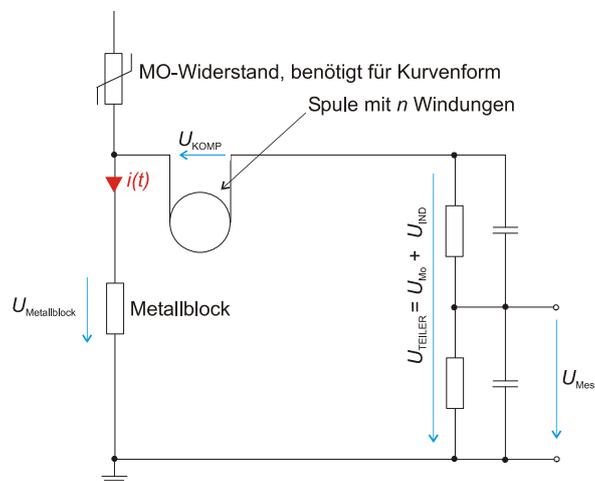


Abbildung 5.6: Ersatzschaltbild für die Überprüfung der Kompensationsspule mit Hilfe eines Metallblocks

Nach [IEC 60099-4] gilt die Kompensation als hinreichend genau, wenn der über dem Metallblock gemessene Spannungsschätzwert kleiner als 2 % des Restspannungswertes des MO-Widerstandes ist. Das Oszillogramm einer solchen erfolgreichen Kompensation zeigt **Abbildung 5.7**.

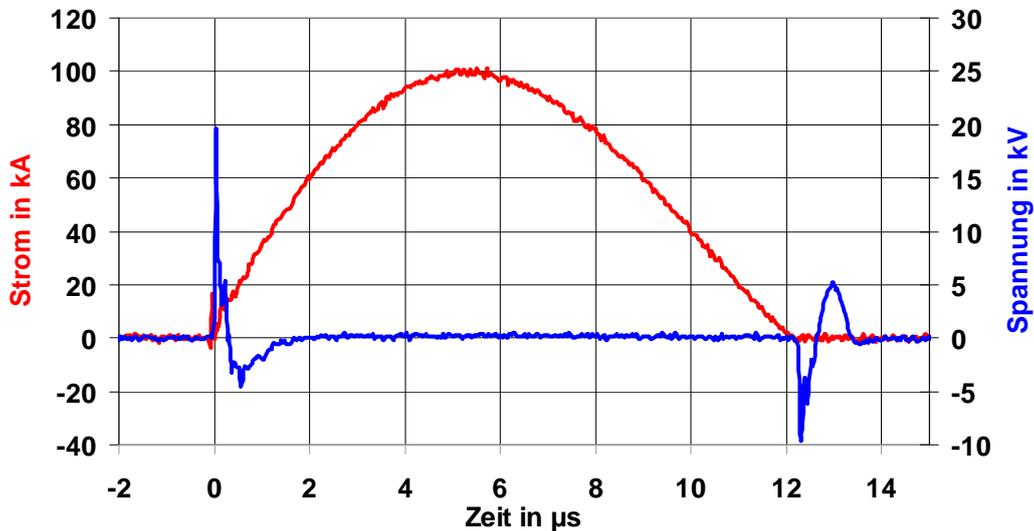


Abbildung 5.7: Spannungsverlauf am Messteiler während eines Hochstoßstromimpulses der Form 4/10 μ s durch einen Metallblock; mit angeschlossener Kompensationsspule

5.2 Langwellengenerator

Für die Prüfung mit Rechteckstoßströmen (1; 2; 4 ms) wurde ein Langwellengenerator im Eigenbau neu aufgebaut. Der Generator besteht aus Kondensatoren und Induktivitäten, die so verschaltet werden, dass daraus ein Kettenleiter, entsprechend dem T-Ersatzschaltbild einer Leitung, entsteht. Hierdurch wird die Entladung einer geladenen Hochspannungsfreileitung auf einen MO-Widerstand nachgebildet. Der Generator besteht aus 20 Stufen zu je 10 μ F, wobei 10 Stufen mit maximal 40 kV und die anderen 10 mit maximal 50 kV geladen werden können. **Abbildung 5.8** zeigt das Ersatzschaltbild des Generators. Nachdem die Funkenstrecke getriggert wurde, entladen sich die Kondensatoren über die Induktivitäten in das Prüfobjekt.

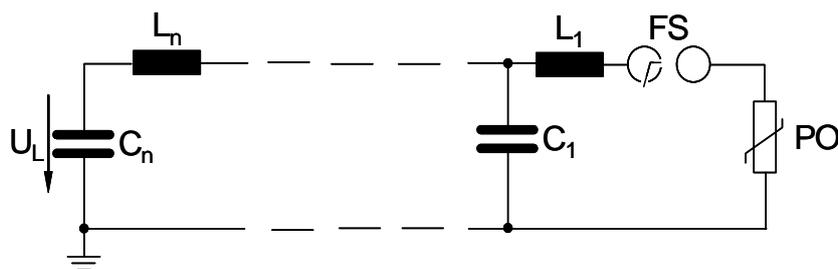


Abbildung 5.8: Ersatzschaltbild des Langwellengenerators (Kettenleiter) zur Erzeugung von Rechteckstoßströmen (Langwellenstöße)

Abbildung 5.9 zeigt das Oszillogramm einer solchen Prüfung mit einem 2 ms Rechteckstoßstrom an einem MO-Widerstand der Größe 1.

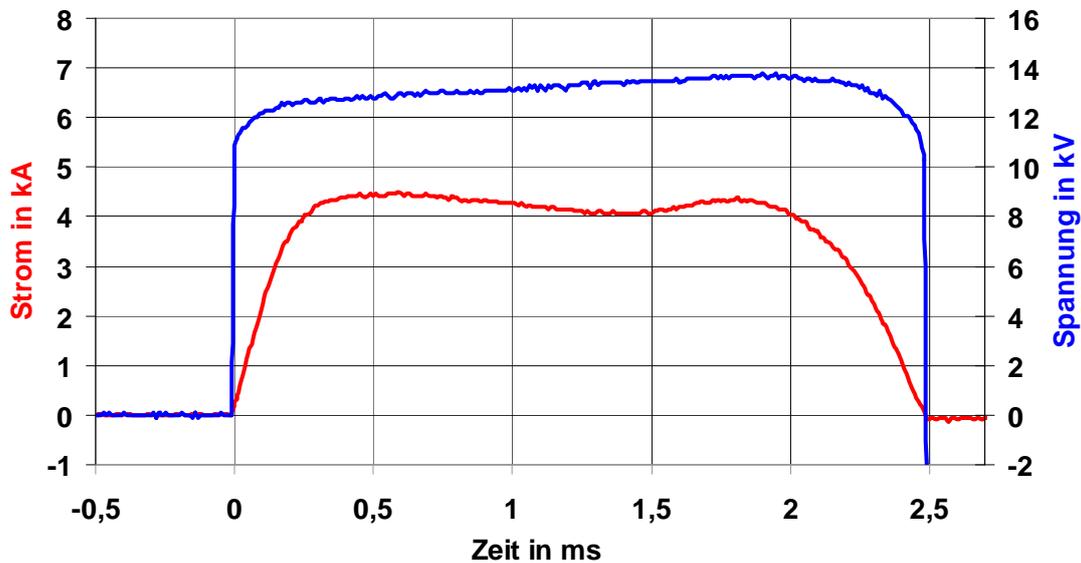


Abbildung 5.9: Oszillogramm eines 2-ms-Rechteckstoßstromes an einem MO-Widerstand der Größe 1

Die Prüfung mit Blitzstromimpulsen der Form 90/200 μs wurde durch das niederinduktive Parallelschalten aller 20 Kondensatoren und einer in Reihe zu diesen Kondensatoren geschalteten Spule mit einer Induktivität von ca. 24 μH realisiert. **Abbildung 5.10** zeigt das Oszillogramm eines solchen Stoßstromes der Form 90/200 μs an einem Hochspannungswiderstand. Die genauen Zeitparameter des abgebildeten Stoßstromes sind $T_1 = 89 \mu\text{s}$ und $T_2 = 200 \mu\text{s}$. Die dabei in den MO-Widerstand eingebrachte Energie betrug ca. 568 J/cm³.

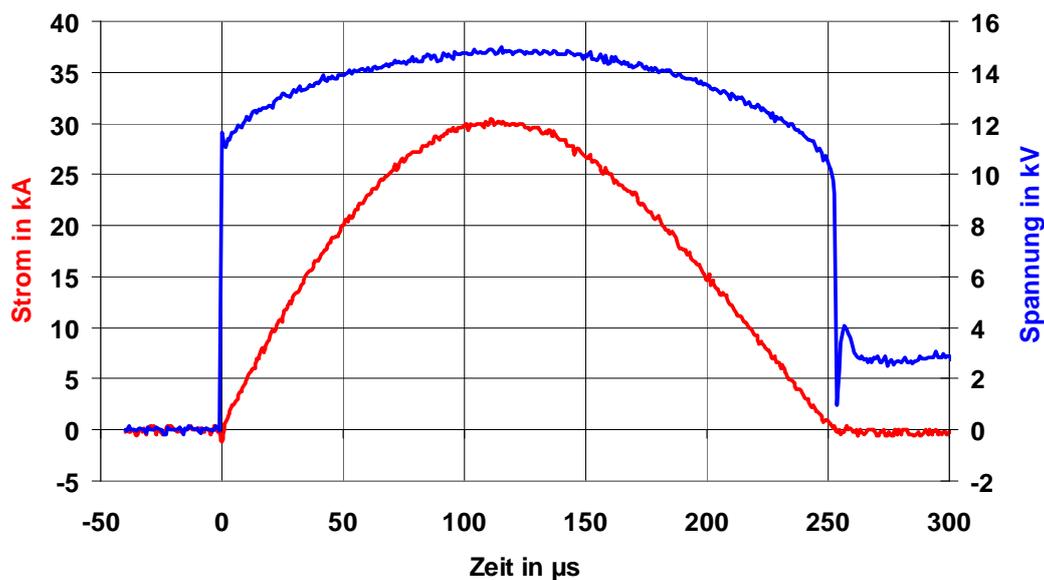


Abbildung 5.10: Oszillogramm eines Stoßstromes der Form 90/200 μs an einem MO-Widerstand der Größe 1

5.3 Wechselstromprüfsystem

Für die Wechselstromprüfung von MO-Ableitern wurde ein vollkommen neues System installiert (Firma Highvolt). Die Hauptkomponente des Systems ist ein Thomaregler-Transformator (Firma HTT), dessen Ausgangsspannung stufenlos von 0 bis 10 kV verstellbar ist.

Dieser nach Prof. Thoma benannte einphasige Stelltransformator beruht auf einer Stellwicklung aus massivem Kupferflachdraht, welche auf einen drehbar gelagerten Isolierzylinder aufgebracht wird. Auf das eine Ende der Stellwicklung wird der Strom mittels feststehender Bürsten übertragen. Der Abgriff an der anderen Seite der Stellwicklung erfolgt über einen Bürstenring, der in einer Schiene längs des Isolierzylinders geführt wird. Beim Drehen des Isolierzylinders kann sich der Bürstenring dadurch kontinuierlich auf der Stellwicklung bewegen (siehe **Abbildung 5.11**). Der Isolierzylinder verändert also nicht seine Lage, sondern dreht sich nur um sich selbst, während der Bürstenring auf der Stellwicklung entlang fährt. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt in der Möglichkeit, die Spannung kontinuierlich von Null bis zum Maximum einstellen zu können.

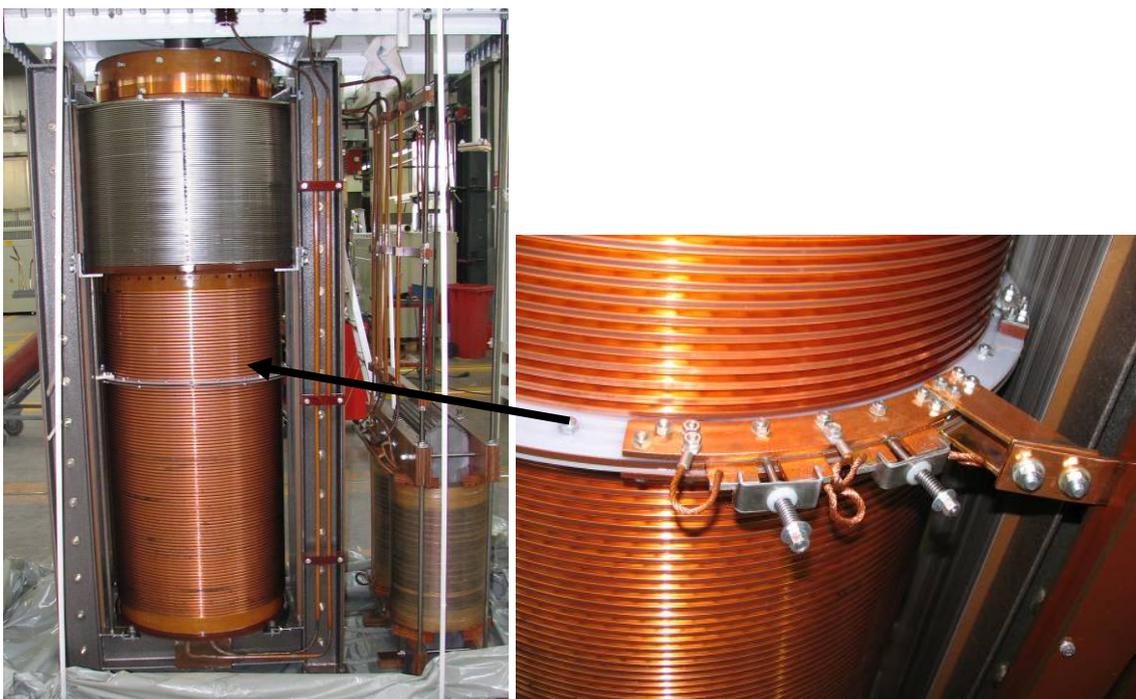


Abbildung 5.11: Bild des geöffneten Thomareglers (rechts: Bürstenring)

Der verwendete Transformator wird zweiphasig eingespeist und hat eine verkettete Eingangsspannung von 7,2 kV. Seine Bemessungsdauerleistung beträgt 450 kVA. Seine Kurzzeit Belastbarkeit liegt bei einer variablen Ausgangsspannung von 0 bis 10 kV bei 750 kVA. Dem eigentlichen Thomaregler, dessen Ausgangsspannung bauartbedingt nur maximal 6 kV beträgt, ist intern ein zweiter Transformator nachgeschaltet, um Spannungen bis 10 kV liefern

zu können. **Abbildung 5.12** zeigt das Schaltbild des gesamten Wechselstromprüfsystems. Gespeist aus dem 6 kV-Netz, ist dem Thomaregler ein primärer Leistungsschalter vorgeschaltet, der zum Anschalten des Trafos ans Netz dient. Nach dem Einschalten kann über ein Bedienpult die gewünschte Spannung vorgewählt werden. Die eingestellte Spannung wird dann über einen umrichter gespeisten Antrieb angefahren. Zur Messung der Sekundärspannung ist hierzu ein kapazitiver Spannungsteiler angebracht. Nachdem die Spannung angefahren ist, kann diese über den sekundären Leistungsschalter auf den Prüfling aufgeschaltet werden. Leider musste dieser Schalter aus technischen Gründen als Vakuumschalter ausgeführt werden, obwohl hier eigentlich ursprünglich ein Halbleiterschalter spezifiziert war. Dieser konnte jedoch von der ausführenden Firma aus technischen Gründen nicht geliefert werden. Dies hat zur Folge, dass nach dem Ausfall eines Prüflings am Ende der Prüfung noch für ca. 20..40 ms (Eigenzeit des Leistungsschalters) der volle Kurzschlussstrom fließt.

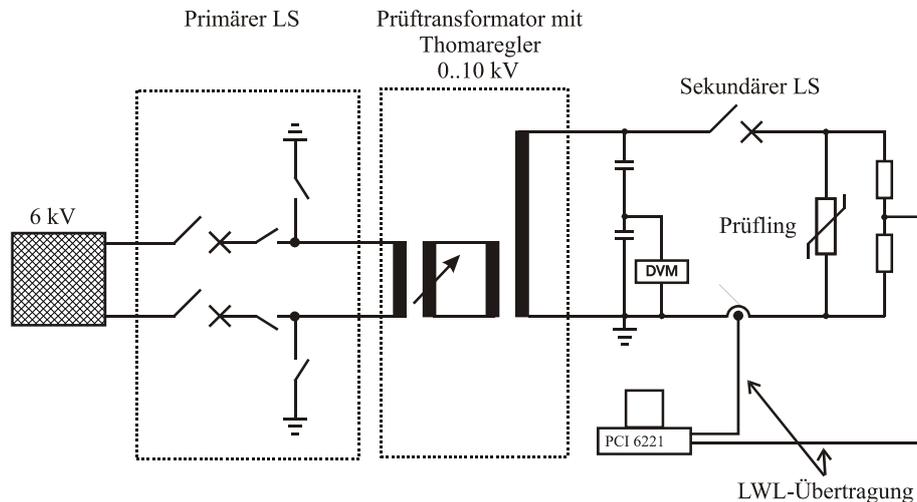


Abbildung 5.12: Ersatzschaltbild des Wechselstromprüfsystems

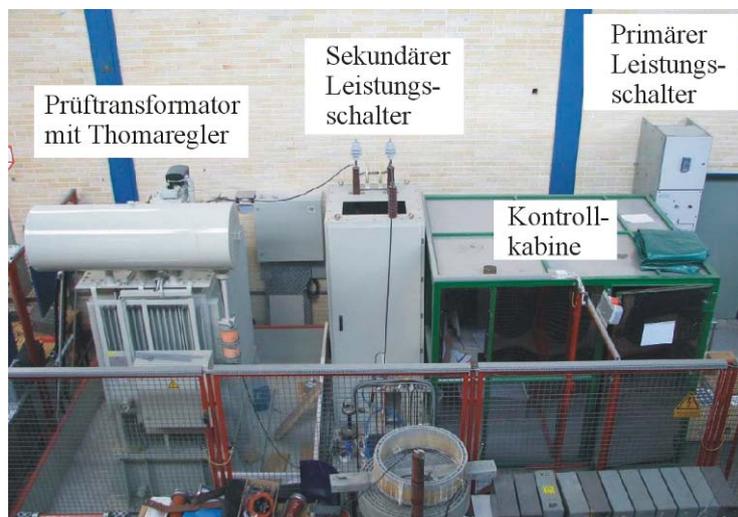


Abbildung 5.13: Wechselstromprüfsystem von links: Transformator, sekundärer LS, Messkabine, primärer LS



Abbildung 5.14: Prüflingsaufnahme des Wechselstromprüfsystems

Durch den LS-EIN Befehl wird die Messung am Computer gestartet und während der gesamten Versuchsdauer der Strom- und Spannungsverlauf am Prüfling aufgezeichnet. Die Messung der Spannung erfolgt durch einen ohmschen Teiler, die Messung des Stroms durch Hallwandlersensoren. Die Übertragung der Signale in die Messkabine erfolgt über ein optisches System, um Beschädigungen des Computersystems auszuschließen. Die Digitalisierung der Signale erfolgt im Computer mittels einer Messkarte (NI PCI 6221). Die Abtastrate beträgt 10 kHz. Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt durch ein eigens entwickeltes LabView-Programm. Dabei werden automatisch die umgesetzte Energie und die Versuchsdauer bestimmt und zusammen mit den Kurvenverläufen abgespeichert. **Abbildung 5.15** zeigt die typischen Kurvenverläufe während solch einer Prüfung. Es ist gut zu erkennen, dass der Strom zunächst etwas höher ist und dann innerhalb von etwa 50 ms abfällt, welches mit einem Konditionierungseffekt in der ZnO-Keramik zu erklären ist. Danach bleibt die Stromamplitude fast konstant, bis sie zum Zeitpunkt 300 ms wieder anzusteigen beginnt. Hier wirken sich die eingebrachte Energie und der damit verbundene Temperaturanstieg bei gleichzeitig fallender Restspannung aus (negativer Temperaturkoeffizient des MO-Widerstandes). Im Bereich der Strommaxima bzw. Minima ergibt sich eine Abflachung der Spannung, welche durch den Innenwiderstand des Transformators hervorgerufen wird. Etwa zum Zeitpunkt 380 ms wird der Widerstand zerstört und die Spannung bricht ein. Gleichzeitig steigt der Strom infolge des Lichtbogens am ausgefallenen Widerstand stark an. Es fließt für fast 40 ms der Kurzschlussstrom des Transformators durch den defekten Widerstand.

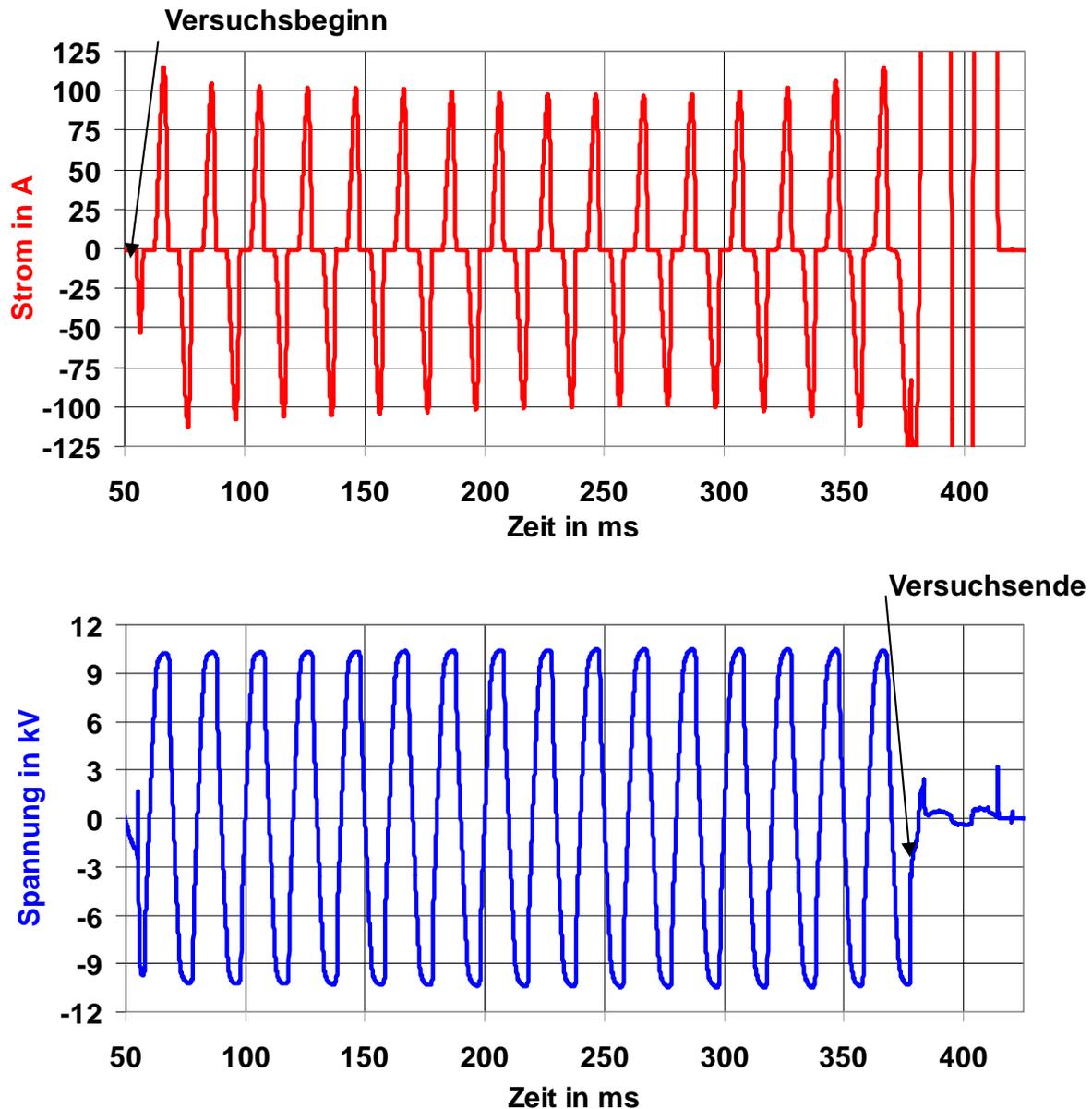


Abbildung 5.15: Verlauf des Stroms und der Spannung während einer AC-Prüfung

Das Fließen dieses Kurzschlussstroms, dessen Scheitelwert ca. 1200 A beträgt, führt zur weiteren Zerstörung des Widerstandes. Dieser Tatsache ist es zuzurechnen, dass nach den durchgeführten Untersuchungen eine klare Unterscheidung hinsichtlich des Fehlertyps nicht mehr möglich war. Ein Durchschlag führt infolge des Lichtbogens fast zwangsläufig zu einem Bruch, da das infolge des Lichtbogens entstehende Gas den Widerstand fast immer zum Platzen bringt. Nur bei einigen Prüflingen konnte definitiv ein Durchschlag als Fehlerursache erkannt werden.

5.4 Referenzspannungs- und Verlustleistungsmesssystem

Das Messsystem zur Ermittlung der Referenzspannung und der Verlustleistung dient der Bewertung des Zustandes der MO-Widerstände. Neben dem in der Norm [IEC 60099-4] vorge-

schrieben Vergleich der Restspannungen (gemessen bei Exponentialstoßströmen der Form $8/20 \mu\text{s}$) vor und nach der Energiebelastung sollten zusätzlich die Messung der Referenzspannung und der Verlustleistung zur Bewertung der MO-Widerstände herangezogen werden. Nach Einschätzung der Cigré-Arbeitsgruppe kann bei einer Änderung der Referenzspannung von mehr als 5 % von einer Änderung der Materialeigenschaft der ZnO-Keramik ausgegangen werden, die eine Bewertung eines MO-Widerstandes als defekt rechtfertigt. Im Rahmen der Untersuchung sollte zusätzlich die Änderung der Verlustleistung betrachtet werden, um zu klären, ob diese auch geeignet ist, eine Bewertung von MO-Widerständen vorzunehmen. Es zeigte sich die Notwendigkeit, die Messung der Referenzspannung und der Verlustleistung zu automatisieren, da gerade die Verlustleistung eine starke Abhängigkeit von der Zeitdauer nach Anlegen der Spannung aufweist. Diese und andere Sachverhalte im Zusammenhang mit diesen Messungen werden noch später in Kapitel 6 erläutert. Das gesamte Messsystem wurde aufgrund dieser Erkenntnisse so konzipiert, dass es in der Lage ist, die Referenzspannung automatisch 5 s nach Start der Messung und die Verlustleistung ebenfalls automatisch 60 s nach Abschluss der Referenzspannungsmessung zu ermitteln und diese automatisch zu protokollieren.

5.4.1 Grundlagen

Die Referenzspannung U_{ref} eines Ableiters oder eines Ableiterbaugliedes ist nach [IEC 60099-4] definiert als Spitzenwert der betriebsfrequenten Wechselspannung dividiert durch $\sqrt{2}$, welche angelegt werden muss, um den Referenzstrom zu erhalten. Der Referenzstrom ist definiert als der Spitzenwert des resistiven Anteils des betriebsfrequenten Wechselstroms durch den Ableiter oder das Ableiterbauglied. Sollte der sich ergebende Strom asymmetrisch sein, zum Beispiel durch vorherige Impulsbelastung des MO-Widerstandes, so ist der höhere Wert als Referenzstrom anzunehmen, siehe **Abbildung 5.16**. Nach der Norm gilt es als hinreichend genau, den resistiven Anteil des Stromes als Augenblickswert des Stromes zum Zeitpunkt des Spannungsscheitelwertes zu bestimmen. Dies gilt allerdings nur für hinreichend große Referenzströme, bei denen ein deutlicher resistiver Anteil im Strom erkennbar ist. Der Strom aus **Abbildung 5.16** erreicht sein positives Maximum ca. 1 ms vor dem Spannungsmaximum, während hingegen die negativen Strom- und Spannungsamplituden zur selben Zeit auftreten.

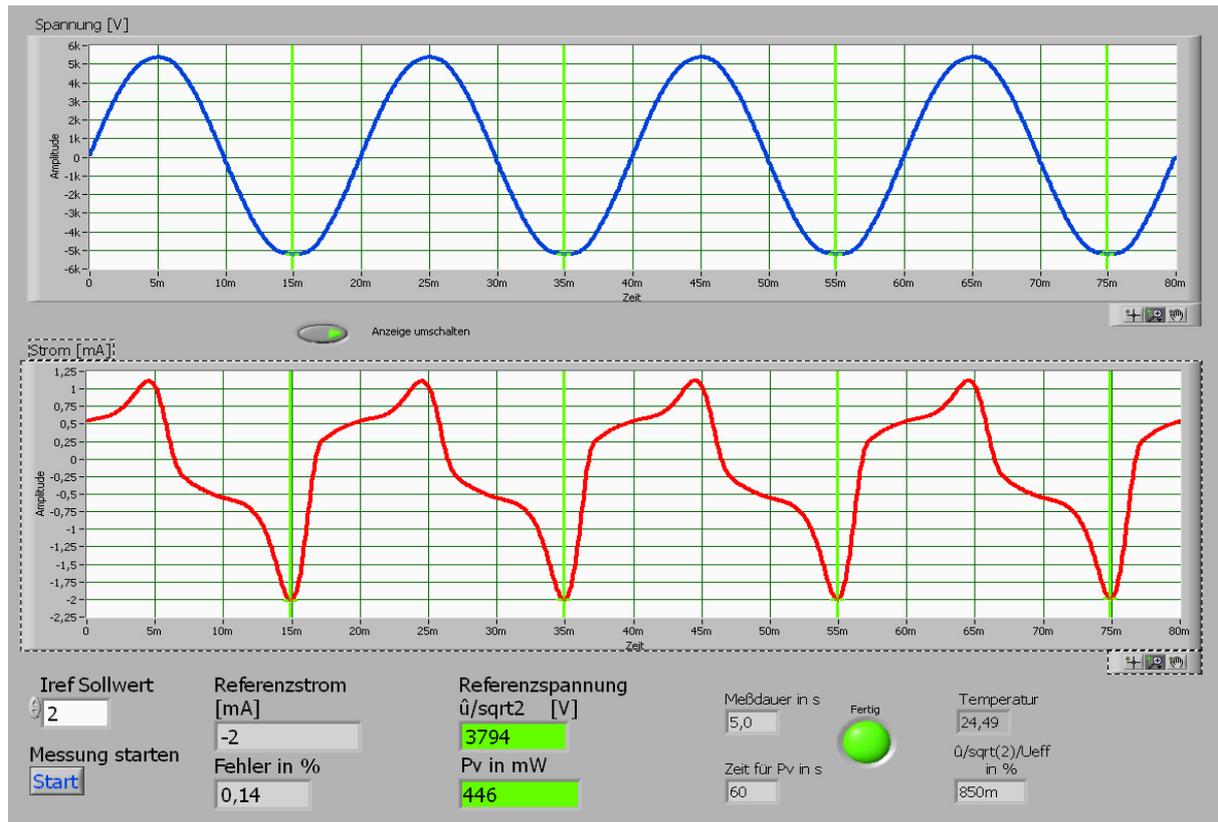


Abbildung 5.16: Asymmetrischer Referenzstrom eines Mittelspannungs-MO-Widerstandes, gemessen nach Impulsbelastung mit einem Impuls der Form $4/10 \mu\text{s}$

Für den Referenzstrom gilt auch deshalb die Forderung, groß genug zu sein, um die Einflüsse von Streukapazitäten auf den Referenzstrom vernachlässigen zu können (dies gilt in besonderem Maße für komplette Ableiter). Für Ableiter mit nur einer Widerstandssäule nennt die Norm eine übliche Referenzstromdichte von $0,05 \text{ mA/cm}^2 \leq I_{\text{Ref}} / A \leq 1,0 \text{ mA/cm}^2$. Hierbei ist als Fläche A die zumeist kreisförmige Kontaktfläche des MO-Widerstandes zu nehmen. Die Wahl des Referenzstromes obliegt dem Ableiterhersteller. Im Rahmen dieses Projektes wurde, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe, eine Referenzstromdichte von J_{Ref} von $0,12 \text{ mA/cm}^2$ gewählt. Durch die Wahl eines auf die Fläche bezogenen Referenzstromes sollen die Bedingungen für alle Hersteller und Größen gleich gehalten werden.

In der Fertigung von Ableitern aus einzelnen MO-Widerständen kommt der Referenzspannung eine besondere Bedeutung zu. Bei Kenntnis der Referenz- und Restspannungen der verwendeten MO-Widerstände kann nach der Montage durch Messung der Referenzspannung am gesamten Ableiter auf dessen Restspannung geschlossen werden. Dies ist wichtig, da insbesondere im Bereich von Hochspannungsableitern keine geeigneten Prüfkreise zur direkten Messung der Restspannung verfügbar sind. Die Referenzspannung wird auch zur Auswahl des richtigen Prüflings bei der Durchführung einer Arbeitsprüfung herangezogen.

Um eine aussagekräftige Messung der Referenzspannung durchführen zu können, ist es erforderlich, dass die verwendete Spannungsquelle einen hinreichend niedrigen Innenwiderstand besitzt. Ist dies nicht der Fall, so ergibt sich im Bereich des Strommaximums eine „Abplattung“ der Spannung, welche die Messung verfälscht. Da die Norm hierzu keine genauen Angaben macht, sondern nur von einer näherungsweise sinusförmigen Spannung spricht, wurde für das hier vorliegende Projekt das System so ausgelegt, dass folgende Forderung erfüllt wird:

$$\frac{U_{\text{eff}}}{\left(\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}\right)} \leq 1,02 \quad (5.9)$$

Diese Forderung steht im Einklang mit den Anforderungen an die Prüfwechselfspannung während einer Arbeitsprüfung nach [IEC 60099-4].

Unter der Verlustleistung eines MO-Widerstandes versteht man die elektrische Wirkleistung, die in einem MO-Widerstand bei anliegender Wechselfspannung umgesetzt wird. Die Messung dieser Verlustleistung wird zur Bestimmung der erhöhten Bemessungs- und Dauerspannung während der Arbeitsprüfung herangezogen [IEC 60099-4]. Es ist bekannt, dass die Messung der Verlustleistung an einem Ableiter oder einem Ableiterbauglied mit Schwierigkeiten verbunden ist. Im Weiteren sollen die Ursachen dieser Schwierigkeiten näher ausgeführt werden.

Die Verlustleistung an einem Ableiter ergibt sich zu:

$$P_{\text{ct wahr}} = P_{\text{ctw}} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi_w) \quad (5.10)$$

Die vom Messsystem angezeigte Verlustleistung ergibt sich zu:

$$P_{\text{ct angezeigt}} = P_{\text{cta}} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi_A), \quad (5.11)$$

wobei zunächst davon ausgegangen wird, dass die Messung des Spannungs- und Stromeffektivwertes fehlerlos sei.

Aus Gleichung (5.10) und Gleichung (5.11) ergibt sich der Fehler in der Verlustleistungsmessung, bedingt durch den Fehler im Phasenwinkel zu:

$$F_\varphi = \frac{(U \cdot I \cdot \cos(\varphi_A)) - (U \cdot I \cdot \cos(\varphi_w))}{U \cdot I \cdot \cos(\varphi_w)} = \frac{\cos(\varphi_A) - \cos(\varphi_w)}{\cos(\varphi_w)} \quad (5.12)$$

mit $\varphi_A = \varphi_w + \Delta\varphi$, wobei $\Delta\varphi$ der Winkelfehler des Messsystems ist folgt:

$$F_\varphi = \frac{\cos(\varphi_w + \Delta\varphi) - \cos(\varphi_w)}{\cos(\varphi_w)} \quad (5.13)$$

Abbildung 5.17 zeigt den Einfluss des Winkelfehlers auf den Messwert für verschiedene wahre Phasenwinkel. Es zeigt sich deutlich, dass für kapazitivere Prüflinge der Einfluss des Winkelfehlers des Messsystems stark zunimmt.

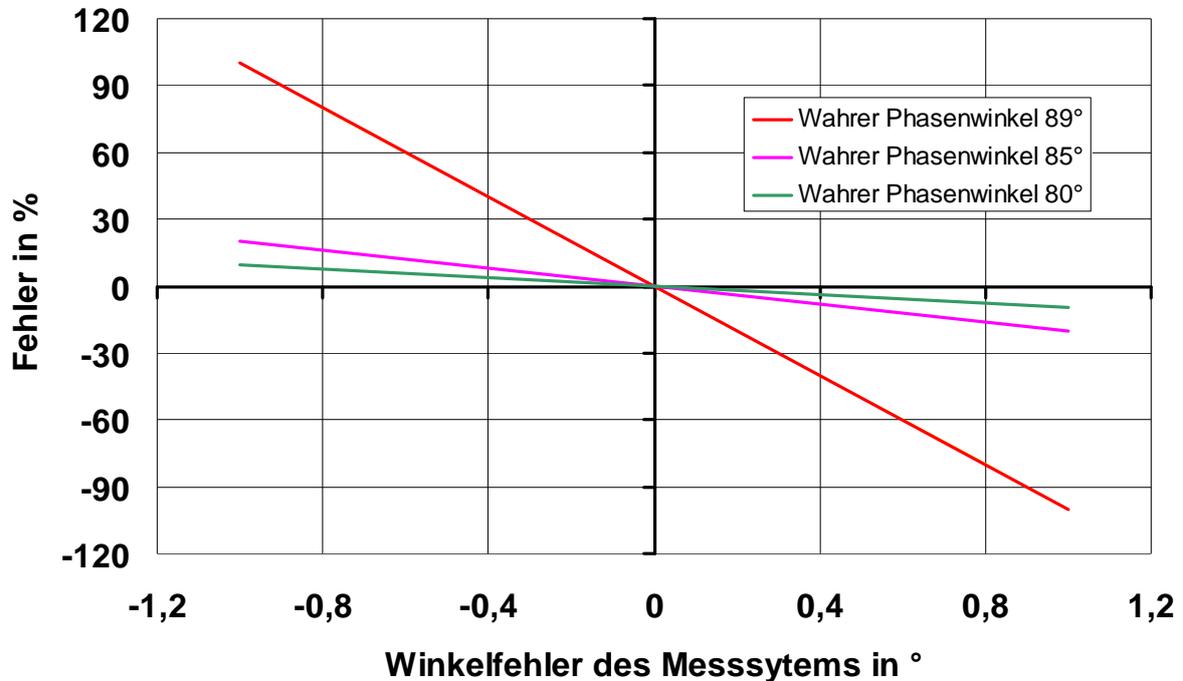


Abbildung 5.17: Betragsfehler eines Verlustleistungsmesssystems in Abhängigkeit vom Winkelfehler des Messsystems

Der Einfluss des Messfehlers der Spannungs- und Strommessung ist linear. Die Messfehler in der Spannungs- und Strommessung addieren sich [Pfeif-96]. Der Einfluss des Winkelfehlers auf die Verlustleistungsmessung ist demnach dominant und infolgedessen in der Auslegung eines solchen Systems besonders zu berücksichtigen. Da heutzutage primär digitale Messsysteme eingesetzt werden, wird im Weiteren auf die Anforderungen dieser Messsysteme im Hinblick auf eine Verlustleistungsmessung eingegangen. Die Frage nach der vertikalen Auflösung ist hierbei nicht pauschal zu beantworten. Der Messbereich und damit die vertikale Auflösung sollte stets auf die zu erwartenden Messgrößen angepasst werden. Zu berücksichtigen ist ebenfalls, dass ein AD-Wandler bauartbedingt einen Quantisierungsfehler aufweist, der sich wie folgt berechnet [Pfeif-96]:

$$F_q = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{Messbereich}}{2^n} \quad (5.14)$$

n : Auflösung in bit

Die Frage nach der notwendigen Abtastrate soll durch ein einfaches Modell abgeschätzt werden. Hierzu wird angenommen, dass der Effektivwert der Spannung und des Stromes und

deren Phasenwinkel zueinander aus den ermittelten Signalverläufen errechnet und daraus nach Gleichung (5.10) die Verlustleistung bestimmt wird. Die Bestimmung des Phasenwinkels der beiden Signale zueinander soll dabei durch die Auswertung der Nulldurchgänge der Signale erfolgen. Ferner wird eine nacheinander erfolgende und nicht gleichzeitige stattfindende Abtastung der Signale vorausgesetzt. Aus diesen Annahmen ergibt sich ein maximaler Zeitfehler in der Abtastung von:

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{1}{f_{\text{Abtast}}} \quad (5.15)$$

Dies führt bei einem 50-Hz-Signal auf folgenden Winkelfehler:

$$\Delta \varphi = \frac{360^\circ}{20 \text{ ms}} \cdot \frac{2}{f_{\text{Abtast}}} = \left(36000 \frac{^\circ}{\text{s}} \right) \cdot \frac{1}{f_{\text{Abtast}}} \quad (5.16)$$

Beispiel: Ein Messsystem mit einer Abtastrate von 500 kHz hat damit einen max. Phasenwinkelfehler von $0,072^\circ$.

Für Verlustleistungsmessungen an MO-Widerständen in einem Spannungsbereich, in dem der Strom durch den Widerstand noch keine nennenswerte resistive Komponente aufweist, liegt der Phasenwinkel typisch im Bereich von ca. 84° . Für diesen Fall und unter der Bedingung, dass der Fehler infolge der Abtastrate unter 1 % liegen soll, kann mit Hilfe von Gleichung (5.13) und Gleichung (5.16) eine Mindestabtastrate von ca. 600 kHz abgeschätzt werden.

Abbildung 5.18 zeigt einen Ausschnitt aus einer Langzeitverlustleistungsmessung. Während sich in diesem Zeitraum die Spannung nur um max. 0,38 % geändert hat, lag die Änderung in der Verlustleistung mit max. 3,02 % deutlich höher. Dies zeigt, dass bei der Messung der Verlustleistung ein hoher Anspruch an die Konstanz der Spannung gestellt werden muss. Eine weitere Schwierigkeit der Verlustleistungsmessung liegt in der zeitlichen Veränderung der Verlustleistung nach dem Anlegen einer Spannung. Die Verlustleistung fällt nach Anlegen einer konstanten Spannung im Minutenbereich relativ schnell ab (siehe hierzu auch Kapitel 6.3). Daher ist bei der Messung auch immer darauf zu achten, dass die Messung zu einem genau definierten Zeitpunkt erfolgt (siehe auch Kapitel 6.3). Als Kompromiss zwischen einer zügigen Messung und der Reproduzierbarkeit wurde in diesem Projekt ein Messzeitpunkt von 60 s nach Anlegen der Spannung für die Verlustleistungsmessung gewählt.

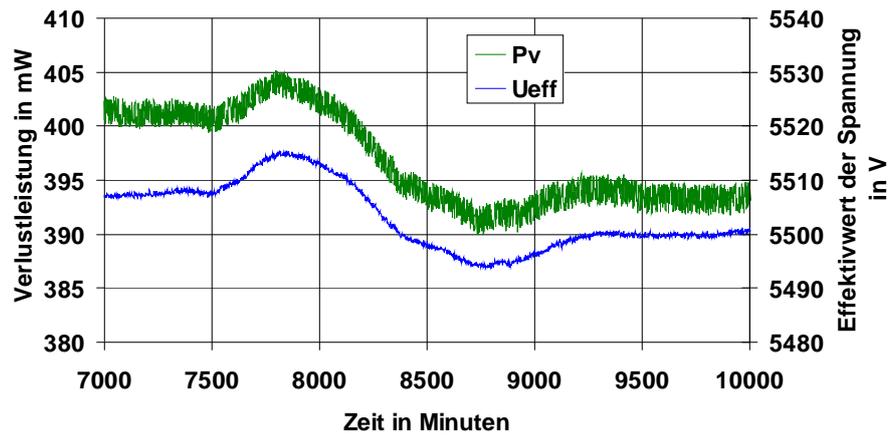


Abbildung 5.18: Ausschnitt aus einer Langzeitverlustleistungsmessung

Werden die oben beschriebenen Anforderungen durch das verwendete Messsystem erfüllt, so ist auch die Verwendung als Referenzspannungsmesssystem möglich, da dort die Anforderungen weitaus geringer sind. Für ein reines Referenzspannungsmesssystem hat sich eine Abtastrate von 10 kHz als ausreichend erwiesen.

5.4.2 Aufbau

Das vorliegende Messsystem zur Messung der Referenzspannung und der Verlustleistung (siehe **Abbildung 5.19**) besteht aus einem Computer mit einer eingebauten D-A-Wandlerkarte (NI-PCI 6221), einem Leistungsverstärker, einem Anpasstransformator, einem Hochspannungstransformator, einem ohmschen Spannungsteiler, einem Stromshunt und einem USB-Oszilloskop (NI-USB-5133).



Abbildung 5.19: Referenzspannungs- und Verlustleistungsmesssystem (ohne Darstellung der Auswerteeinheit)

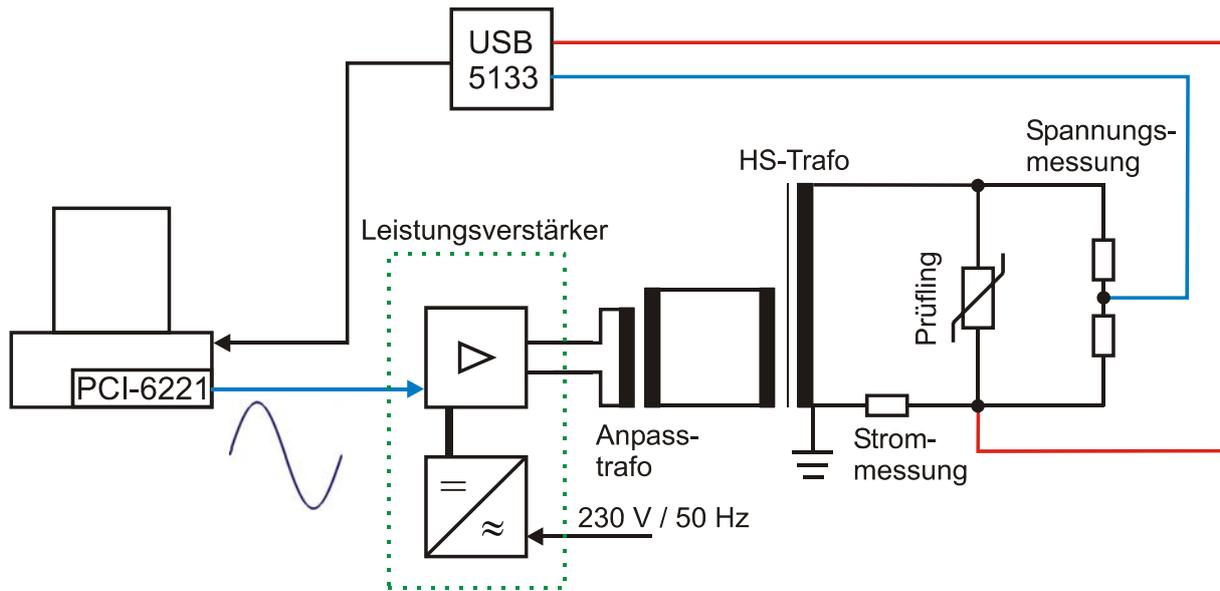


Abbildung 5.20: Blockschaltbild Referenz- und Verlustleistungsmesssystem

Die Erzeugung der benötigten Hochspannung erfolgt durch einen Leistungsverstärker mit nachgeschaltetem Anpasstransformator, welcher einen Hochspannungstransformator speist (siehe **Abbildung 5.20**). Die Signalerzeugung (Sinuswelle mit 50 Hz) erfolgt durch eine im Rechner eingebaute Digital-Analog-Wandlerkarte. Dieses Wechselspannungssignal wird dann dem Leistungsverstärker zugeführt. Der große Vorteil gegenüber der sonst üblichen Lösung mit einem ans Netz angeschlossenen Stelltransformator, welcher einen Hochspannungstransformator speist, liegt darin, dass die erzeugte Hochspannung nicht den üblichen Netzstörungen unterliegt. Die erzeugte Hochspannung hat eine konstante Frequenz von 50 Hz und weist keinerlei störende Oberwellen auf. Des Weiteren kann die Spannungsamplitude direkt von der Software aus gesteuert werden, wodurch eine schnelle Regelgeschwindigkeit erreicht wird. Als Leistungsverstärker kommt ein selbstgebauter Linearverstärker zum Einsatz, aber auch der Einsatz eines konventionellen Audio-Verstärkers aus dem HiFi-Bereich wäre hier möglich. Eventuell müsste einem solchen Audio-Verstärker ausgangsseitig ein Lastwiderstand parallel geschaltet werden, da es sonst möglicherweise zu Problemen durch die kapazitive Last des Prüflings kommen könnte.

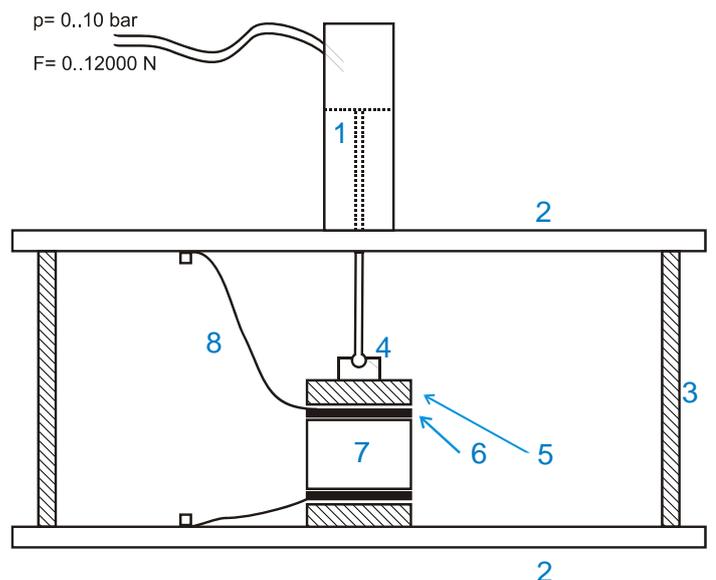
5.4.3 Regelung

Für das vorliegende Projekt wurde die Messung der Referenzspannung voll automatisiert. Hierzu wurde eine Regelung entwickelt, die es erlaubt, die Messung der Referenzspannung innerhalb von 1 s durchzuführen. Die Messung beginnt mit dem Anfahren eines vorprogrammierten Spannungswertes. Der sich dazu einstellende Stromwert wird abgespeichert. Als nächstes wird ein zweiter, ebenfalls fest in der Software vorprogrammierter Spannungswert

angefahren; auch hierzu wird der sich einstellende Stromwert abgespeichert. Aus diesen zwei Wertepaaren wird dann eine lineare Interpolation auf den gesuchten Stromwert durchgeführt. Dieser errechnete Wert wird dann angesteuert und der sich einstellende Stromwert gemessen. Aus diesem und dem vorigen Wertepaar wird dann erneut eine lineare Interpolation durchgeführt. Dieses Verfahren wird solange angewendet, bis der Stromsollwert unter Einbeziehung eines zulässigen Abweichungsintervalls erreicht ist. Nun werden der Strom- und der Spannungswert abgespeichert und die Messung der Referenzspannung ist abgeschlossen. Dieser recht einfache Regelalgorithmus hat sich in der Praxis bewährt und führt im Allgemeinen nach 3-5 Regelzyklen schon zum Erfolg. Da die Änderung der Spannungsamplitude am Rechnerausgang zu einer kleinen Störung in der Hochspannung führt, muss nach der Änderung eine Totzeit von ca. 100 ms eingehalten werden, damit alle durch die Änderung hervorgerufenen Störungen abgeklungen sind.

5.5 Prüflingsaufnahme

Für die Durchführung der umfangreichen Versuchreihen war es notwendig, eine Prüflingsaufnahme zu entwickeln, welche reproduzierbare und definierte Bedingungen für den Versuch gewährleistet, gleichzeitig aber auch eine zügige Durchführung der Versuche ermöglicht. Zu diesem Zweck wurde eine pneumatische Prüflingsaufnahme angefertigt (siehe **Abbildung 5.21**).



1 Druckluftzylinder, 2 Aluminiumplatte, 3 GFK-Stützen,
 4 Kugelgelenk, 5 Wärmeisolationsscheibe, 6 Aluelektrode,
 7 MO-Widerstand, 8 Kupferbänder

Abbildung 5.21: Prüflingsaufnahme

Die Aufnahme besteht aus einem Pneumatikzylinder (Festo / DNC 125), welcher seine Kraft über ein Kugelgelenk, eine Wärmeisolationsscheibe und eine Aluminiumelektrode auf den MO-Widerstand überträgt. Eine weitere Wärmeisolationsscheibe ist unterhalb des Prüflings angebracht. Die Wärmeisolationsscheiben sollen eine Übertragung der Wärme in axialer Richtung unterbinden. Es handelt sich dabei um einen Fibersilikat-Werkstoff (Contherm – FS 650) mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einer Dicke von $19,1 \text{ mm}$. Der Strom wird über ein Kupferband zu- und abgeführt. Da es infolge der hohen Ströme und der mechanischen Zerstörung am Prüfling zu Strommarken und Materialabbrand kommen kann, werden für jeden Versuch zwei neue Aluminiumelektroden verwendet, die auf und unter dem MO-Widerstand platziert werden. Die Aluminiumelektroden haben eine Dicke von 5 mm , ihr Durchmesser ist so gewählt, dass er ca. $1\text{-}2 \text{ mm}$ kleiner ist als der des MO-Widerstands. Dies soll dielektrische Probleme infolge der Kontaktelektrode verhindern. Zusätzlich ist der Rand der Elektrode abgerundet. Um gleiche Bedingungen für alle Versuche und alle Prüflinge zu gewährleisten, wurde ein Anpressdruck von $3 \text{ N}/\text{mm}^2$ gewählt. Dieser Anpressdruck führt bei Widerständen von 40 mm Durchmesser zu einer Anpresskraft von 3769 N , bei MO-Widerständen von 60 mm Durchmesser zu 8482 N . Diese recht großen Kräfte wurden in Absprache mit den beteiligten Herstellern gewählt. Zum einen sollen die Prüfungen damit in einem für Ableiter realistischen Bereich der Anpresskraft durchgeführt werden, zum anderen soll die Aufnahme steif genug sein, um ein Abheben der Elektroden bei kurzen Impulsen zu vermeiden (siehe auch Kapitel 6.4). Wie sich zeigte, ist die mechanische Zerstörung des Prüflings mit Gasentwicklung verbunden. Aus diesem Grund verfügt die Prüflingaufnahme über eine Absaugung, durch die entstandene Gase ins Freie abgeleitet werden.

6 Voruntersuchungen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Ergebnisse der durchgeführten Voruntersuchungen vorgestellt. Hierzu gehören die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von Referenzspannung und Verlustleistung. Hierdurch sollte geklärt werden, ob diese Messungen unter normalen Laborbedingungen durchgeführt werden können oder ob es notwendig ist, definierte Temperaturbedingungen (z.B. durch Einsatz eines Klimaschranks) zu schaffen. Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Verlustleistung nach Anlegen einer Spannung verhält, um daraus einen passenden Zeitpunkt für die Messung ableiten zu können. Als Letztes wird die Untersuchung des Verlaufs der Anpresskraft bei Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ vorgestellt. Mit dieser sollte geklärt werden, ob ein Abheben der Elektrode der Prüflingsaufnahme (siehe Kapitel 5.5) während eines solchen Hochstoßstromimpulses zu erwarten ist.

6.1 Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung

Da die Referenzspannung zur Beurteilung des Zustandes der MO-Widerstände nach der Prüfung herangezogen wurde, wurde zunächst geklärt, inwieweit die Referenzspannung temperaturabhängig ist und ob dies bei der Messung zu berücksichtigen ist. Die Messung wurde hierzu in einem Ofen mit konstant geregelter Temperatur durchgeführt. Nachdem die Prüflinge die Ofen-Temperatur angenommen hatten, wurde die Referenzspannung automatisch bei einer Referenzstromdichte von $0,12 \text{ mA/cm}^2$ gemessen (siehe hierzu auch Kapitel 5.4).

Abbildung 6.1 zeigt die prozentuale Änderung der Referenzspannung über der Temperatur, für MO-Widerstände der Größe 1. Als Bezugswert wurde hierzu der $20\text{-}^\circ\text{C}$ -Wert herangezogen. Es lässt sich eine Temperaturabhängigkeit erkennen, welche allerdings nicht sehr ausgeprägt ist. Im Bereich zwischen $10\text{ }^\circ\text{C}$ und $20\text{ }^\circ\text{C}$ liegt sie, mit einer gewissen Streuung, bei etwa 0% . Erst ab einer Temperatur von $20\text{ }^\circ\text{C}$ ist ein näherungsweise linearer Abfall mit der Temperatur zu erkennen. Die Steigung liegt etwa bei $(-1\% / 24\text{ }^\circ\text{C}) = -0,0417\% / ^\circ\text{C}$. Dieser Abfall lässt sich mit dem Temperaturverhalten des Materials erklären, das bei höheren Temperaturen einen niedrigeren Widerstand annimmt. Da die späteren Messungen im Labor unter labortypischen Bedingungen an auf Raumtemperatur abgekühlten MO-Widerständen durchgeführt wurden, kann von einem Temperaturbereich von $17\text{ }^\circ\text{C}$ bis $27\text{ }^\circ\text{C}$ ausgegangen werden. In diesem Bereich ist eine Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung von weniger als $0,5\%$ zu erwarten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde auf eine Temperaturkorrektur der gemessenen Referenzspannungswerte verzichtet.

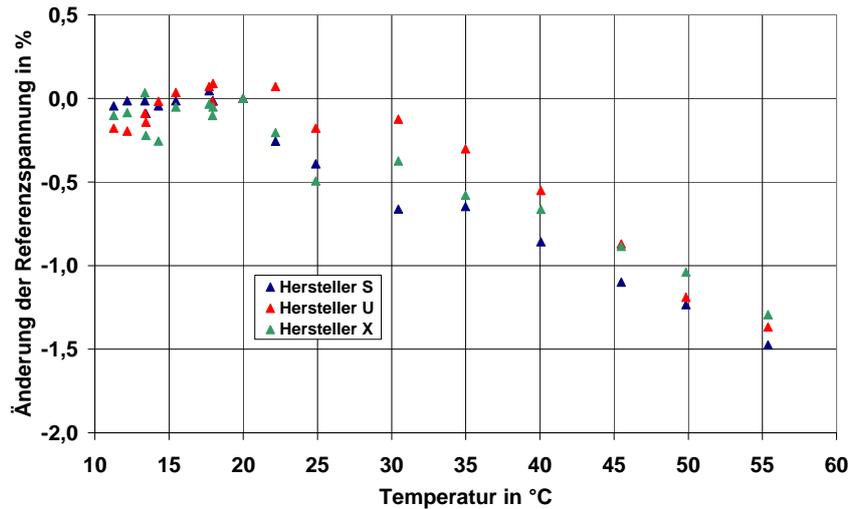


Abbildung 6.1: Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung – Größe 1

Für MO-Widerstände der Größe 2 zeigt **Abbildung 6.2** die prozentuale Änderung der Referenzspannung über der Temperatur. Als Bezugstemperatur wurde hierzu ebenfalls der 20 °C Wert herangezogen. Es lässt sich eine geringe Temperaturabhängigkeit erkennen, ähnlich derer für die Widerstände der Größe 1. Zwischen 10 und 20 °C ist praktisch keine Abhängigkeit zu erkennen. Ab einer Temperatur von 20 °C fällt die Referenzspannung dann näherungsweise linear ab. Hierbei liegt die Steigung dieses Abfalls bei max. $(-1,5 \% / 25 \text{ °C}) = -0,06 \% / \text{°C}$. Im Bereich von 17 bis 27 °C, einem Labor typischem Temperaturbereich, ist damit lediglich mit einer Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung von weniger als 0,6 % zu rechnen. Daher kann auch bei Widerständen dieses Typs auf eine Temperaturkompensation verzichtet werden.

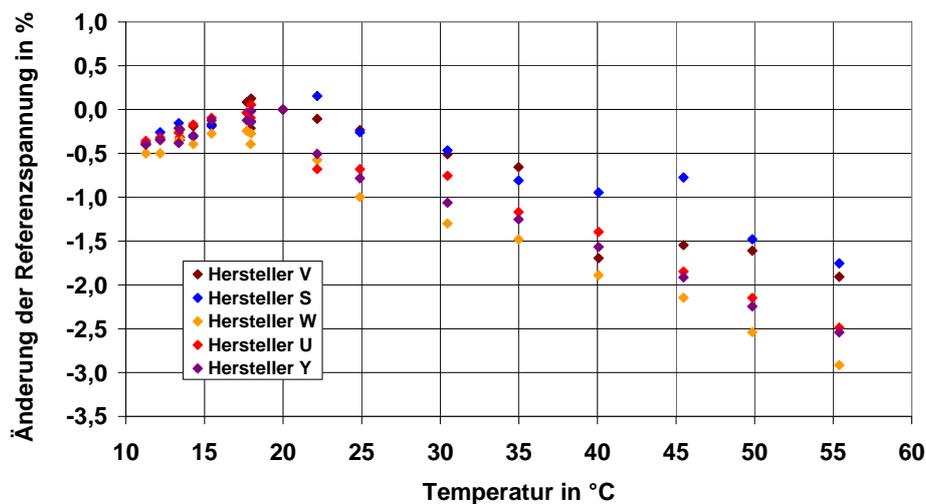


Abbildung 6.2: Temperaturabhängigkeit der Referenzspannung – Größe 2

6.2 Temperaturabhängigkeit der Verlustleistung

Um die Änderung der Verlustleistung auf ihre Eignung als mögliches Fehlerkriterium zu untersuchen, wurde die Änderung der Verlustleistung in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Zu diesem Zweck wurde während der Versuche die Spannung am jeweiligen Widerstand konstant gehalten und die Temperatur variiert. Die Spannung wurde nur während der Verlustleistungsmessung angelegt und die Verlustleistung 60 s nach Anlegen der Spannung gemessen. **Abbildung 6.3** zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen für die MO-Widerstände der Größe 1. Es ist eine deutliche Abhängigkeit der Verlustleistung von der Temperatur zu erkennen. Die MO-Widerstände der Hersteller U und X weisen hierbei eine geringere Steigung von ca. 1,4 %/°C auf, im Gegensatz zu den MO-Widerständen des Herstellers S mit ca. 2,4 %/°C. Die Messung zeigt deutlich, dass bei einer Auswertung der Verlustleistung der Temperatureinfluss berücksichtigt werden muss. Dies könnte durch Korrektur der gemessenen Werte mittels der Kurven nach **Abbildung 6.3** erfolgen, besser jedoch durch eine konstante Temperatur bei der Messung der Verlustleistung.

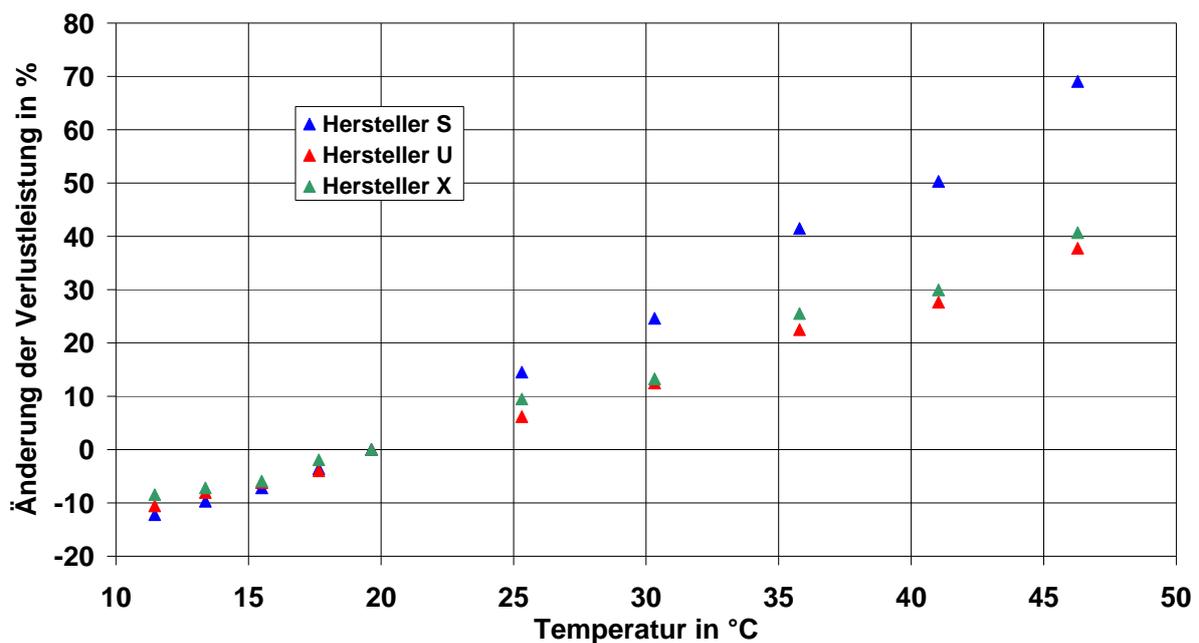


Abbildung 6.3: Änderung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Spannung – Größe 1

Wie schon für die MO-Widerstände der Größe 1, so wurde die Temperaturabhängigkeit ebenfalls für MO-Widerstände der Größe 2 untersucht. Hierbei wurden die gleichen Bedingungen wie für die Untersuchungen an den MO-Widerständen der Größe 1 eingehalten. **Abbildung 6.4** zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen für die MO-Widerstände der Größe 2. Es ist auch hier eine deutliche Abhängigkeit der Verlustleistung von der Temperatur zu erkennen.

Die MO-Widerstände der einzelnen Hersteller weisen allerdings eine geringere Streuung in der Steigung zueinander auf. Die Steigung der Geraden liegt im Mittel etwa bei 1,9 %/°C. Auch für die MO-Widerstände der Größe 2 sind die Temperaturverhältnisse während Eingangs- und Ausgangsmessung zu berücksichtigen und entsprechend zu korrigieren.

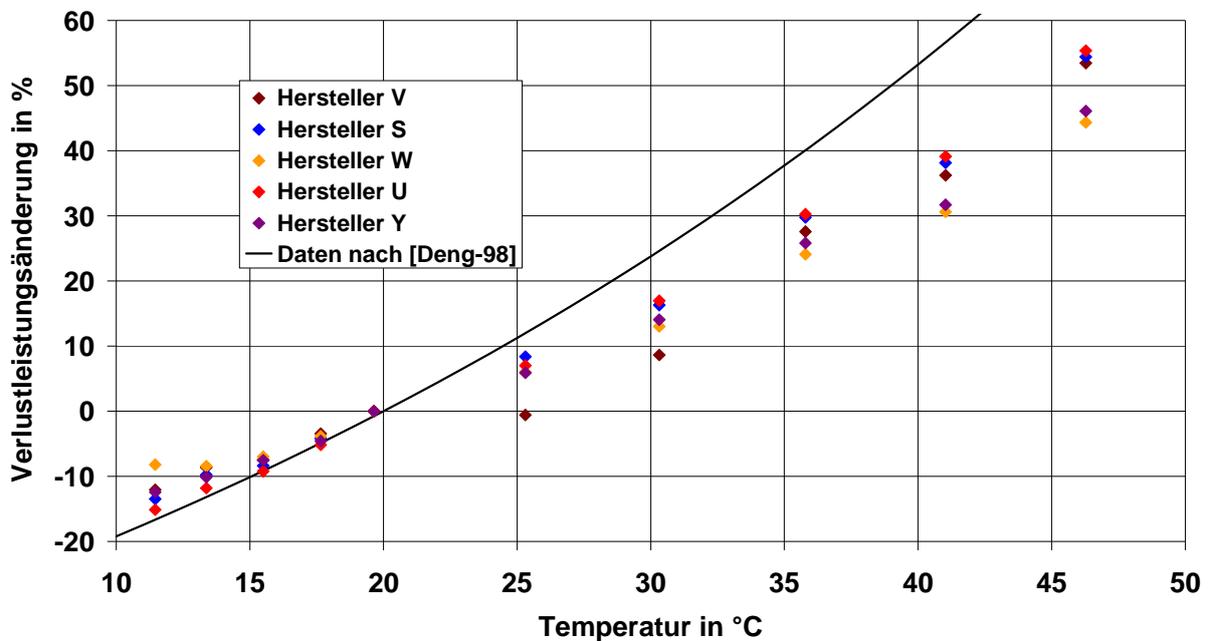


Abbildung 6.4: Änderung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Spannung – Größe 2; zusätzlich Vergleich mit den Daten nach [Deng-98]

In Abbildung 6.4 ist zusätzlich die Änderung der Verlustleistung nach [Deng-98] eingezeichnet (siehe auch Kapitel 3.2). Dass die Kurven sich nicht decken, kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann das von Dengler untersuchte Material andere Eigenschaften haben, zum anderen beschreibt Dengler, dass die empirisch gefundene Gleichung für die Abhängigkeit der Verlustleistung von der Temperatur, auf der diese Kurve beruht, auch in seinen Untersuchungen erst bei höheren Temperaturen (> 60 °C) eine gute Deckung mit den Messergebnissen zeigt.

6.3 Zeitverhalten der Verlustleistung

Ein Teil des Voruntersuchungsprogramms beschäftigte sich mit dem zeitlichen Verhalten der Verlustleistung. Es ist bekannt, dass die Verlustleistung nach dem Anlegen einer Spannung zunächst absinkt, um dann nach längerer Zeit (Tage) wieder anzusteigen (siehe [IEC 60099-4]). Da zunächst geplant war, die Verlustleistung als Fehlerkriterium heranzuziehen, wurde im Rahmen dieses Projektes auch das zeitliche Verhalten einiger MO-Widerstände untersucht.

Hierzu wurde zunächst die Referenzspannung bei der Referenzstromdichte von $0,12 \text{ mA/cm}^2$ ermittelt und danach das 0,8-fache dieser Spannung⁸ konstant an den Widerstand angelegt. Der Versuch wurde in einer Messkammer durchgeführt, deren Temperatur konstant bei $19 \text{ °C} \pm 0,3 \text{ °C}$ gehalten werden konnte. **Abbildung 6.5** zeigt den Verlauf der Verlustleistungen für MO-Widerstände der Hersteller S, U, V nach Anlegen der Spannung. Es ist deutlich ein drastischer Abfall der Verlustleistung im Bereich der ersten 10 s zu erkennen, ungefähr nach 30 s beginnt die Verlustleistung sich zu stabilisieren.

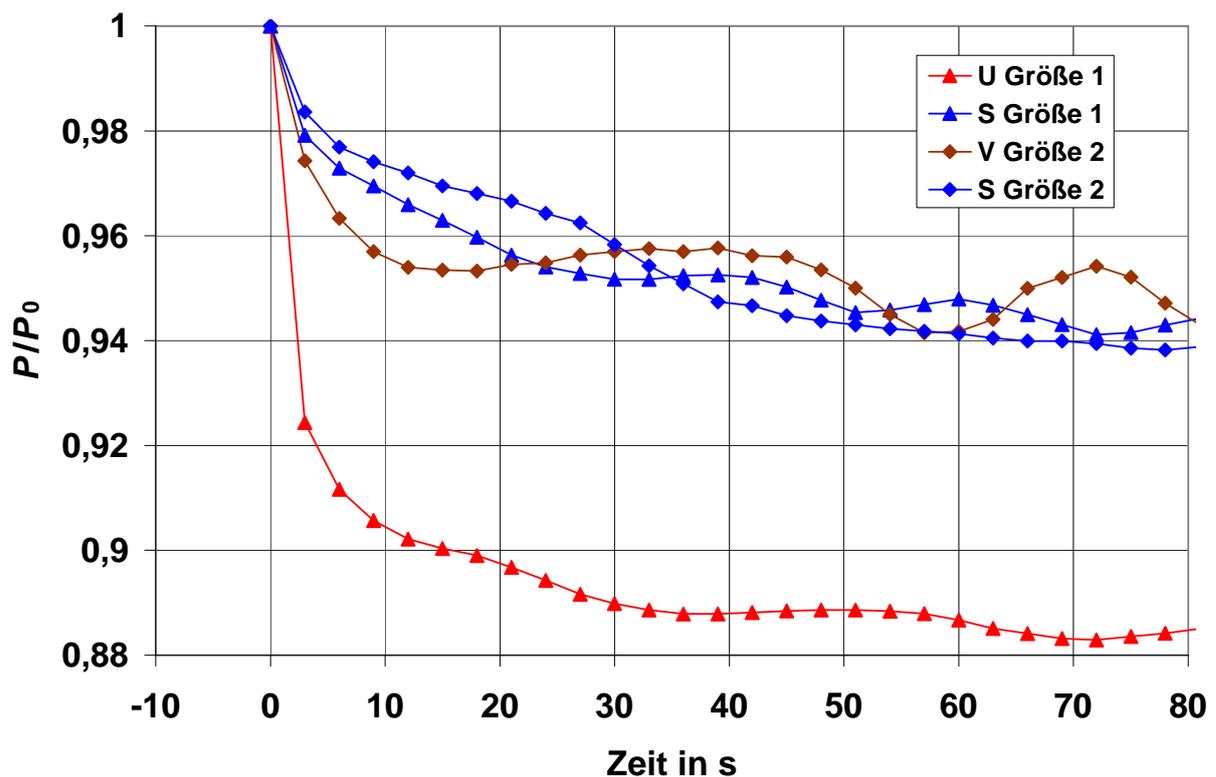


Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf der Verlustleistungen an MO-Widerständen der Hersteller S, U Größe 1 sowie S, V Größe 2

Aus diesem Grund wurde für die Messung der Verlustleistung bei diesem Projekt eine Zeitdauer nach Anlegen der Spannung bis zum Zeitpunkt der Messung von 60 s gewählt. Hierdurch kann das Messergebnis deutlich von dem zeitlichen Verhalten der Verlustleistung abgekoppelt und somit stabilere Messergebnisse erzielt werden.

Die Schwingung der Verlustleistung beim Widerstand des Herstellers V - Größe 2 (siehe Abbildung 6.5) zwischen 20 und 80 s erklärt sich aus einer Änderung der Spannung über dem

⁸ Die so definierte Spannung entspricht in etwa der Dauerspannung eines MO-Ableiters, die jedoch für einen einzelnen MO-Widerstand nicht definiert ist.

Widerstand, welche durch eine Schwankung der Spannung am Leistungsverstärker hervorgerufen wurde. Es handelt sich also nicht um einen physikalischen Effekt des ZnO-Materials.

Tabelle 8 zeigt hierzu noch einmal tabellarisch den prozentualen Abfall der Verlustleistung 60 s nach dem Anlegen der Spannung.

Tabelle 8: Abfall der Verlustleistung an MO-Widerständen verschiedener Hersteller und Größen 60 s nach Anlegen der Spannung

	Größe 1		Größe 2	
	Hersteller U	Hersteller S	Hersteller V	Hersteller S
Verlustleistungsabfall nach 60 s	- 11 %	- 5 %	- 6 %	- 6 %

Besonders dramatisch fällt dieser Abfall mit 11 % an dem Widerstand des Herstellers U - Größe 1 aus.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ist zu erkennen, dass die Messung der Verlustleistung 60 s nach Anlegen der Spannung einen guten Kompromiss zwischen zügiger Messung und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse darstellt. Diese Vorgehensweise wird generell für die Zukunft empfohlen, wenn die Änderung der Verlustleistung nach einer Prüfung zur Bewertung herangezogen werden soll. Auch wird eine Vorgabe zur genaueren Spezifizierung der Verlustleistungsmessung in den entsprechenden Normen empfohlen.

6.4 Untersuchungen zum Verlauf der Anpresskraft bei Hochstrombelastung 4/10 μ s

Die entwickelte Prüflingsaufnahme mit ihrem pneumatischen Zylinder erlaubt eine zügige Durchführung der Versuche. Es stellte sich allerdings die Frage, ob dieses pneumatische System „steif“ genug ist, um bei kurzen Impulsen, bei denen in kurzer Zeit viel Energie eingebracht wird, ein Abheben der Elektrode zu vermeiden. Durch das Einbringen der Energie während eines Hochstromimpulses der Form 4/10 μ s, beispielweise mit einer Stromhöhe von 100 kA, erfährt das Material eine große Temperaturänderung und damit verbunden eine schnelle Ausdehnung. Während eines solchen Normprüfimpulses liegt der Temperaturanstieg (ausgehend von 20 °C Starttemperatur) im Bereich von 110 K. **Abbildung 6.6** zeigt den an einem Mittelspannungs-MO-Widerstand ($\varnothing = 40$ mm, Höhe = 45 mm) gemessenen Energieeintrag in den Widerstand und den daraus berechneten Temperaturanstieg, zur Berechnung des Temperaturanstieges wurde Gleichung (3.3) gelöst. Für die Berechnung des Temperaturanstieges wird das Material dabei als homogen angenommen (siehe Kapitel 3.2). Die Starttem-

peratur des Widerstandes wurde dabei mit $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ angesetzt. Um die Frage zu klären, ob die Elektrode während eines solchen Impulses infolge der schlagartigen Ausdehnung abhebt, wurden verschiedene Messungen der Anpresskraft durchgeführt. Hierzu kam eine Piezoelektrische Kraftmessdose (Typ 904) und ein Ladungsverstärker (Typ 5011 B) der Firma Kistler zum Einsatz (siehe **Abbildung 6.7**). Die Kraftmessdose wurde in den Erdfad eingesetzt und zum Schutz gegen elektrische Beschädigungen mit dem Potential des Erdfades verbunden. Der Ladungsverstärker und das Oszilloskop wurden über eine Batterie gespeist und standen während des Versuchs in einer geschirmten Box, welche erdfrei aufgestellt und über einen Schirm mit dem Potential des Versuchserdfades verbunden war.

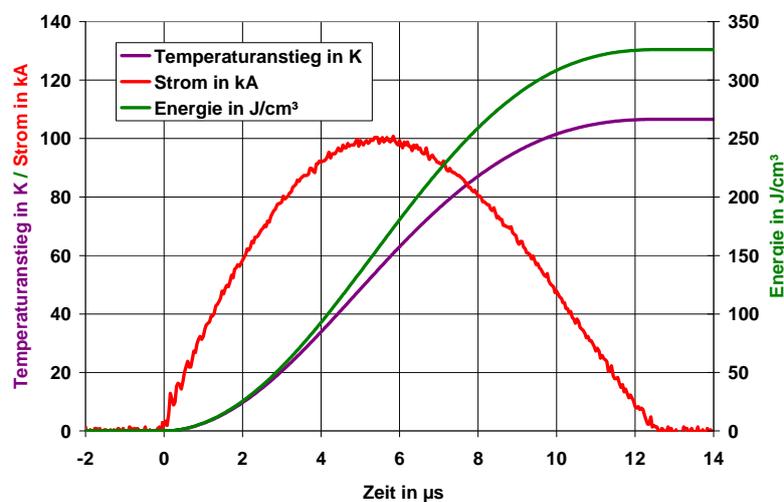


Abbildung 6.6: Simulation des Temperaturanstieges während eines $4/10\text{ }\mu\text{s} - 100\text{ kA}$ Hochstromimpulses bei einem Mittelspannungs-MO-Widerstand; Starttemperatur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Diese Konfiguration erlaubte es dem gesamten Versuchsaufbau, während des Stoßes das Potential des Versuchserdfades anzunehmen. Um den Verlauf der Kraft in Relation zum Stromverlauf setzen zu können, wurde der Strom mit einem Rogowski-Stromwandler vom Typ CWT-600 erfasst.



Abbildung 6.7: Links: MO-Widerstand mit Kraftmessdose im Erdfad; rechts: Oszilloskop mit Ladungsverstärker

Das Ergebnis solch einer Messung zeigt **Abbildung 6.8**; der Beginn des Kraftanstieges liegt bei etwa 5 μs , die Kraft erreicht ihr Maximum ca. nach 14,6 μs .

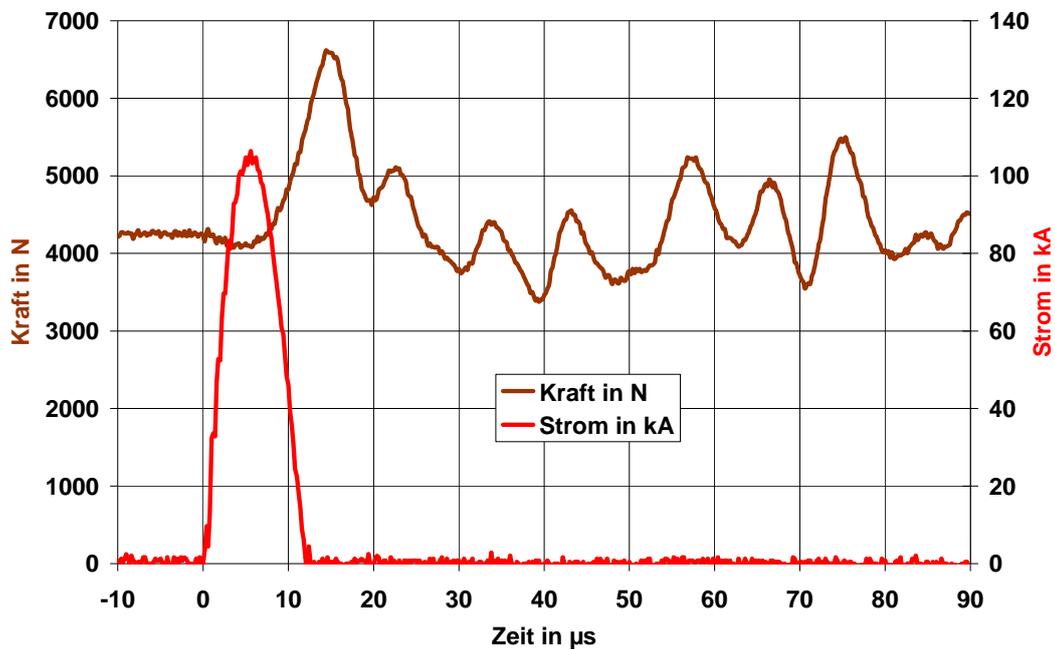


Abbildung 6.8: Verlauf der Kraft am unteren Rand eines Mittelspannungs-MO-Widerstandes (Höhe 37 mm, Durchmesser 42 mm) während eines Hochstoßstroms 4/10 μs / 100 kA

Aufgrund des Frequenzgangs des Ladungsverstärkers (siehe **Abbildung 6.9**), der im Bereich der gemessenen Schwingungsfrequenz von 100 kHz eine Resonanzüberhöhung zeigt, stellte sich jedoch die Frage, inwieweit die Messergebnisse verwertbar sind.

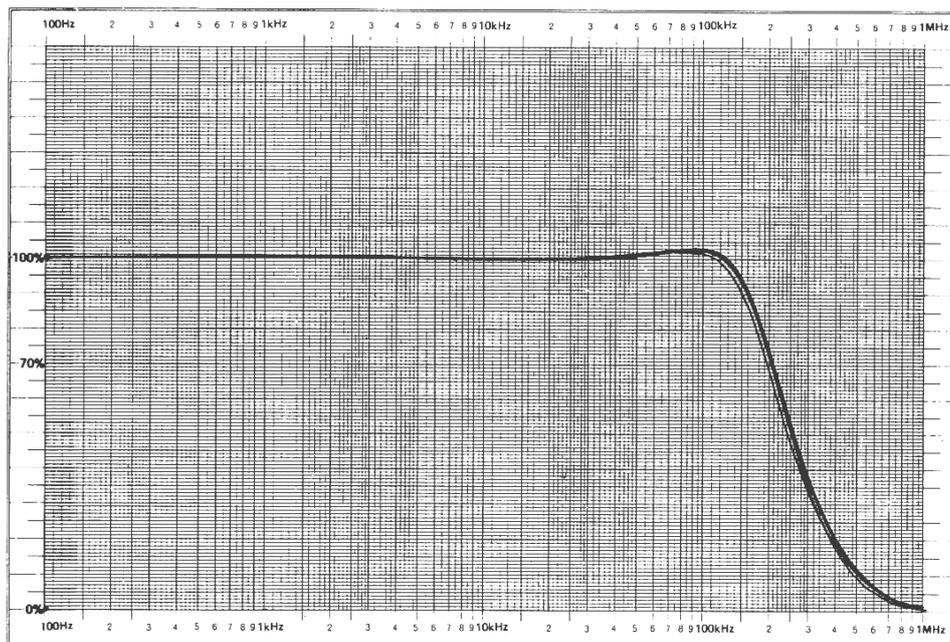


Abbildung 6.9: Frequenzgang des Ladungsverstärkers

Aus diesem Grund wurde eine Referenzmessung mit MO-Widerständen unterschiedlicher Höhe durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, die sich ergebenden Schwingungsfrequenzen miteinander zu vergleichen, um damit die korrekte Funktion des Messsystems nachzuweisen.

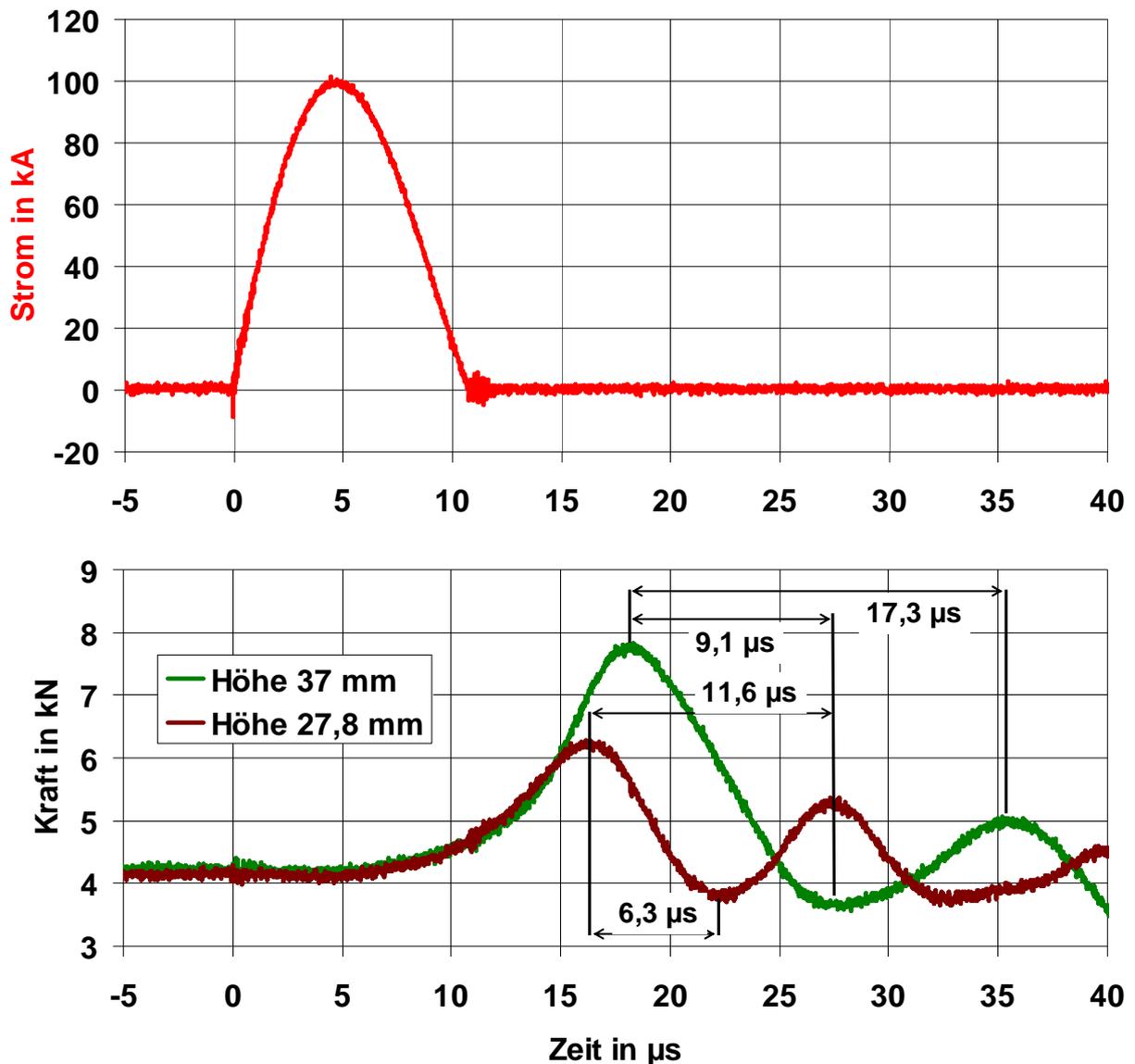


Abbildung 6.10: Verlauf der Kraft am unteren Rand zweier Mittelspannungs-MO-Widerstände unterschiedlicher Höhe (27,8; 37 mm) während eines Hochstoßstroms $4/10 \mu\text{s} / 100 \text{ kA}$

Abbildung 6.10 zeigt den Verlauf der Kraft am Sensor, welcher am unteren Rand des MO-Widerstandes montiert ist (siehe hierzu auch Abbildung 6.7). Deutlich zu erkennen ist die höhere Schwingfrequenz der Kraft am kürzeren Widerstand (Höhe 27,8 mm). Nach [Leng-99] beträgt der Elastizitätsmodul von ZnO-Keramik etwa $E = 100 \text{ GPa}$ und die Dichte etwa

$\rho = 5420 \text{ kg/m}^3$. Hieraus kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von mechanischen Wellen innerhalb des ZnO-Materials zu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{100 \text{ GPa}}{5420 \text{ kg/m}^3}} \approx 4300 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4,3 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \quad (6.1)$$

abgeschätzt werden. In **Tabelle 9** werden die aus dem Versuch gewonnenen Laufzeiten (siehe Abbildung 6.10) mit den berechneten Laufzeiten (siehe Gleichung (6.1)) verglichen. Hierbei ergibt sich teilweise eine sehr gute Übereinstimmung von Rechnung zu Messung.

Tabelle 9: Gemessene und berechnete Laufzeiten für die MO-Widerstände der Größe 2 aus Abbildung 6.10

Laufzeit	Widerstandshöhe 27,8 mm		Widerstandshöhe 37 mm	
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
τ	6,3 μs	6,5 μs	9,1 μs	8,6 μs
2τ	11,6 μs	12,9 μs	17,3 μs	17,2 μs

Für die Schockwelle durch einen MO-Widerstand der Höhe 45 mm (typisch für Mittelspannungs-MO-Widerstände – Größe 2) kann somit die Laufzeit rechnerisch mit 10,5 μs abgeschätzt werden. Dass die Kraft am Sensor erst etwa 7 μs nach Beginn des Impulses ansteigt, kann sich aus der Sprungantwort des mechanischen Systems erklären. Das Material kann der Änderung der Energie aufgrund seiner mechanischen Trägheit nicht im gleichen Maße folgen. Um dies weiter zu klären, wäre es nötig, die Sprungantwort des mechanischen Systems zu berechnen und zu simulieren. Da die Kraftänderung im Wesentlichen erst nach dem Ende des Impulses einsetzt, kann davon ausgegangen werden, dass die Elektrode während des Impulses nicht abhebt. Die Kraft, die infolge der Ausdehnung auf den Sensor ausgeübt wird, muss in ähnlicher Weise auf die obere Elektrode wirken. Da die Kraftänderung aber niemals die Höhe der Vorspannkraft erreicht, kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass der pneumatische Stempel nicht abhebt und damit kein „Hammereffekt“ am MO-Widerstand auftritt. Daher erscheint die Prüflingsaufnahme zur Verwendung mit Hochstoßstromprüfungen der Form 4/10 μs geeignet.

Die im Rahmen dieser Fragestellung erarbeiteten Ergebnisse stellen sicherlich keine abschließende Klärung der Frage nach der Ausbreitung von Schockwellen innerhalb von MO-Widerständen während und nach Impulsbelastung dar. Es zeigte sich aber die grundsätzliche Möglichkeit einer messtechnischen Erfassung solcher Vorgänge. Dies bietet einen Ansatzpunkt für weitere vertiefende Untersuchungen zur Klärung dieser Fragestellung. In der Literatur sind diese Effekte bisher kaum beschrieben worden. Die Frage nach der Ausbreitung von

Schockwellen ist insbesondere auch für die Hersteller von Überspannungsableitern interessant, da die Ausbreitung solcher Wellen und deren Reflektionen an Armaturen und sonstigen Übergangsstellen sowie die Wahl der Vorspannkraft einen Einfluss auf das Energieaufnahmevermögen haben können. Ein vielversprechender Ansatz zur Optimierung von Überspannungsableitern besteht darin, das Verhalten solcher Schockwellen durch Simulationen nachzubilden. Hierbei kann mit Messungen der oben beschriebenen Art zuverlässig die Richtigkeit der durchgeführten Simulationen verifiziert werden. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse und des großen Interesses von Seiten führender Überspannungsableiterhersteller empfiehlt sich daher eine Weiterarbeit (Simulation und Messung) auf diesem Gebiet.

In diesem Kapitel wurden die Bedingungen, die für die Durchführung einer Referenzspannungsmessung und einer Messung der Verlustleistung nötig sind, erörtert. Die Referenzspannungsmessung weist hierbei im Bereich der gängigen Raumtemperaturen eine relativ kleine Abhängigkeit von der Temperatur auf, wodurch auf eine Kompensation des Temperatureinflusses verzichtet werden kann. Hingegen sind die Einflüsse der Temperatur bei der Messung der Verlustleistung so stark, dass eine Temperaturkompensation nötig ist. Die Messung der Verlustleistung ist ferner kritisch, weil sie zeitabhängig ist. Nach dem Anlegen einer konstanten Spannung fällt die Verlustleistung im Sekundenbereich ab. Daher wird die Messung der Verlustleistung 60 s nach dem Anlegen der Spannung empfohlen, um eine bessere Vergleichbar- und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Da die Messung der Referenzspannung keine Zeitabhängigkeit aufweist und zudem eine deutlich kleinere Temperaturabhängigkeit offenbart, bietet sie sich für die Zustandsbewertung von MO-Widerständen an.

Die durchgeführten Kraftmessungen legen den Schluss nahe, dass der Einsatz der pneumatischen Prüflingsaufnahme auch für die Durchführung von Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ zulässig ist. Weiterhin zeigen die Messungen die grundsätzliche Realisierbarkeit von Kraftmessungen an MO-Widerständen während Impulsbelastungen. Damit bietet sich die Möglichkeit, dieses wichtige Thema näher zu untersuchen und mit Hilfe der Messergebnisse zugehörige Simulationen zu verifizieren.

7 Komplexes Fehlerkriterium und Datenauswertung

Dieses Kapitel befasst sich mit dem komplexen Fehlerkriterium, dem standardisierten Versuchsablauf und der Auswertung der Daten. Hierbei wird auch auf die unterschiedlichen Fehlerkriterien für Versuche mit Impulsstrombelastungen und Wechselstrombelastungen und die Gründe dafür eingegangen.

Im Weiteren werden dann anhand von realen Messreihen Beispiele für die statistische Auswertung der Versuche gegeben. Diese Darstellungen zeigen die praktische Anwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren MLM und PSM.

7.1 Fehlerkriterien und Versuchsablauf

7.1.1 Impulsstromversuche

Hinsichtlich der Entscheidung, ob ein MO-Widerstand nach der Energieprüfung als defekt oder intakt einzustufen ist, war es zu Beginn des Projektes die Idee, auf die Kriterien für eine bestandene Rechteckstoßstromprüfung (siehe Kapitel 3.1) zurückzugreifen. Daher wurden zunächst vier mögliche Fehlerkriterien für das Bestehen definiert:

- Änderung der Restspannung vor und nach der Prüfung von weniger als 5 %,
- kein mechanischer Bruch,
- kein Überschlag am Prüfling,
- kein punktueller Durchschlag am Prüfling.

Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft die möglichen mechanischen Fehlerarten (Bruch, Überschlag, Durchschlag).



Abbildung 7.1: Mechanische Ausfallmechanismen an MO-Widerständen (von links Bruch, Überschlag, Durchschlag)

Es zeigte sich jedoch sehr schnell, dass diese Kriterien zur Beurteilung des Zustandes eines geprüften MO-Widerstandes nicht ausreichend sind. Im Bereich des maximalen Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens treten Beschädigungen auf, welche nicht hinreichend durch

die Kriterien der mechanischen Beschädigung erfasst werden. So zeigt **Abbildung 7.2** die Bildung kleiner umlaufender Strommarken am Metallisierungsrand eines MO-Widerstands nach einer Belastung mit Rechteckstoßstrom. Die Entstehung, Größe und Anzahl dieser im Weiteren Verlauf “multi-puncture“ genannten Strommarken variieren mit der Stromhöhe.

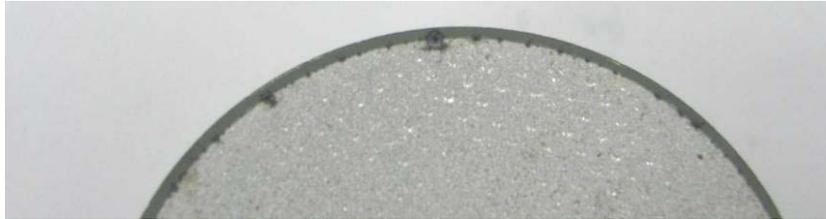


Abbildung 7.2: “Multi-puncture“ am Rand der Metallisierung eines MO-Widerstandes nach Belastung mit einem Rechteckstoßstrom 2 ms (Stromhöhe ca. 3 kA)

Dieser und andere Effekte wurden während der Versuchsreihen beobachtet und hätten als mechanische Beschädigung im Sinne der Norm [IEC 60099-4] gewertet werden können. Zusatzuntersuchungen brachten aber das erstaunliche Ergebnis, dass auch MO-Widerstände mit solchen Auffälligkeiten in der Lage waren, die Rechteckstoßstromprüfung, wie sie in der Norm [IEC 60099-4] vorgesehen ist, zu bestehen. Je nach Grad der Schädigung waren die auf ihr Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen geprüften MO-Widerstände imstande, zwischen Null und 18 dieser Rechteckstoßströme zu bestehen. Dies ist Zeugnis für die Unzulänglichkeit einer rein visuellen Inspektion der geprüften MO-Widerstände. Diese kann keine hinreichende Aussage darüber treffen, ob ein Widerstand als defekt oder intakt zu werten ist. Daher wurde es erforderlich, die Beurteilung über den Zustand eines geprüften MO-Widerstandes zu verfeinern. Im Rahmen dieser Arbeit und in enger Zusammenarbeit mit der Cigré-Arbeitsgruppe A3.17 wurden zwei Änderungen eingeführt. Die eine betrifft die Einführung einer Referenzspannungsmessung vor und nach der Impulsstromprüfung. Hierbei wird die Referenzspannung vor und nach der Impulsstromprüfung jeweils bei Umgebungstemperatur gemessen und deren Änderung bewertet (siehe **Abbildung 7.3**). Die zweite Änderung im Hinblick auf die Beurteilung des Zustands eines auf sein Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen geprüften MO-Widerstandes wurde durch die Einführung einer zweiten Blitzstoßstromprüfung während der Ausgangsmessung geschaffen. Direkt nach der Restspannungsmessung mit Nennableitstrom ($8/20 \mu\text{s}$, 10 kA) wird eine zweite verschärfte Blitzstoßstrommessung (ebenfalls $8/20 \mu\text{s}$) bei einer Stromdichte von $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ durchgeführt. Ziel dieser Prüfung ist es, mechanisch stark vorgeschädigte MO-Widerstände auszusondern. Insbesondere MO-Widerstände mit “multi-puncture“-Erscheinungen im Randbereich der Metallisierung können hiermit besser bewertet werden. Die Zustandsbewertung mittels dieses erhöhten Blitzstoß-

stroms hat sich in der Praxis gut bewährt und ermöglicht zudem eine zügige Durchführung der Ausgangsmessung, was in Hinblick auf die Vielzahl von durchgeführten Prüfungen ein positiver Effekt ist. Der erhöhte Blitzstoßstrom mit einer Stromdichte von $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ führt bei Mittelspannungs-MO-Widerständen (Größe 2) mit einem Durchmesser von ca. 40 mm auf eine Stromhöhe von ca. 20 kA und bei Hochspannungs-MO-Widerständen (Größe 1) mit einem Durchmesser von ca. 60 mm auf ca. 40 kA. Abbildung 7.3 zeigt das Ablaufdiagramm einer solchen Prüfung mit Impulsstrom und die dazugehörige Fehlerkriterien.

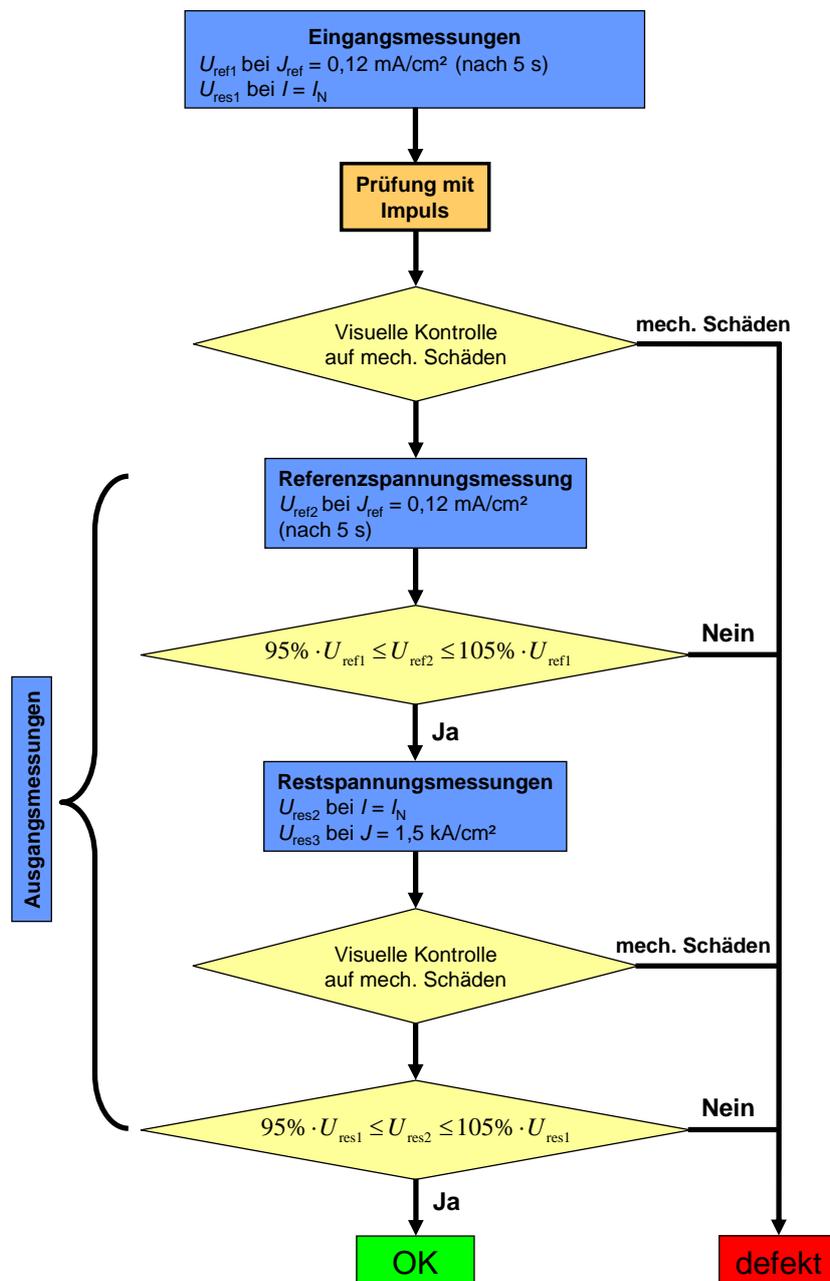


Abbildung 7.3: Ablaufdiagramm einer Impulsstromprüfung mit Ein- und Ausgangsmessungen

Um die Abläufe bei der Eingangs- und Ausgangsmessung gleich zu halten, wurde die Referenzspannung 5 s nach Anlegen der Spannung automatisch gemessen (siehe auch Kapitel 5.4). Bei der Bewertung der Referenzspannungsmessung wird eine maximale Änderung von 5 % zugelassen (siehe Abbildung 7.3). Die Wahl dieser 5%-Grenze wurde nach sehr intensiver Diskussion in der Cigré-Arbeitsgruppe getroffen. Nach mehrheitlicher Meinung der beteiligten Spezialisten kann bei einer Änderung von mehr als 5 % vom Vorliegen einer dauerhaften Veränderung im ZnO-Material ausgegangen werden, welche eine Wertung als defekt rechtfertigt. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass ein Ableiter mit einer Referenzspannungsänderung von mehr als 5 % durchaus in der Lage sein kann, eine Arbeitsprüfung nach [IEC 60099-4] zu bestehen (siehe auch Kapitel 3.1), da das Bestehen der Arbeitsprüfung ganz wesentlich vom jeweiligen Gehäusedesign und der Wahl der Bemessungs- und Dauerspannung abhängt. Die Wahl der Bemessungs- und Dauerspannung obliegt dem Hersteller und wird so getroffen, dass eine Arbeitsprüfung bestanden werden kann. Im Zuge der Arbeitsprüfung erfolgt aber in jedem Fall eine Beanspruchung mit zwei Hochstoßstromimpulsen, die zu Referenzspannungsänderung in der Größenordnung von 5 % oder sogar mehr führen. Das heißt, die Änderung der Referenzspannung ist bei der Dimensionierung eines Ableiters bereits einkalkuliert. Das ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass eine Referenzspannungsänderung auf eine Materialänderung zurückzuführen ist. Ferner hat sich im Laufe der Untersuchungen gezeigt, dass das Ausmaß der Änderung von Hersteller zu Hersteller extrem unterschiedlich ist (siehe Kapitel 8.3).

In Abbildung 7.3 ist auch das komplexe Fehlerkriterium dargestellt. Dieses gliedert sich in drei Kriterien für das Bestehen:

- Änderung der Referenzspannung kleiner als 5 %,
- keine mechanische Zerstörung (Bruch, Durchschlag, Überschlag) während der Blitzstoßstrommessungen mit $I = 10 \text{ kA}$ und $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$,
- Änderung der Restspannung kleiner als 5 %.

7.1.2 Wechselstromversuche

Im Vergleich zu den Impulsstromversuchen wurde das komplexe Fehlerkriterium (siehe Kapitel 7.1.1) bei den Wechselstrombelastungen nicht angewendet. Alle Wechselstromversuche wurden bis zur vollständigen Zerstörung des MO-Widerstandes durchgeführt, daher entfällt hier eine Ausgangsmessung. Als Fehlerarten kommen nur Bruch, Durchschlag oder Überschlag in Betracht. Eine Überlegung für die Anwendung von Wechselstromversuchen ist deren besondere Eignung zur Bestimmung des Energieaufnahmevermögens. Mit Hilfe einer

solchen Versuchstechnik ist es besonders einfach möglich, die Grenzenergie eines MO-Widerstandes zu bestimmen. Man lässt die Belastung bis zur Zerstörung anliegen und ermittelt dann aus Strom- und Spannungsverlauf die eingebrachte Energie. Dies ist bei Impulsstromversuchen nicht oder nur eingeschränkt möglich. Nimmt man zum Beispiel einen Langwellengenerator mit einer Entladungszeit von 2 ms, so lässt sich ein solcher Versuch nicht immer bis zur Zerstörung des Prüflings durchführen. Dies wäre lediglich dann der Fall, wenn man den Langwellengenerator so stark auflädt, dass immer eine Zerstörung des Prüflings auftritt. Dies führt aber dazu, dass der Prüfling eventuell schon nach 1 ms ausfällt und ist immer mit vergleichsweise hohen Stromamplituden verknüpft. Da möglicherweise die Stromamplitude einen Einfluss auf das Energieaufnahmevermögen hat, zum Beispiel infolge erhöhter dielektrischer Belastung durch den Prüfstrom, ist dies kein gangbarer Weg. Eine Alternative hierzu stellte ein Langwellengenerator dar, der eine erheblich längere Zeitdauer (z.B. 20 ms) aufweist und damit zerstörende Prüfungen mit unterschiedlichen Stromhöhen möglich macht. Ein solcher Langwellengenerator müsste aber über sehr viele Kondensatoren und Spulen verfügen, um dies zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Kosten gibt es weltweit nur sehr wenige Langwellengeneratoren dieser Art. Da in dieser Arbeit Normprüfimpulse verwendet werden sollten (siehe Kapitel 2) ist dieser Ansatz ebenso wenig zielführend. In fast allen Prüflaboren weltweit für MO-Widerstände finden sich nur Langwellengeneratoren mit wesentlichen kürzeren Entladezeiten (max. 4 ms), da nur diese für Prüfungen nach [IEC 60099-4] vorgesehen sind. Daher bietet sich die Wechselstrombelastung besonders für eine solche Untersuchung des Grenzenergieaufnahmevermögens an. Man könnte mit solch einer Prüftechnik auch die Normprüfungen zum Energieaufnahmevermögen erheblich vereinfachen. Ein weiterer Grund für die Außerachtlassung des komplexen Fehlerkriteriums während der Wechselstromversuche liegt in der praktischen Bedeutung dieser Belastungsform, bei Serienkompensationsanlagen für Freileitungen (siehe auch Kapitel 3). In Serienkompensationsanlagen treten solche Wechselstrombelastungen auf. Darüber hinaus liegt nach der Belastung keine Spannung mehr an den Ableitern an. Folglich muss hierbei nicht die thermische Stabilität berücksichtigt werden, wodurch diese MO-Widerstände höher belastet werden können. Da noch keine Untersuchungen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums bekannt sind, war es auch wünschenswert, einen Teil der Versuche mit dem alten Fehlerkriterium des Totalausfalls durchzuführen, um diese dann mit früheren Veröffentlichungen vergleichen zu können. So wurde es möglich, die Ergebnisse von [Ring-97] direkt mit dieser Untersuchung zu vergleichen und daraus Rückschlüsse über die Entwicklung der MO-Widerstände zu ziehen. Eine Durchführung der Versuche bis zum Totalausfall ermöglichte auch die Erprobung der unter-

schiedlichen statistischen Verfahren MLM (Impulsversuche) und PSM (Wechselstromversuche) (siehe auch Kapitel 4). Aufgrund des Versuchsaufbaus, bei dem nach dem Spannungszusammenbruch für 20...40 ms ein Kurzschlussstrom fließt (siehe Kapitel 5.3), lässt sich nach dem Versuch nicht zwischen Durchschlag und Bruch differenzieren, da durch den Kurzschlussstrom aus jedem Durchschlag ein Bruch entsteht. Die Simulationen von [Bart-96] legen nahe, dass bei solchen Wechselstromversuchen aber abhängig von der Stromhöhe sowohl Durchschlag als auch Bruch in unterschiedlicher Wichtung auftreten.

7.2 Datenauswertung

7.2.1 Impulsstromversuche

Für die Messungen mit Impulsströmen wurden zunächst die erhobenen Daten dahingehend aufbereitet, dass die verschiedenen Ausfallkriterien abgeprüft wurden (mechanischer Schaden während der Prüfung, Änderung von Rest- und Referenzspannung und mechanischer Schaden während der Ausgangsmessungen), um damit die Prüflinge als defekt oder intakt klassifizieren zu können. Als nächstes wurde die zur jeweiligen Ladespannung U_{lade} des Prüfkreises gehörende prospektive Energie E ermittelt. Dies geschah, indem alle Impulsstrombeanspruchungen nach Ladespannungen U_{lade} sortiert wurden (siehe Spalte 2 in **Tabelle 10**) und aus allen volumenspezifischen Energien E , die nicht zur mechanischen Zerstörung geführt hatten (Spalte 3), der Mittelwert gebildet wurde. Hieraus ergibt sich dann die Klassenenergie E_{Klasse} (siehe Spalte 6) einer solchen Ladespannungsklasse. Zuletzt wurde noch ermittelt, wie viele Ausfälle innerhalb einer solchen Klasse auftraten (siehe letzte Spalte). Hierzu wurden alle Fehlerkriterien berücksichtigt. Idealerweise hätten alle Versuche mit jeweils 40 Stück in vier Gruppen zu je 10 MO-Widerständen geprüft werden sollen. Jeweils 10 Stück wären dann einer bestimmten Beanspruchung (Stromhöhe) unterworfen worden, danach 10 weitere mit einer anderen Stromhöhe usw. Hätte die erste Gruppe eine Ausfallwahrscheinlichkeit von z.B. 10 % ergeben, so würde die Beanspruchung für die zweite Gruppe gesteigert um z.B. eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 30 % zu erhalten. Durch die gleich großen Klassen wäre damit die Auswertung vereinfacht worden. Das statistisch variierende Verhalten der Prüflinge machte es allerdings erforderlich, teilweise die Gesamtanzahl von Prüflingen in einer Prüfreihe über 40 Stück hinaus zu erhöhen und auch Variationen in der Anzahl der Prüflinge innerhalb einer Beanspruchungsklasse zuzulassen. Durch die Anwendung der MLM (siehe auch Kapitel 4.4) war es jedoch möglich, den Einfluss unterschiedlicher Klassengrößen zu berücksichtigen.

Tabelle 10: Beispiel für zusammengefasste Versuchsdaten (hier: aus Versuch mit Hersteller V - Größe 2, Impulsform 90/200 μ s)

Nr.	U_{lade} in kV	E in J/cm ³	Status nach Impulsstrom- prüfung (visuelle Kon- trolle)	Endgültiger Status	E_{Klasse} in J/cm ³	Anzahl Prüflinge in Klasse	Ausfälle in Klasse
16	22	1126,5	✓	☒	1124,3	5	4
17		1134,3	✓	☒			
18		1129,7	✓	☒			
19		1119,5	✓	✓			
20		1115,7	✓	☒			
31	21,7	1098,0	✓	☒	1090,5	10	8
32			☒	☒			
33			☒	☒			
34		1098,3	✓	☒			
35		1096,1	✓	☒			
36		1082,9	✓	☒			
37		1087,0	✓	☒			
38		1085,9	✓	☒			
39		1091,0	✓	✓			
40		1099,6	✓	✓			
21	21,5	1062,8	✓	☒	1068,1	10	7
22		1070,0	✓	☒			
23			☒	☒			
24		1069,0	✓	✓			
25		1060,6	✓	✓			
26		1069,0	✓	☒			
27		1059,0	✓	✓			
28		1061,2	✓	☒			
29		1062,8	✓	☒			
30		1064,4	✓	☒			
11	21	1017,1	✓	✓	1012,45	5	1
12		1013,0	✓	✓			
13		1022,4	✓	✓			
14		1017,6	✓	☒			
15		1010,3	✓	✓			
1	20	912,7	✓	✓	902,7	10	1
2		900,9	✓	✓			
3		893,9	✓	✓			
4		896,1	✓	✓			
5		903,6	✓	✓			
6		912,7	✓	✓			
7		903,9	✓	✓			
8			☒	☒			
9		900,9	✓	✓			
10		897,4	✓	✓			

Abbildung 7.4 zeigt noch einmal graphisch den Zusammenhang zwischen Ladespannung des Generators und der dazugehörigen Impulsenergie.

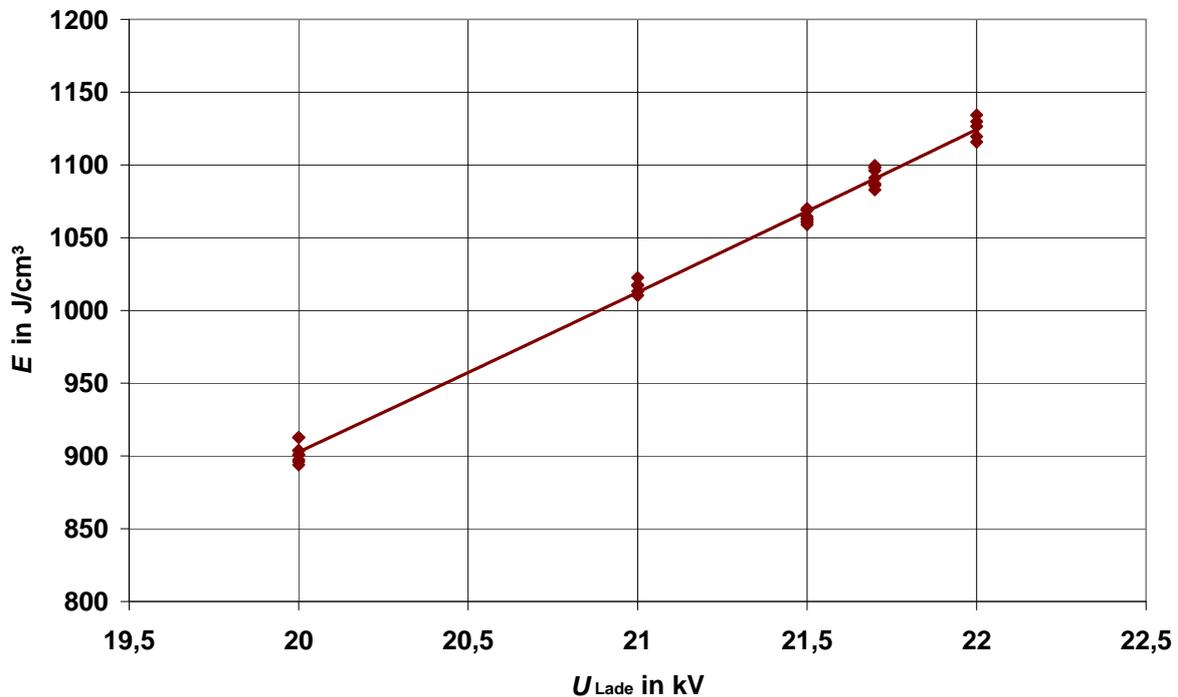


Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Ladespannung und eingebrachter Impulsenergie (Hersteller V – Größe 2, Impulsform 90/200 μs)

Die Auswertung nach Ladespannungsklassen erfolgte, weil durch die Einführung des 5%-Fehlerkriteriums bezüglich der Referenzspannungsänderung nach einem Versuch nur die Entscheidung „defekt“ oder „intakt“ möglich war, nicht aber eine Zuordnung, ab welcher Energie diese auftrat. **Abbildung 7.5** soll dies bildlich darstellen. Im oberen Teil des Bildes sieht man den Stromverlauf während einer Prüfung mit Rechteckstoßstrom und den daraus resultierenden Energieeintrag in den MO-Widerstand. Es handelt sich hierbei um die Daten eines realen Versuchs. Der untere Teil des Bildes zeigt eine hypothetische Änderung der Referenzspannung mit der Beanspruchungszeit. So sieht man, dass die 5%-Änderung der Referenzspannung schon nach ca. 0,59 ms aufgetreten wäre und hierzu eine Energie von ca. 40 kJ gehören würde. Da sich aber die Änderung der Referenzspannung nur nach dem Versuch an einem abgekühlten MO-Widerstand ermitteln lässt, stehen nur die tatsächlich eingebrachte Energie und die tatsächliche Änderung der Referenzspannung als Daten zur Verfügung. Es sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die hypothetische Referenzspannungsänderung vom unteren Teil des Bildes nur einen möglichen, angenommenen Verlauf darstellt, der lediglich der Verdeutlichung der Problematik dient.

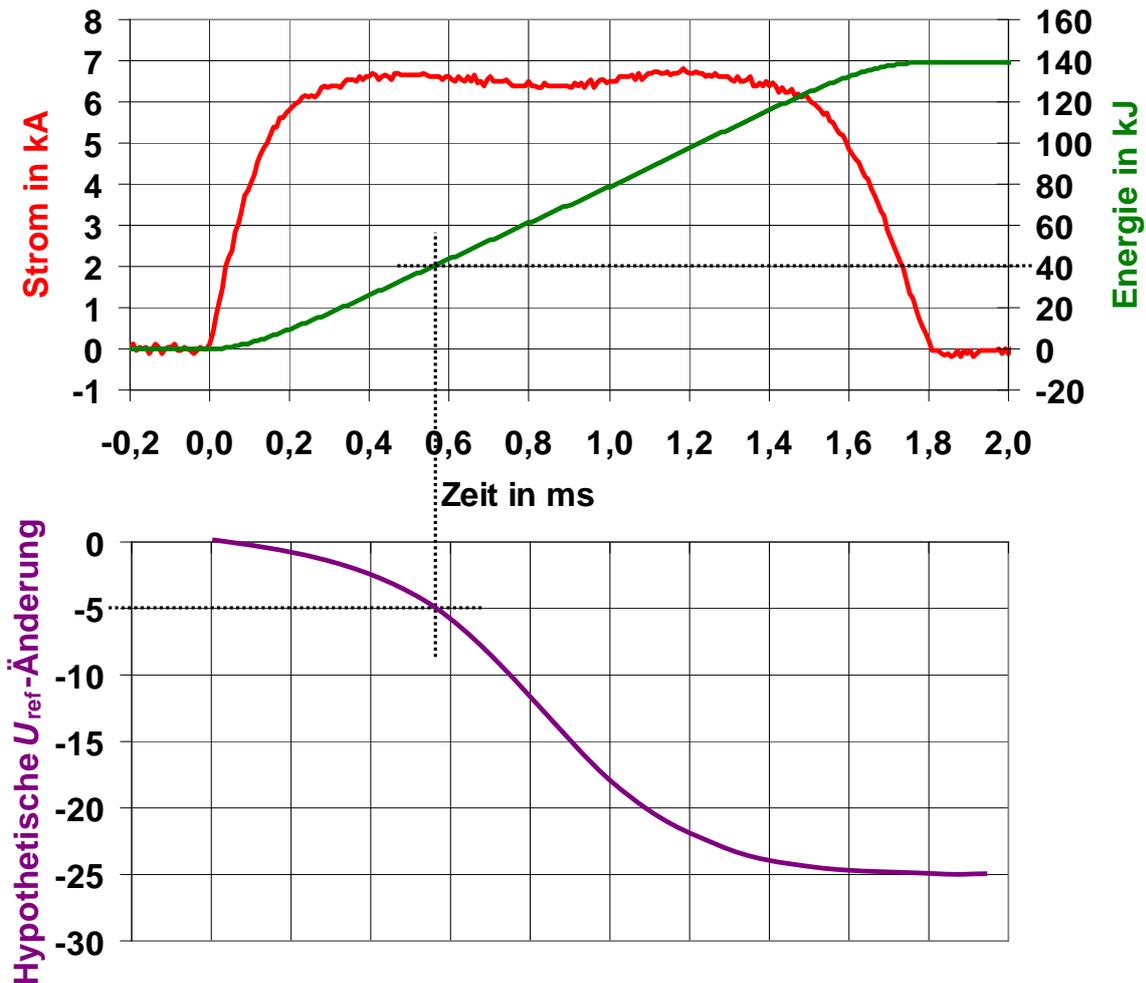


Abbildung 7.5: Oben: realer Verlauf des Stromes und der eingebrachten Energie während eines Rechteckstoßes, unten: hypothetische Änderung der Referenzspannung während des Stoßes Annahme; (nicht gemessen)

Nach dieser Vorbereitung wurden die so gewonnenen Daten in das Statistikprogramm MLM 6.1 der Firma Highvolt eingegeben und ausgewertet⁹. Dieses Statistikprogramm wurde von der Firma Highvolt speziell entwickelt, um Versuchsreihen, wie sie im Bereich der Hochspannungstechnik auftreten, auszuwerten. Die Auswertung kann für verschiedene Typen von Verteilungen vorgenommen werden und setzt dabei auf die in Kapitel 4 beschriebenen Ansätze:

- Normalverteilung,
- logarithmische Normalverteilung,
- Doppelsexponentialverteilung,
- Weibullverteilung 2-parametrig,
- Weibullverteilung 3-parametrig.

⁹ Mein Dank gilt Hr. Dr. Speck von der Technischen Universität Dresden für seine Unterstützung.

Abbildung 7.6 zeigt die Auswertung der Impulsstromversuchsreihe, mit Impulsströmen der Form 90/200 μs an MO-Widerständen des Hersteller X - Größe 1, als Normalverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz. Die blauen Punkte stellen dabei die durch die Voraufbereitung entstandenen Daten dar. Des Weiteren ist an den blauen Punkten durch vertikale braune Linien ihre Standardabweichung abgebildet. Die rote Kurve zeigt die durch Maximum-Likelihood-Schätzung entstandene Schätzung dieses Versuchs als Normalverteilung (in diesem Fall: $\mu = 1685,4$ und $\sigma = 68,8$). Die blauen Kurven zeigen den 95%-Vertrauensbereich der Verteilung, die lilafarbenen Kurven zeigen den 95%-Vertrauensbereich der Quantile. Dass die Vertrauensbereiche im Bereich um 50 % am engsten liegen, ist damit zu erklären, dass die Versuche darauf ausgelegt waren, die 50%-Ausfallenergie zu ermitteln.

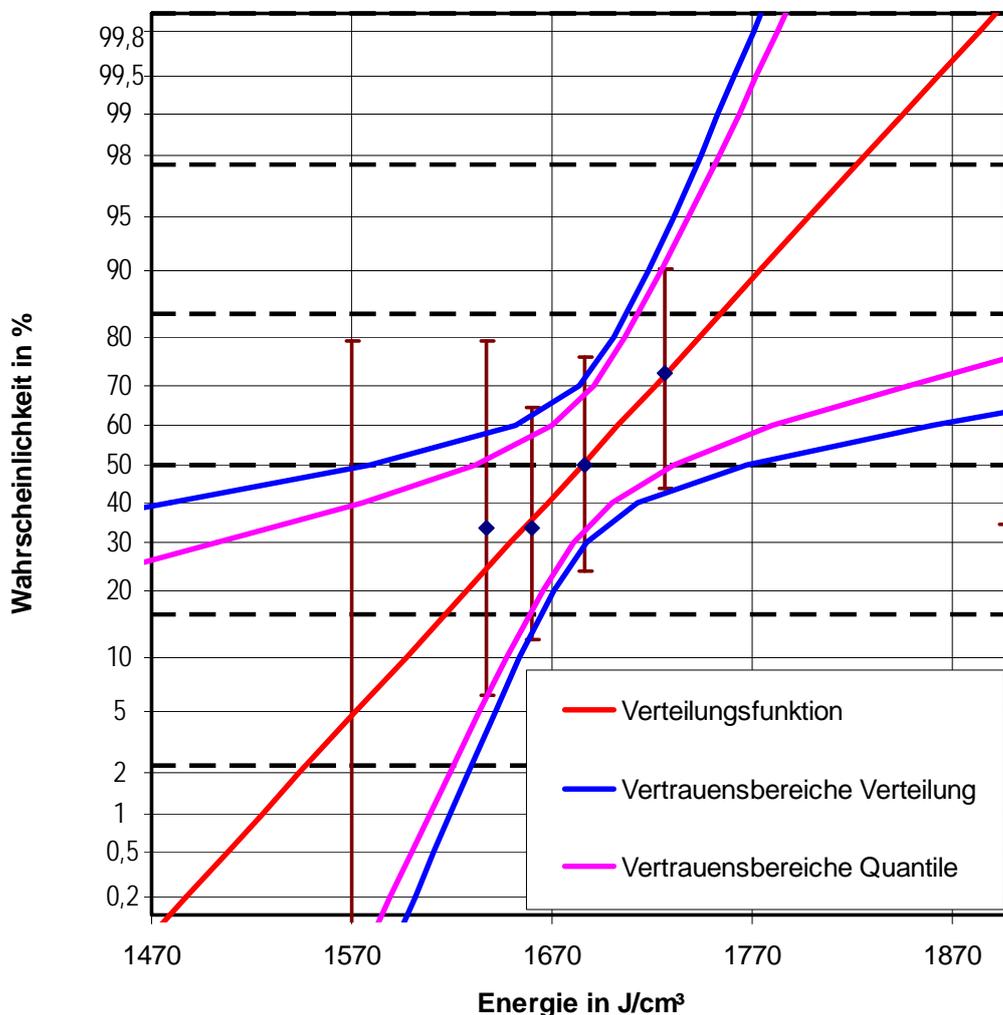


Abbildung 7.6: Statistische Auswertung der Impulsstromversuchsreihe 90/200 μs an MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 als Normalverteilung, mittels Highvolt Software MLM 6.1

Beim Vergleich verschiedener Verteilungsfunktionen zeigt sich, dass keine der Verteilungsfunktionen alle Ergebnisse abdeckt und dass die Unterschiede im Bereich der gesuchten 50-

%-Ausfallsenergie gering sind. Über diese Ergebnis wurde auch schon in [Ring-97] berichtet. Daher wurden alle Versuche unter der Annahme einer Normalverteilung ausgewertet. **Abbildung 7.7** zeigt den gleichen Versuch wie Abbildung 7.6 allerdings als Doppelpotentialverteilung ausgewertet.

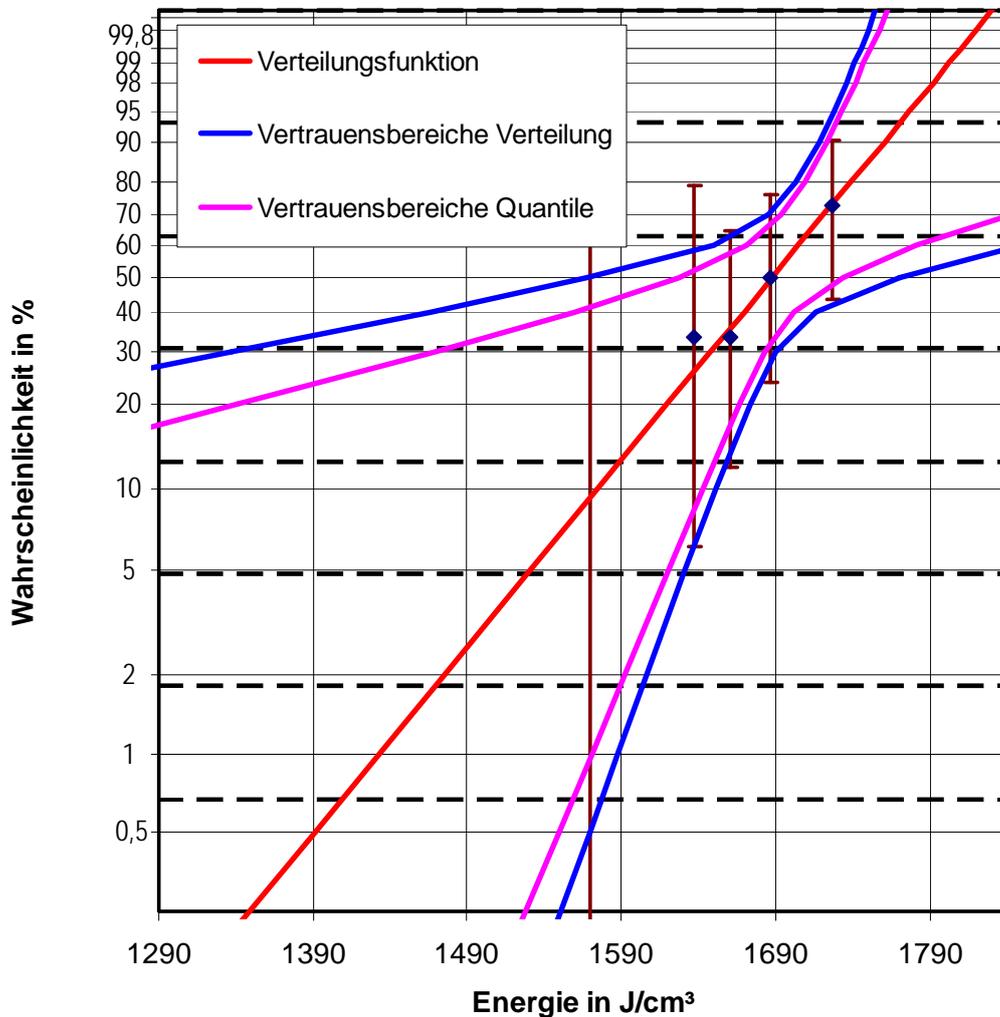


Abbildung 7.7: Statistische Auswertung der Impulsstromversuchsreihe 90/200 μs , an MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 als Doppelpotentialverteilung, mittels Highvolt Software MLM 6.1

7.2.2 Wechselstromversuche

Die durchgeführten Wechselstromversuche unterscheiden sich von der Auswertung der Impulsstromversuche in zweierlei Hinsicht. Der wesentlichste Unterschied liegt in dem angewendeten Fehlerkriterium. Bei jedem Wechselstromversuch wurde die Prüfung bis zum mechanischen Ausfall des Prüflings durchgeführt, die Fehlerkriterien der Impulsstromversuche fanden hierbei keine Anwendung (siehe auch Kapitel 7.1.2). Hieraus ergibt sich auch der zweite Unterschied in den Versuchen: die Möglichkeit, jedem einzelnen Versuch eine Ausfallenergie und damit auch eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Die Auswertung der Ver-

suchsdaten erfolgte mit der Statistiksoftware PSM 6.1 der Firma Highvolt. Das Programm verwendet dabei die in Kapitel 4 beschriebenen Ansätze.

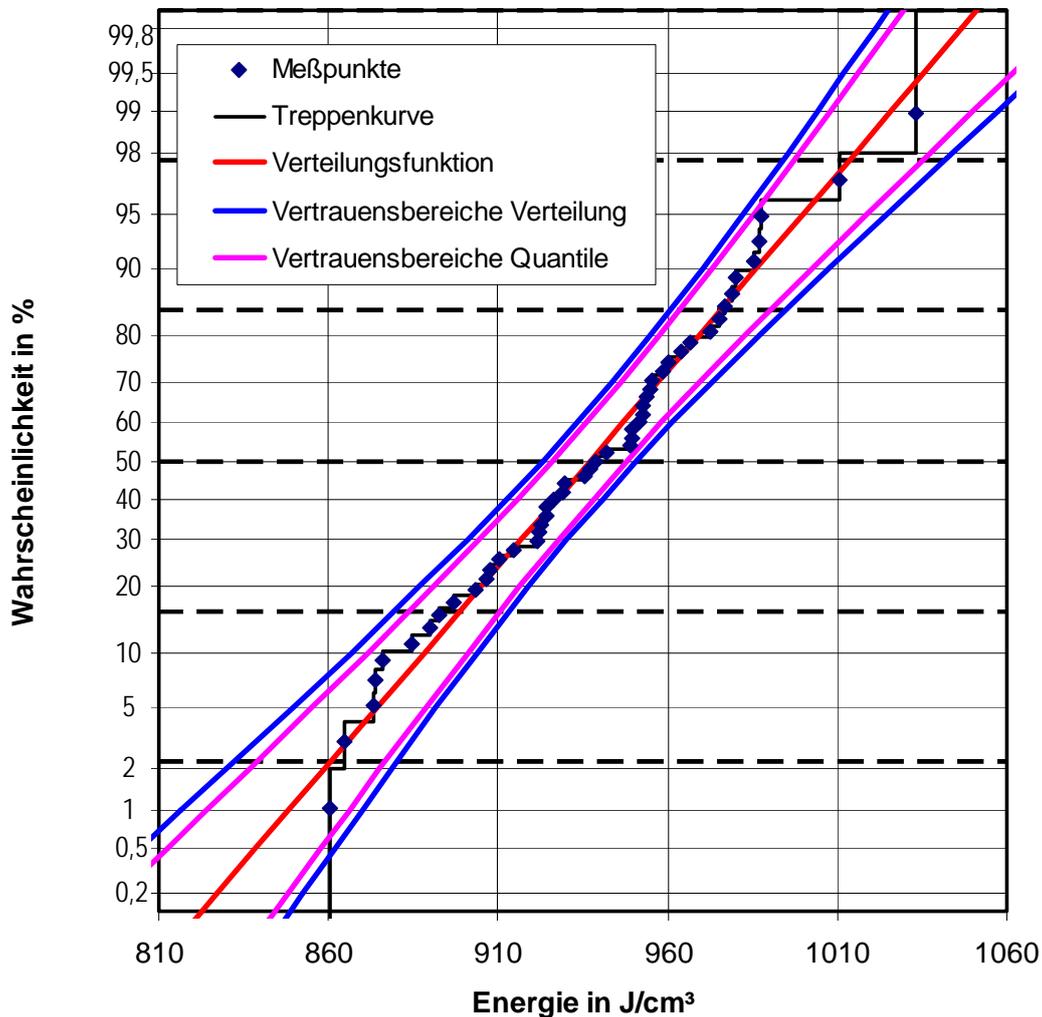


Abbildung 7.8: Statistische Auswertung des Wechselstromversuchs (100 A) als Normalverteilung für den Hersteller U – Größe 1, mittels Highvolt Software PSM 6.1

Abbildung 7.8 zeigt die Auswertung eines Wechselstromversuchs mit einer Stromhöhe von ca. 100 A (siehe auch Abbildung 5.15) für Hersteller U – Größe 1 als Normalverteilung. Die blauen Punkte stellen dabei die Messpunkte und ihre jeweilige Wahrscheinlichkeit dar. Die blauen Kurven sind der Vertrauensbereich (95 %) der Verteilung und die lila Kurven sind der Vertrauensbereich (95 %) der Quantile. Es zeigt sich, dass die Vertrauensbereiche der Verteilung und der Quantile im Verhältnis zu den Auswertungen der Impulsstromversuche deutlich enger sind. Dies liegt an der deutlich höheren Anzahl von Messpunkten, die sich aus den Wechselstromversuchen ergeben.

In diesem Kapitel wurden die Versuchsabläufe und die unterschiedlichen Fehlerkriterien erläutert. Das komplexe Fehlerkriterium für Impulsstromversuche wurde detailliert beschrieben

und eine Begründung gegeben, warum es nicht ebenfalls bei den Wechselstromversuchen eingesetzt wurde (Einfachheit des Verfahrens, Möglichkeit für eine vereinfachte Normprüfung, Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen, Erprobung der statistischen Verfahren MLM und PSM). Im Vergleich der statistischen Verfahren MLM und PSM zeigt sich ein Nachteil in der Auswertung der Daten der Impulsstromversuche. Die Versuchsreihen in Bezug auf Impuls- sowie auf Wechselstromversuche haben hinsichtlich der Anzahl der geprüften MO-Widerstände einen ähnlichen Umfang (ca. 40 -50 Stück). Trotzdem unterscheiden sich ihre Auswertungsgraphen deutlich. Da bei den Wechselstromversuchen jeder Prüfung eine Ausfallenergie zugeordnet werden kann, ergeben sich wesentlich mehr Punkte in dem Auswertungsgraphen, als bei den Impulsstromversuchen, in denen nach Klassen ausgewertet wird und dadurch durchschnittlich nur 4 bis 5 Punkte in die Auswertung kommen. Die 50%-Ausfallenergie kann in beiden Fällen gut bestimmt werden, wodurch der angestrebte Materialvergleich ohne Einschränkung möglich ist. Versucht man jedoch, die Energiewerte, die zu niedrigeren Ausfallenergien, z.B. 10 %, führen, zu ermitteln, so ist dies nur bei Wechselstromversuchen und auch dort nur eingeschränkt möglich. Eine grobe Abschätzung des Energieaufnahmevermögens für noch niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten, z.B. 0,01 %, ist nur für die Auswertung der Wechselstromversuche überhaupt, allerdings verbunden mit breiten Schwankungen und Unsicherheiten, möglich. Die Auswertungen zeigen aber auch die Unmöglichkeit, mit Versuchsreihen, die einen Umfang von ca. 40 bis 50 Stück haben, Rückschlüsse auf die gesamte Verteilungsfunktion des Energieaufnahmevermögens eines MO-Widerstandstyps zu ziehen. So können mit keinem Verfahren genaue Aussagen über eine kleine Ausfallwahrscheinlichkeit von z.B. 0,01 %, wie sie bei der Auslegung von Überspannungsableitern interessant sind, gemacht werden. Hierzu wären Versuchsreihen nötig, die in diesem Bereich der Ausfallenergien Daten liefern. Um die Ausfallenergie zu ermitteln, die zu einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,01 % gehört, wäre es allerdings nötig, dass Versuche mit einer konstanten Belastungshöhe und einem Umfang von ca. 10000 Stück ($10000 \text{ Stück} \cdot 0,01 \% = 1 \text{ Ausfall}$) durchgeführt würden. Dies ist sowohl vom zeitlichen- als auch vom Kostenaufwand her unrealistisch.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass gegenüber früheren Untersuchungen, bei denen lediglich mechanische Schädigungen bis zum Totalausfall der MO-Widerstände untersucht wurden, in dieser Arbeit das erste Mal überhaupt der Versuch unternommen wird, eine differenziertere Betrachtungsweise für die Impulsstromprüfungen (siehe Kapitel 7.1.1) anzuwenden. Nach intensiven Voruntersuchungen wurden hierzu drei wesentliche Änderungen bei der Prüfung mit Impulsströmen neu eingeführt:

- Die Prüfungen werden nicht mehr alle bis zum Totalausfall durchgeführt, sondern es werden Energien in die MO-Widerstände injiziert, die mit verschiedenen Ausfallraten korrespondieren.
- Die Referenzspannung wird vor und nach den Versuchen gemessen und bewertet.
- Es wird ein erhöhter Blitzstoßstrom ($J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$) eingeführt, um mechanische Vorschädigungen besser bewerten zu können.

Die Anwendung dieses komplexen Fehlerkriteriums ist einmalig in den bisherigen Untersuchungen zum Energieaufnahmevermögen. Besondere Bedeutung kommt hierbei vor allem der Bewertung der Referenzspannung zu, da diese einfach zu messen ist und sich für Routine- und Typprüfungen anbietet. Gerade im Hinblick auf die Prüfung von direkt vergossenen Ableitern, bei denen eine visuelle Prüfung der MO-Widerstände schwierig ist, könnte die Messung der Referenzspannung eine einfache Bewertungsmöglichkeit bieten. Derzeit wird das Bestehen einer solchen Prüfung für direkt vergossene Ableiter, zum Beispiel bei der Rechteckstoßstromprüfung, dadurch nachgewiesen, dass ein zusätzlicher Impuls (18+1) in den Ableiter eingebracht wird und das Oszillogramm während dieses Stoßes keine Auffälligkeiten zeigen darf. Die Messung der Referenzspannung könnte die Möglichkeit eröffnen, Schädigungen besser zu erkennen. In späteren Untersuchungen müssen natürlich auch Wechselstromversuche unter Berücksichtigung des neuen komplexen Fehlerkriteriums durchgeführt werden. Das heißt, der Versuch muss nach einer bestimmten Zeit abgebrochen werden und danach eine Bewertung des MO-Widerstandes nach den oben beschriebenen Kriterien erfolgen. Die Herstellung dieser Korrelation Totalausfall – komplexes Fehlerkriterium war jedoch infolge des großen Zeitaufwandes für dieses Projekt nicht mehr möglich und bleibt daher für eine spätere Weiterarbeit offen.

Sollte die Messung der Referenzspannung für die Verwendung in einer Norm später einmal Eingang finden, so ist zu überlegen, ob man einen eigenen Namen für diese besondere Referenzspannung vergibt, um sie von der durch den Hersteller selbst gewählten Referenzspannung klar abzugrenzen. Der Referenzstrom und damit auch die Referenzspannung werden derzeit von jedem Hersteller für jeden Widerstandstyp selbst gewählt, während in dieser Untersuchung eine feste Stromdichte von $0,12 \text{ mA/cm}^2$ für alle MO-Widerstände vorgegeben wurde. So ist zu überlegen, ob man diese Referenzspannungsmessung bei einer für alle MO-Widerstände fest vorgegebenen Stromdichte zum Beispiel U_{ch} (ch für change) nennt. Diese Bezeichnung wurde auch schon in der Veröffentlichung [2] benutzt, um eine klare Abgrenzung der beiden Begriffe zu gewährleisten.

8 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Begonnen wird dazu mit einer Übersicht, welche Impulsströme bzw. welche Stromhöhen bei den Wechselstromversuchen angewendet wurden (Kapitel 8.1) und wie groß der Umfang der jeweiligen Versuchsreihe war. Hiernach werden die Ergebnisse für die zwei Größen separat vorgestellt und dabei detaillierte betrachtet (Kapitel 8.2 und Kapitel 8.3). Unter anderem wird auch auf besondere Erkenntnisse bei den Wechselstromprüfungen und besondere Schadensbilder während Impulsstromprüfungen eingegangen (Kapitel 8.2). Vorgestellt werden auch die Erkenntnisse zur Änderung der Referenzspannung infolge von Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ (Kapitel 8.3). Danach wird ein Überblick über die gesamten Ergebnisse gegeben, der auch den Vergleich der beiden verwendeten Größen 1 und 2 enthält (Kapitel 8.4). Abschließend wird auf die Abhängigkeit des Energieaufnahmevermögens vom Durchmesser der MO-Widerstände (Kapitel 8.5) eingegangen.

8.1 Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen

Für die durchgeführten Prüfungen lieferten insgesamt sieben namhafte Hersteller von MO-Widerständen mehrere tausend MO-Widerstände. Die Zahl der bislang in den Versuchsreihen untersuchten MO-Widerstände beträgt mehr als 3200. Berücksichtigt man dazu die in den Vorversuchen untersuchten MO-Widerstände, so ergibt sich eine Zahl von mehr als 5000.

Zunächst soll indes ein Überblick über die durchgeführten Untersuchungen gegeben werden.

Tabelle 11 (Größe 2) und **Tabelle 12** (Größe 1) stellen die durchgeführten Prüfungen und die Anzahl der für die jeweilige Prüfung verwendeten Prüflinge dar. Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- LW 1 ms: Prüfung mit Rechteckstoßstrom Dauer ca. 1 ms,
- LW 2 ms: Prüfung mit Rechteckstoßstrom Dauer ca. 2 ms,
- LW 4 ms: Prüfung mit Rechteckstoßstrom Dauer ca. 4 ms,
- Hochstoßstromprüfung $4/10 \mu\text{s}$,
- Prüfung mit Blitzstoßstrom der Form $90/200 \mu\text{s}$,
- Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 10 A,
- Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 100 A,
- Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 200-300 A.

Tabelle 11: Durchgeführte Prüfungen und deren Anzahl für MO-Widerstände mit einem Durchmesser von 37...45 mm („Größe 2“)

	Größe 2 Durchmesser 37...45 mm – Mittelspannungs-MO-Widerstände						
	Hersteller						
Prüfung	S	Z	U	X	Y	V	W
LW 1 ms	40		40		50	40	40
LW 2 ms	40		40		40	75	40
LW 4 ms	40		40		40	40	40
Hochstoßstrom 4/10 µs	60		60		70	50	60
Blitzstoßstrom 90/200 µs	40		40		40	40	60

Tabelle 12: Durchgeführte Prüfungen und deren Anzahl für MO-Widerstände mit einem Durchmesser von 55...65 mm („Größe 1“)

	Größe 1 Durchmesser 55...65 mm – Hochspannungs-MO-Widerstände						
	Hersteller						
Prüfung	S	Z	U	X	Y	V	W
LW 1 ms	40		60	40			
LW 2 ms	40		40	40			
LW 4 ms	40		40	40			
Blitzstoßstrom 90/200 µs	40		40	40			
Hochstoßstrom 4/10 µs							
AC 10 A	50	50	50	50			
AC 100 A	50		50	50			
AC 200 -300 A	50	40	50	50			

Erklärung der Farblegende zu Tabelle 11 und Tabelle 12:

nicht geliefert	fertig	ausstehend	mit dem derzeitigen Aufbau nicht möglich
-----------------	--------	------------	--

Die rote Markierung zeigt, dass einige Hersteller bis zum Ende dieser Arbeit die angekündigten MO-Widerstände noch nicht geliefert hatten. Hersteller Z hat zu wenige MO-Widerstände

geliefert, so dass nicht alle Prüfungen durchgeführt werden konnten (siehe Tabelle 12). Die grüne Markierung zeigt den Abschluss der entsprechenden Prüfung an. Schließlich gibt die Zahl in den grünen Feldern die Anzahl der verwendeten Prüflinge an. Die MO-Widerstände mit einer gelben Markierung wurden sehr spät geliefert und konnten bis zum Ende dieser Arbeit daher noch nicht geprüft werden. Die blaue Markierung bezieht sich auf die Durchführung von Hochstoßstromimpulsen $4/10\ \mu\text{s}$ an MO-Widerständen der „Größe 1“ (Durchmesser 55...65 mm). Hier ergab sich das Problem, dass sehr hohe Ströme im Bereich von 300 kA erforderlich waren (siehe **Abbildung 8.1**). Dies führte dazu, dass die Funkenstrecke nicht in der Lage war, den Prüfkreis nach dem ersten Stromnulldurchgang zu trennen. Versuche, den Aufbau in diesem Bereich zu ertüchtigen, z.B. durch Beblasen der Funkenstrecke mit Pressluft, waren nicht erfolgreich. Daher wurde im Weiteren auf die Prüfung mit dieser Impulsform für Hochspannungs-MO-Widerstände (Größe 1) verzichtet.

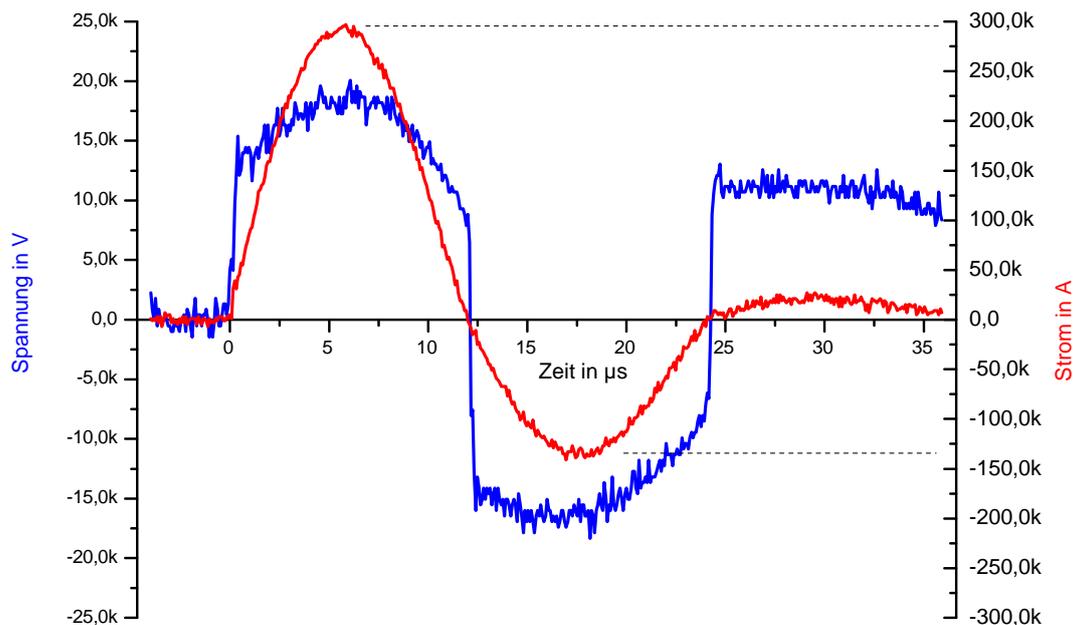


Abbildung 8.1: Durchschwingen des Stromes während einer Hochstoßstromprüfung $4/10\ \mu\text{s}$ an einem Hochspannungswiderstand der Größe 1

8.2 Größe 1 – Hochspannungs-MO-Widerstände

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Prüfungen der MO- Widerstände der Größe 1 detailliert beschrieben. Hierzu wird zunächst eine Übersichtsdarstellung der Ergebnisse gegeben und diese erläutert. Danach werden die Ergebnisse mit einer früheren Untersuchung [Ring-97] verglichen und es wird auf ein besonderes Phänomen (Ausreißer mit besonders niedrigem Energieaufnahmevermögen) in den Wechselstromuntersuchungen eingegangen. Im Weiteren findet sich eine Aufschlüsselung nach Herstellern (Säulendiagramme), in denen die Ausfallarten und deren Häufigkeiten in Abhängigkeit der Impulsform dargestellt werden. Zuletzt wird noch ein besonderes Phänomen (asymmetrische Punktbildung auf der Metallisierung) beschrieben, das während einiger Versuchsreihen auftrat.

In **Abbildung 8.2** sind die 50%-Ausfallenergien der Versuche mit MO-Widerständen der Größe 1 über der Amplitude der Stromdichte abgetragen. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind die Streuungen der Messdaten nicht eingezeichnet. Die kompletten Daten finden sich aber im Anhang A. Außerdem sind die von Ringler (siehe [Ring-97]) für Hersteller 3 angegebenen Werte in das Diagramm eingeflossen. Ringler gab für seinen Hersteller 3 folgende Werte an:

Tabelle 13: Energie- und Stromwerte des Herstellers 3 nach [Ring-97]

mittlerer Strom in A	mittlere Stromdichte in A/cm ²	mittlere Ausfallenergie in J	mittlere Ausfallenergie in J/cm ³
0,84	0,03	34000	464,16
7,4	0,24	32300	440,96
67	2,15	47300	645,73
646	20,73	59200	808,19
4350	139,56	76100	1038,91
35200	1129,29	124000	1692,83

Da in [Ring-97] keine Angaben zu Stromdichten und Ausfallenergien in J/cm³ gemacht werden, wurden die grau hinterlegten Spalten ergänzt. Ringler gibt eine Höhe von 22...24 mm und einen Durchmesser von 62...64 mm seiner Prüflinge an. Aus der mittleren Höhe (23 mm) und dem mittleren Durchmesser (63 mm) wurden dann die grau hinterlegten Spalten errechnet. Da Ringler zur Auswertung seiner Daten ebenfalls von einer Normalverteilung ausging, können seine Daten in **Abbildung 8.2** übernommen werden. Allerdings muss beachtet werden, dass in der von Ringler durchgeführten Untersuchung immer bis zum mechanischen Ausfall geprüft wurde.

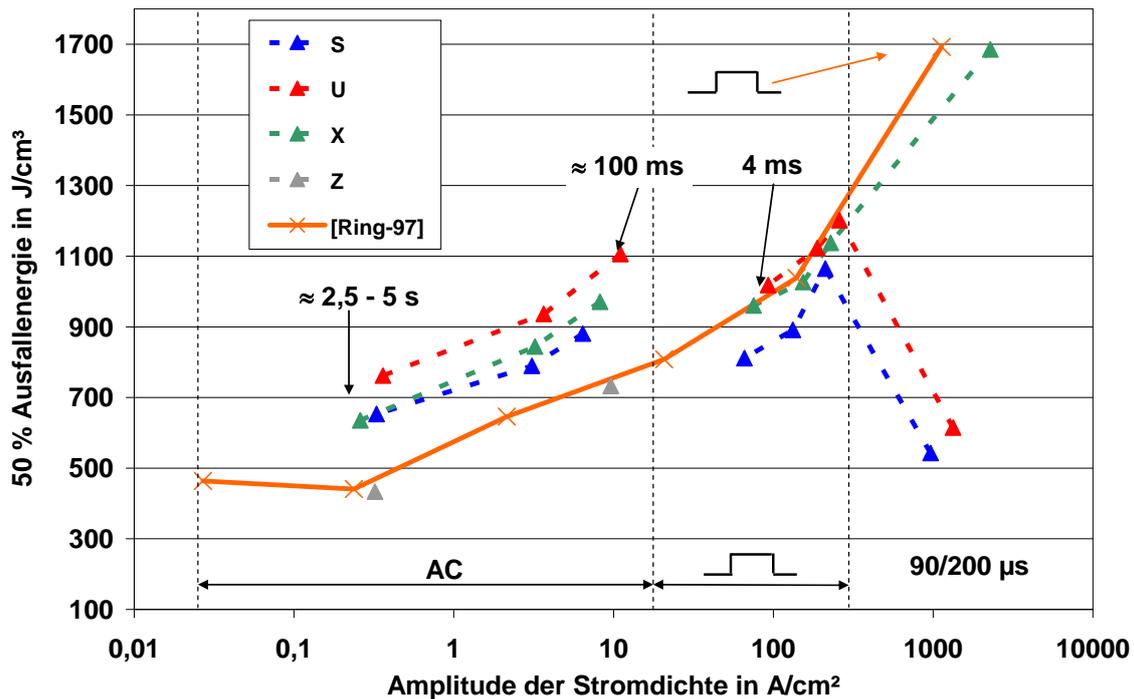


Abbildung 8.2: 50%-Ausfallenergie bei Prüfungen an MO-Widerständen der Größe 1 über der Stromdichte, mit den Daten aus [Ring-97]

Im Bereich der AC-Prüfungen, bei denen das Fehlerkriterium gleich ist (mechanischer Ausfall), ist bei den MO-Widerständen von drei der geprüften Hersteller ein signifikant höheres Energieaufnahmevermögen zu erkennen. Lediglich Hersteller Z weist ein ähnlich (geringes) Energieaufnahmevermögen wie nach [Ring-97] auf. Interessanterweise haben die MO-Widerstände von Hersteller Z (als einzige Ausnahme in diesen Untersuchungen) auch eine ähnliche Bauhöhe wie die von Ringler verwendeten MO-Widerstände, während die Höhen der MO-Widerstände von Hersteller S, U, X fast doppelt so hoch sind. Hieraus könnte man einen Zusammenhang zwischen Energieaufnahmevermögen und dem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser ableiten (engl. "aspect-ratio"). Als wahrscheinlicher erscheint es allerdings, dass die Fertigung der MO-Widerstände nicht so gut optimiert ist wie die der anderen Hersteller und sich daraus auch die halbe Bauhöhe (vereinfachte Fertigung) erklärt. Letztlich kann diese Fragestellung durch diese Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Es ist zunächst erstaunlich, dass mit sinkender Stromhöhe und damit steigender Versuchsdauer das Wechselstromenergieaufnahmevermögen abnimmt. Sollte man doch erwarten, dass mit längeren Versuchsdauern eine bessere Vergleichmäßigung der Temperatur im Inneren des MO-Widerstandes einhergeht und damit eine Erhöhung des Energieaufnahmevermögens. Dass dies nicht der Fall ist, liegt an der Kennlinie des ZnO-Materials (siehe auch Abbildung 1.1).

Im Bereich der Wechselspannungsversuche ist diese sehr flach; sie kann in etwa durch folgende Gleichung beschrieben werden (siehe [Hirn-07a]):

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (7.1)$$

α liegt für die betrachteten Wechselstromversuche in etwa bei 50. Daraus resultiert eine große Stromänderung aufgrund einer nur kleinen Spannungsänderung. Hat nun ein MO-Widerstand, infolge einer Inhomogenität, in einem Bereich eine niedrigere Restspannung, als das umliegende Material, so bewirkt dies infolge der Kennlinie des Materials den Fluss eines höheren Stroms in diesem Bereich. Dieser höhere Strom hat wiederum eine Erhöhung der Temperatur zur Folge und, bedingt durch die NTC-Kennlinie des Materials, steigt der Strom weiter an. Diese positive Rückkopplung verstärkt sich dann bis zum Ausfall des MO-Widerstandes. Es bildet sich ein heißer leitfähiger Kanal (engl. "hot channel") aus. Bei längeren Versuchsdauern gewinnt dieser Effekt zunehmend an Einfluss. Daher sinkt das Energieaufnahmevermögen mit längeren Versuchszeiten ab.

Im Bereich der Impulsstromprüfungen ist die mittlere Ausfallenergie der geprüften MO-Widerstände mit [Ring-97] vergleichbar. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass in diesem Bereich das Fehlerkriterium unterschiedlich ist. Während Ringler immer bis zum mechanischen Ausfall prüfte, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein komplexes Fehlerkriterium angewendet. Die Prüfung bis zum mechanischen Ausfall hätte höhere Energien erbracht. Hieraus kann man ableiten, dass eine Weiterentwicklung der MO-Widerstände bezüglich ihres Energieaufnahmevermögens seit 1997 stattgefunden hat.

Vergleicht man die Wechselstromprüfungen miteinander, so ist das Energieaufnahmevermögen etwa 30 bis 50 % höher als in [Ring-97]. Gleichzeitig haben sich die Bauhöhen der MO-Widerstände in dieser Zeit verdoppelt (bis auf MO-Widerstände des Herstellers Z), was auf eine verbesserte Fertigung schließen lässt.

Der Einbruch des Energieaufnahmevermögens für Hersteller S und U für 90/200 μ s Impulse geht auf das Versagen der Glasur zurück (siehe auch Kapitel 3.2) Insgesamt ist aufgrund steigender Stromdichte und damit kürzerer Energieeintragsdauer ein Ansteigen des Energieaufnahmevermögens zu erkennen. Auch ist zu erkennen, dass mit steigender Stromamplitude die Glasur und ihre Eigenschaften zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Abbildung 8.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Energieeintragsdauer und Mittelwert der Stromdichte in einer doppelt-logarithmischen Darstellung. Erstmals wurde diese Darstellung in [Ring-97] verwendet (siehe auch Kapitel 3.2).

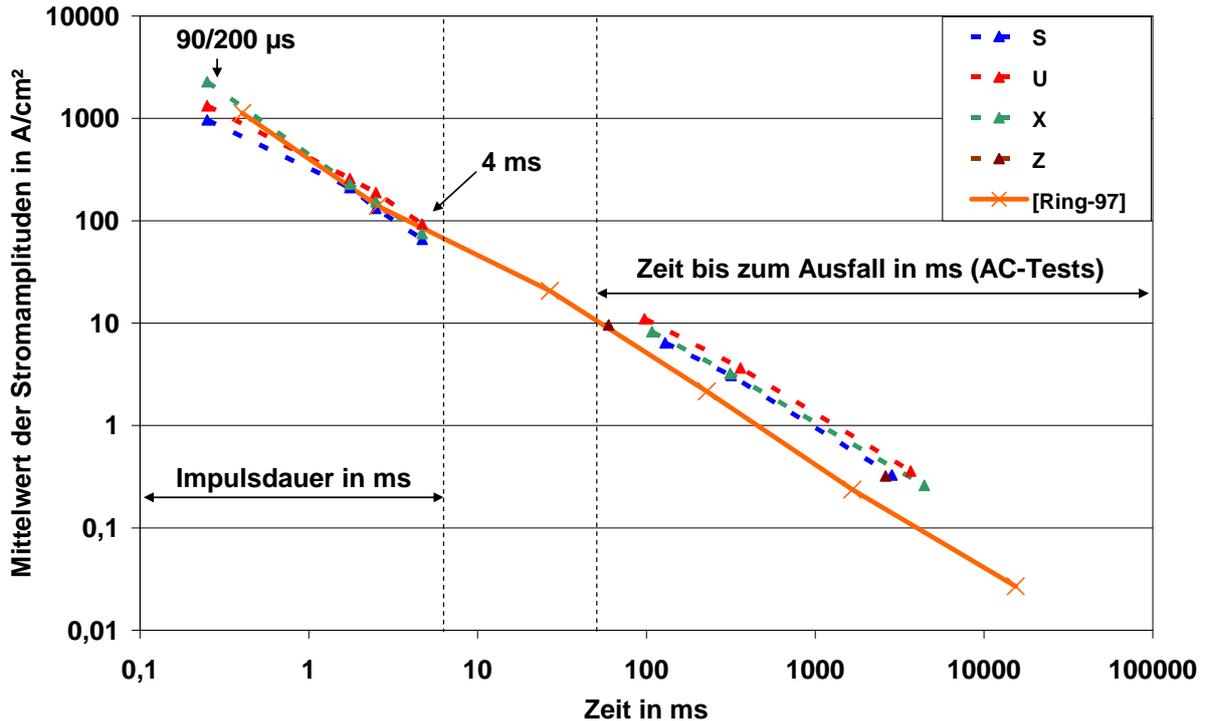


Abbildung 8.3: Mittelwert der Stromamplituden in Abhängigkeit der Zeitdauer für MO-Widerstände der Größe 1, mit den Daten aus [Ring-97]

Mit den aus dieser Untersuchung vorliegenden Daten lässt sich dieser lineare Zusammenhang in einer doppelt-logarithmischen Darstellung bestätigen. Allerdings ist auch hier das unterschiedliche Fehlerkriterium zwischen Wechselstrom- und Impulsstromprüfungen zu berücksichtigen. Zusätzlich sollte man bei dieser Darstellung berücksichtigen, dass durch die logarithmische Darstellung der Daten Unterschiede, die in einer linearen Darstellung deutlich sichtbar wären, nicht gut erkennbar sind. Man übersieht z.B. leicht den dramatischen Abfall des Energieaufnahmevermögens bei der Stromform 90/200 μ s. Sehr gut geeignet ist die Darstellung zum Beispiel im Laboreinsatz, um die Versuchsdauer von Wechselstromversuchen voraus zu berechnen. Liegen z.B. die Daten von Versuchen mit 300 A und 100 A vor, so kann mit dieser Darstellung auf die Versuchsdauer bei 10 A geschlossen werden.

Bei den Wechselstromversuchen trat der besondere Effekt auf, dass bei einigen Prüflingen das Energieaufnahmevermögen signifikant herabgesetzt war. Die Ausfälle traten bei fast allen Herstellern und allen Stromamplituden auf. Jedoch ist ihre Anzahl recht gering. Die Beobachtungen ergaben, dass es sich um etwa einen frühzeitigen Ausfall pro 100-200 Stück handelt, wobei die zugehörigen Ausfallenergien stark schwankten. **Abbildung 8.4** zeigt die Ergebnisse einer Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 300 A. Das um ca. 85 % niedrigere Energieaufnahmevermögen bei Prüfling Nummer 32 gegenüber dem Durchschnitt ist

hierbei deutlich zu erkennen. Ein Messfehler kann aufgrund der automatisierten Versuchstechnik ausgeschlossen werden. In der Diskussion mit Herstellern von Überspannungsableiterbänken für Serienkompensationsanlagen ergab sich, dass auch dort bei neuen Anlagen nach der Inbetriebnahme immer wieder ein Versagen einzelner Ableiter zu beobachten ist. Dies unterstützt die Erkenntnis, dass bei Wechselstrombelastung tatsächlich MO-Widerstände mit einem deutlich herabgesetzten Energieaufnahmevermögen auftreten. Dies ist insofern interessant, als alle geprüften MO-Widerstände die Stückprüfungen der Hersteller überstanden haben. Die Stückprüfverfahren der Hersteller variieren. Zudem ist es äußerst schwierig, eine genaue Auskunft über die Art der durchgeführten Stückprüfungen, insbesondere zur akzeptierten Fehlerrate einer Herstellungscharge, zu bekommen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Stückprüfungen im Allgemeinen mit Rechteckstoßströmen im Bereich der „Nennenergie“ oder darunter durchgeführt werden. Eine genaue Erklärung für die frühzeitigen Ausfälle konnte im Rahmen dieser Arbeit leider nicht gefunden werden. Ursache sind natürlich Inhomogenitäten des Materials. Es sollte ein Ziel der Weiterarbeit sein, Stückprüfverfahren zu entwickeln, die eine Erkennung solcher „Ausreißer“ ermöglichen.

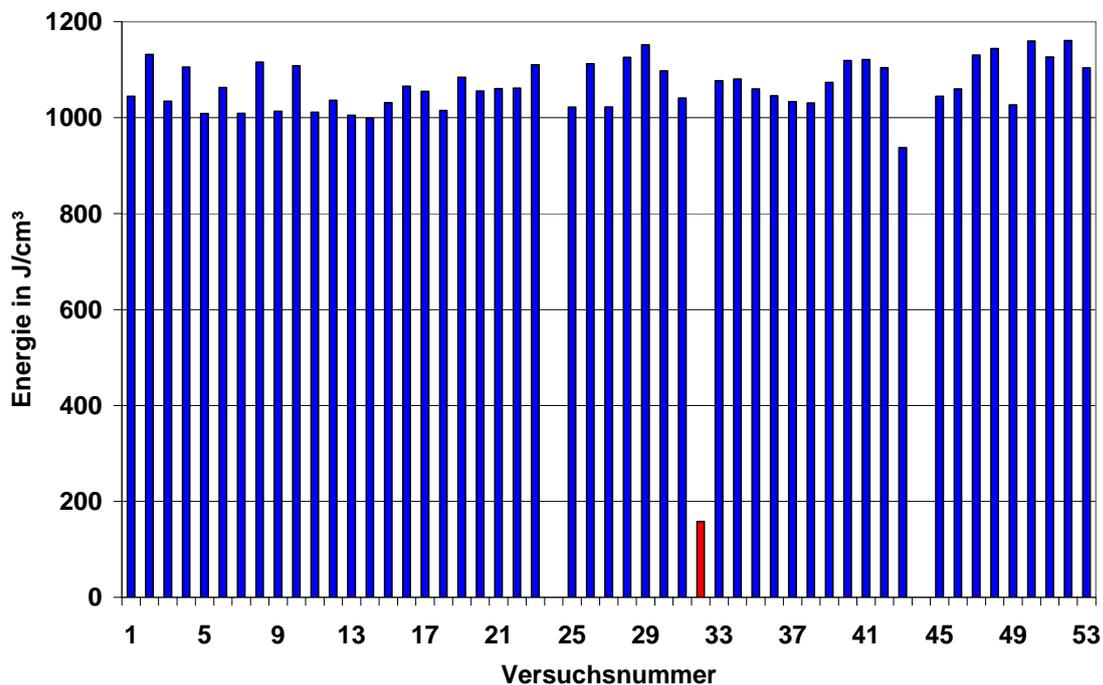


Abbildung 8.4: Ergebnisse einer Wechselstromprüfung mit einer Stromamplitude von ca. 300 A

Gerade für die Auslegung von Serienkompensationsanlagen ist der für das Energieaufnahmevermögen spezifizierbare Wert ein wesentlicher Kostenfaktor. Daher soll im Folgenden der Versuch unternommen werden, die 0,01-% Ausfallenergie, im Gegensatz zu den bisher be-

trachteten 50%-Ausfallenergien, und den Einfluss der Ausreißer auf sie zu untersuchen. Die 0,01-% Ausfallenergie wurde gewählt, da sie für die Auslegung einer solchen Anlage als realistisch eingestuft wird. Leider kann keine Aussage darüber gemacht werden, welche Ausfallwahrscheinlichkeiten die Hersteller von Überspannungsableiterbänken für ihre Auslegungen tolerieren, da es sich dabei um geheime Firmendaten handelt. Geht man von einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,01 % aus und nimmt weiterhin an, dass in einer Serienkompensationsanlage zum Beispiel 2000 MO-Widerstände eingebaut sind (siehe auch [Hintr-93]), so ergibt sich daraus eine Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage bei einmaliger Belastung von 18 %. Dies folgt aus der Annahme, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit eines MO-Widerstandes 0,01 % beträgt. Daher beträgt seine Überlebenswahrscheinlichkeit für dieses Ereignis 99,99 %. Für die Wahrscheinlichkeit, dass die gesamte Anlage der Belastung besteht, dass also kein Widerstand ausfällt, ist die Wahrscheinlichkeit demnach $0,9999^{2000} = 0,8187$. Daher beträgt die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage bei einmaliger Belastung $1 - 0,8187 = 0,1813 = 18,13$ %. Diese recht hohe Ausfallwahrscheinlichkeit lässt auch die Vermutung zu, dass bei der Auslegung solcher Anlagen von den Herstellern eine wesentlich niedrigere Ausfallwahrscheinlichkeit für jeden einzelnen Widerstand gefordert wird. Setzt man die Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,01 % bei einem Hochspannungsableiter an, so ergibt sich ein völlig anderes Bild. Nimmt man zum Beispiel einen 400 kV Ableiter an, so kann mit ca. 60 MO-Widerständen für diesen gerechnet werden. Führt man obige Rechnung für diese Anzahl durch, so ergibt sich eine Ausfallwahrscheinlichkeit für diesen Ableiter bei einmaliger Belastung von 0,6 %.

Tabelle 14: 0,01-%-Quantil der Wechselstromprüfungen mit und ohne Ausreißer, die untere und obere Grenze stellt den 95%-Vertrauensbereich zu dieser Punktschätzung dar

Hersteller	S	S	U	Z
Stromamplitude in A ca.	100	10	10	300
0,01 % Quantil mit Ausreißern in J/cm ³				
Punktschätzung	475	373	478	468
untere Grenze	389	302	408	395
Obere Grenze	538	424	529	520
0,01 % Quantil ohne Ausreißer in J/cm ³				
Punktschätzung	648	401	591	496
untere Grenze	607	335	546	428
Obere Grenze	678	448	623	543

Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die 0,01-%-Ausfallenergien und deren untere und obere Grenzen. Die untere und obere Grenze sind das 95%-Konfidenzintervall zu dieser Punkt-

schätzung. Würde man für eine konservative Auslegung die untere Grenze (grau hinterlegt) ansetzen, so sieht man deutlich, dass die Werte ohne Ausreißer deutlich höhere Werte annehmen würden. Anstatt der derzeit für die Auslegung von Ableiterbänken üblichen 200...300 J/cm³ (aus der Diskussion mit Herstellern) kann aufgrund dieser Untersuchung durchaus eine höhere spezifische Energie von ca. 400 J/cm³ (abhängig vom Hersteller und der projektierten Stromhöhe) für die Auslegung empfohlen werden. Allerdings ist bei dieser Untersuchung nur das einmalige Energieaufnahmevermögen untersucht worden. Um wirklich eine höhere Energie spezifizieren zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um zu verifizieren, ob diese Energie auch mehrfach von einem MO-Widerstand gehalten werden kann. Problematisch kann eine höhere Spezifizierung des Energieaufnahmevermögens auch deshalb sein, weil dadurch möglicherweise Ausreißer ausfallen, die bei niedrigeren Energien noch nicht zum Tragen gekommen wären. Für eine höhere Spezifizierung spricht das enorme Einsparpotenzial. Geht man von 2000 MO-Widerständen pro Bank aus [Hirn-93] und nimmt an, dass man statt bisher 200 J/cm³ dann 400 J/cm³ spezifizieren kann, ergibt sich eine Einsparung von 1000 MO-Widerständen und deren Gehäusen.

Im Weiteren werden die Ausfallmechanismen und Häufigkeiten abhängig von der Impulsform für jeden Hersteller einzeln dargestellt. Da nur bei den Impulsstromversuchen eine Differenzierung hinsichtlich des Ausfallmechanismus möglich war (siehe Kapitel 7.1) bezieht sich diese Darstellung auch nur auf die Ergebnisse der Impulsstromversuche. Dabei werden folgende Abkürzungen verwendet:

- BR: Bruch,
- ÜB: Überschlag,
- DU: Durchschlag,
- MF: mechanischer Ausfall während der Blitzstromausgangsmessungen mit 10 kA bzw. $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ (siehe auch Kapitel 7.1.1),
- U_{ref} : Ausfall durch Änderung der Referenzspannung größer als 5 %,
- U_{rest} : Ausfall durch Änderung der Restspannung größer als 5 %.

Farblegende für die Darstellung



Abbildung 8.5 zeigt die Ausfallmechanismen und deren Häufigkeit für MO-Widerstände des Herstellers S in Abhängigkeit von der Impulsform.

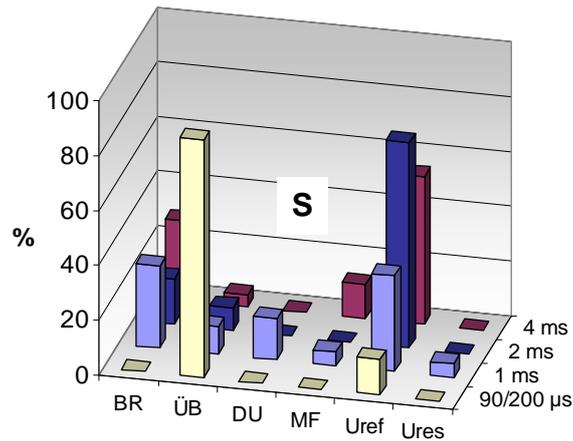


Abbildung 8.5: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers S – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform

Für MO-Widerstände des Herstellers S verteilen sich die Fehler nahezu gleich für Rechteckstoßströme von 1 ms auf Bruch und Änderung der Referenzspannung, während für 2 ms und 4 ms die Änderung der Referenzspannung als Fehlerkriterium überwiegt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der Prüfung mit 90/200 µs-Impulsen der Überschlag (engl. “Flashover“) das dominierende Kriterium ist. Diese Überschläge sind allerdings nicht auf eine dielektrische Überlastung der Grenzschicht Glasur-Luft, sondern auf eine Überlastung innerhalb der Glasur zurückzuführen. Um eine dielektrische Überlastung der Grenzschicht Glasur-Luft auszuschließen, wurden mehrere Versuche an MO-Widerständen des Herstellers S sowie an MO-Widerständen des ebenfalls diese Problematik zeigenden Herstellers U unter SF₆ durchgeführt. Wäre der Effekt im Bereich Glasur-Luft aufgetreten, so hätte durch die Verwendung von SF₆ eine höhere Festigkeit erwartet werden können. Dies war jedoch nicht der Fall. Eine genauere Untersuchung der Überschlagstellen zeigt, dass der Überschlag sich in der Glasur entwickelt hat und dann durch den Lichtbogen nach außen getragen wurde. **Abbildung 8.6** zeigt einen Widerstand eines Herstellers nach einem Überschlag in der Glasur. Ein solches Verhalten, dass sich ein Überschlag an einem MO-Widerstand aus einem Durchschlag in der Glasur entwickelt, wurde auch schon von [Darv-98] (siehe Kapitel 3.2) berichtet.



Abbildung 8.6: MO-Widerstand mit Außenüberschlag, es trat ein Versagen in der Glasur auf

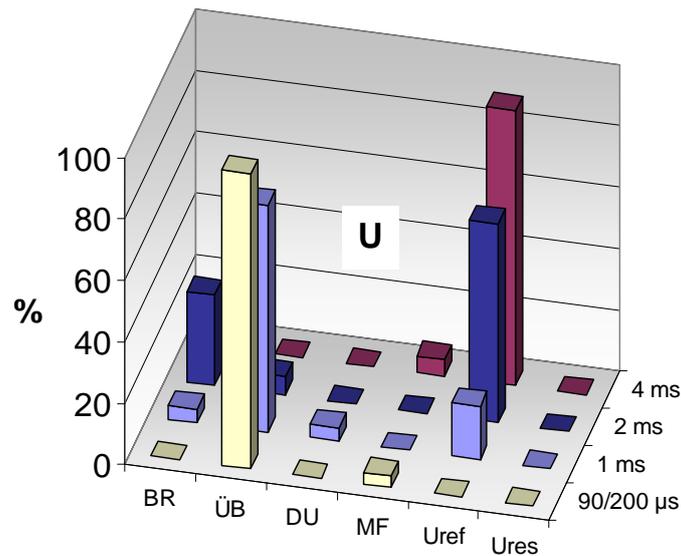


Abbildung 8.7: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform

Für MO-Widerstände des **Herstellers U** ist ebenfalls der Außenüberschlag der dominierende Fehlermechanismus bei der Prüfung mit Impulsen der Form 90/200 µs (siehe **Abbildung 8.7**). Auch hier beginnt der Durchschlag innerhalb der Glasur. Bei Prüfungen mit Rechteckstoßstromimpulsen der Länge 1 ms dominiert ebenfalls der Außenüberschlag, während bei 2 und 4 ms wieder die Änderung der Referenzspannung als Fehlerkriterium dominiert.

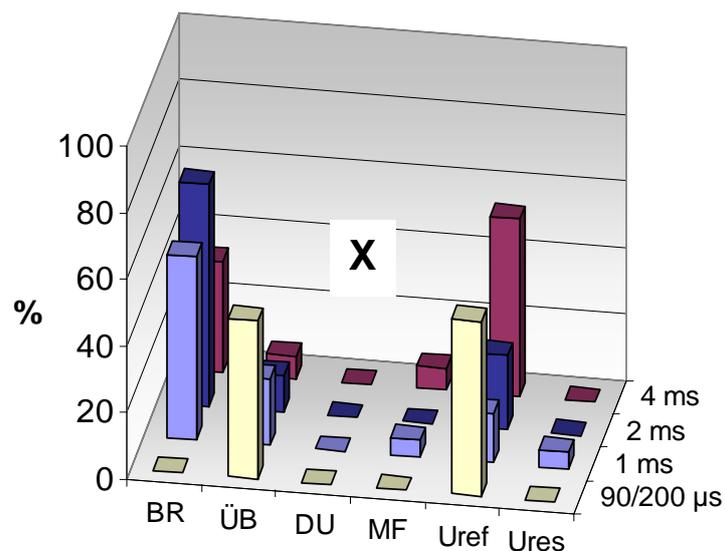


Abbildung 8.8: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen von MO-Widerständen des Herstellers X – Größe 1 in Abhängigkeit von der Impulsform

Bei den MO-Widerständen des **Herstellers X** (siehe **Abbildung 8.8**) teilen sich die Fehler bei der Impulsform 90/200 μ s nahezu gleich auf Außenüberschlag und Änderung der Referenzspannung auf. Allerdings ist hier die Ausfallenergie weitaus größer als bei den MO-Widerständen der Hersteller S und U. Die Änderung der Referenzspannung ist als Fehlerkriterium bei den Rechteckstoßstromprüfungen nicht so relevant wie bei den MO-Widerständen anderer Hersteller, zumeist bleibt Bruch der dominierende Fehler.

Im Folgenden soll auf das Phänomen, dass während der durchgeführten Untersuchungen mit Impulsstrombelastungen an den MO-Widerständen einiger Hersteller während der Rechteckstoßstromprüfungen kleine Strommarken auf einer Seite der Metallisierung auftraten (siehe **Abbildung 8.9**), eingegangen werden. Die Intensität dieser Strommarken wuchs mit der Stromdichte, während die jeweils andere Seite dabei praktisch nicht betroffen war. Um die Einflüsse auf diese Erscheinung zu untersuchen, und um ausschließen zu können, dass der Effekt durch die Prüflingsaufnahme hervorgerufen wurde, wurde eine gesonderte Untersuchung durchgeführt.

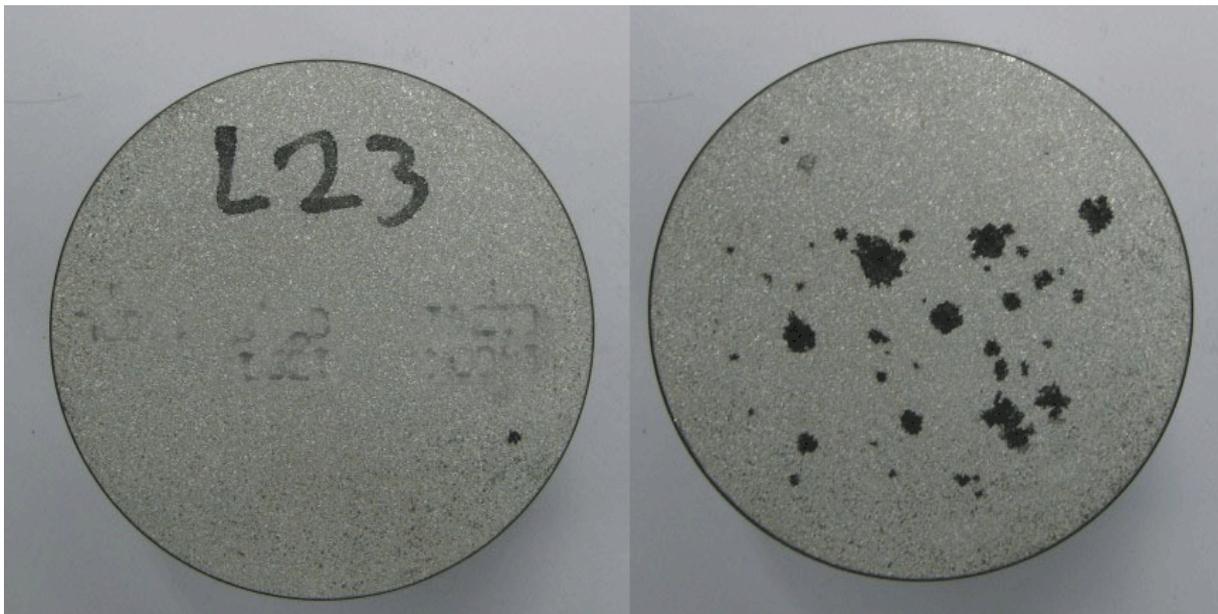


Abbildung 8.9: MO-Widerstand mit einseitigen Strommarken (links: Oberseite, rechts: Unterseite desselben Widerstands) nach Rechteckstoßstromprüfung

Hierzu wurden MO-Widerstände abwechselnd mit ihrer Beschriftung nach oben und unten in die Prüflingsaufnahme eingespannt. Zusätzlich wurde bei manchen Versuchen die Ladespannung des Langwellengenerators umgepolt, um alle Kombinationsmöglichkeiten der Ausrichtung der MO-Widerstände und der Stromflussrichtung durchzuspielen. **Abbildung 8.10** zeigt schematisch, welche Versuche durchgeführt wurden und was dabei variiert wurde. Der Ket-

tenleiter wurde in dieser Abbildung der Einfachheit halber nur als Kondensator dargestellt und die Funkenstrecke vollständig weggelassen.

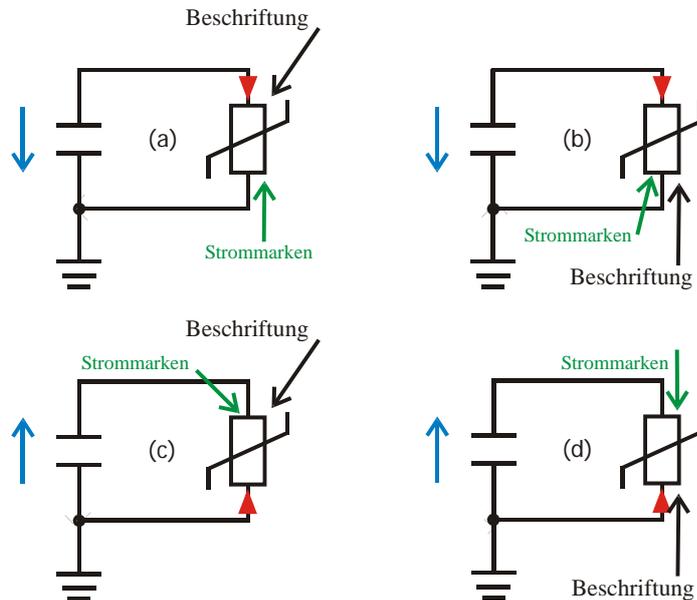


Abbildung 8.10: Ersatzschaltbilder zu den Versuchen mit MO-Widerständen, die einseitige Punktbildung aufweisen

Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Strommarken bei allen Versuchskonfigurationen jeweils am Austrittsort des Stromes auftraten, während ihre Intensität mit der Stromhöhe variiert. Daher kann die Verantwortlichkeit der Prüflingsaufnahme für diesen Effekt ausgeschlossen werden. Auch kann die Verursachung dieses Effekts aufgrund der werksseitigen Stückprüfungen ausgeschlossen werden, da das umgekehrte Einlegen der MO-Widerstände (Beschriftung oben – unten) ebenfalls keinen Einfluss hat. Leider konnte im Rahmen dieser Arbeit, trotz intensiver Kontakte mit den Herstellern, keine endgültige Antwort für dieses Verhalten gefunden werden. Eine denkbare Ursache ist, dass die Metallisierung, die diese Hersteller verwenden, vielleicht nicht aus reinem Aluminium, wie die zur Kontaktierung verwendeten Elektroden besteht, sondern z.B. aus Zink (chemisches Symbol Zn) oder einer Aluminium-Zink-Legierung. Betrachtet man die Grenzschicht Elektrode \leftrightarrow MO-Widerstand, so kann Abbildung 8.10 vereinfacht werden.

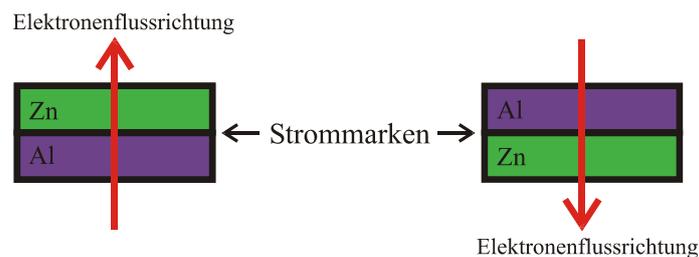


Abbildung 8.11: Schematische Darstellung der Grenzfläche Elektrode \leftrightarrow Metallisierung des MO-Widerstandes; die eingezeichnete Stromrichtung ist die reale Elektronenflussrichtung

Abbildung 8.11 zeigt die Vereinfachung der in Abbildung 8.10 beschriebenen Erkenntnisse unter der Annahme, dass es sich bei der Metallisierung des MO-Widerstandes nicht um Aluminium, sondern um Zink oder eine Aluminium-Zinklegierung handelt. Die eingezeichnete Stromrichtung entspricht nicht der technischen Stromrichtung aus Abbildung 8.10, sondern der realen Elektronenflussrichtung. Sollte diese Vermutung richtig sein, so könnte eventuell durch den großen Stromfluss ein Materialtransport von einem Kontaktmaterial auf das Andere und damit Korrosion die Ursache für die Strommarken sein, ähnlich der elektrochemischen Korrosion an unterschiedlichen Metallen, wobei hier sicherlich andere Prozesse entscheidend sind, da elektrochemische Korrosion sehr langsam abläuft und ein Elektrolyt vorhanden sein muss. Aufgrund des großen Versuchsprogramms konnte dieser Vermutung nicht weiter nachgegangen werden. Im Rahmen der Weiterarbeit sollte dieser Effekt untersucht werden. Hierzu bietet sich eine chemische Analyse der Metallisierung der MO-Widerstände an, um herauszufinden, ob die Metallisierung der MO-Widerstände aus reinem Aluminium besteht oder nicht. Ein einfacher Versuch mit zwei aufeinander gestapelten MO-Widerständen brachte leider kein Ergebnis, so dass nur die chemische Analyse zur Lösung der Fragestellung bleibt. Bei dem erwähnten Versuch wurden zwei MO-Widerstände aufeinandergestapelt, wobei zwischen den MO-Widerständen keine Aluminiumscheibe lag. Auf dem Oberen und unter dem Unteren waren dagegen die üblichen Aluminiumkontaktscheiben angebracht. Wäre der Effekt auf die Grenzschicht Metallisierung - Aluminiumelektrode zurückzuführen, so hätten bei einem Rechteckstoßstrom erneut Strommarken an einer Grenzschicht, nicht aber an der Grenzschicht Metallisierung – Metallisierung auftreten dürfen. Leider reichte die vorhandene Versuchstechnik nicht aus, um die für einen solchen Versuch notwendige Stromdichte bei zwei übereinander gestapelten MO-Widerständen herbeizuführen.

Abgesehen von diesem Polaritätseffekt ist auch bei den MO-Widerständen anderer Hersteller ein vermehrtes Auftreten von Strommarken auf der Metallisierung mit zunehmender Stromstärke und damit zunehmender Stromdichte zu beobachten. Hierbei treten diese jedoch sowohl auf Ober- als auch auf Unterseite gleichermaßen auf. Interessant hierbei ist, dass diese Strommarken auch einen Hinweis auf die Änderung der Referenzspannung geben. So konnte bei manchen MO-Widerstandstypen schon aufgrund der visuellen Untersuchung im Labor eine Verringerung der Referenzspannung vermutet werden. Durch entsprechende Erfahrung konnte so sogar schon in etwa auf die Höhe der Referenzspannungsänderung geschlossen werden. Bei den Strommarken handelt es sich um kleine Durchschläge im ZnO-Material und der Metallisierung. Je nach Ausprägung und Tiefe sind diese entscheidend für die Änderung der Referenzspannung. Es liegt daher nahe, dass sich der Zustand eines MO-Widerstandes

durch die Messung der Referenzspannung bewerten lassen könnte. Dies könnte eine Verbesserung von Routine- und Typprüfungen ermöglichen.

8.3 Größe 2 – Mittelspannungs-MO-Widerstände

Nun werden die Ergebnisse für MO-Widerstände der Größe 2, in ähnlicher Weise wie in Kapitel 8.2 für MO-Widerstände der Größe 1 geschehen, dargestellt. Zunächst wird das Energieaufnahmevermögen im Herstellervergleich aufgegriffen. Danach erfolgt für jeden Hersteller einzeln eine Darstellung der Ausfallarten und Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Impulsform. Aus dem für die MO-Widerstände aller Hersteller gleichen Ausfallbild für Hochstoßstromimpulse ($4/10 \mu\text{s}$) wird dann eine gesonderte Untersuchung des Zusammenhangs von Stromhöhe des Hochstoßstromimpulses und der Änderung der Referenzspannung abgeleitet. Zuletzt wird die Änderung der Referenzspannung dann noch mit der Änderung der Verlustleistung für diese Versuche verglichen.

In **Abbildung 8.12** ist die mittlere Ausfallenergie über der Stromdichte für MO-Widerstände der Größe 2 abgetragen. Die Daten zu diesem Diagramm finden sich in Anhang B.

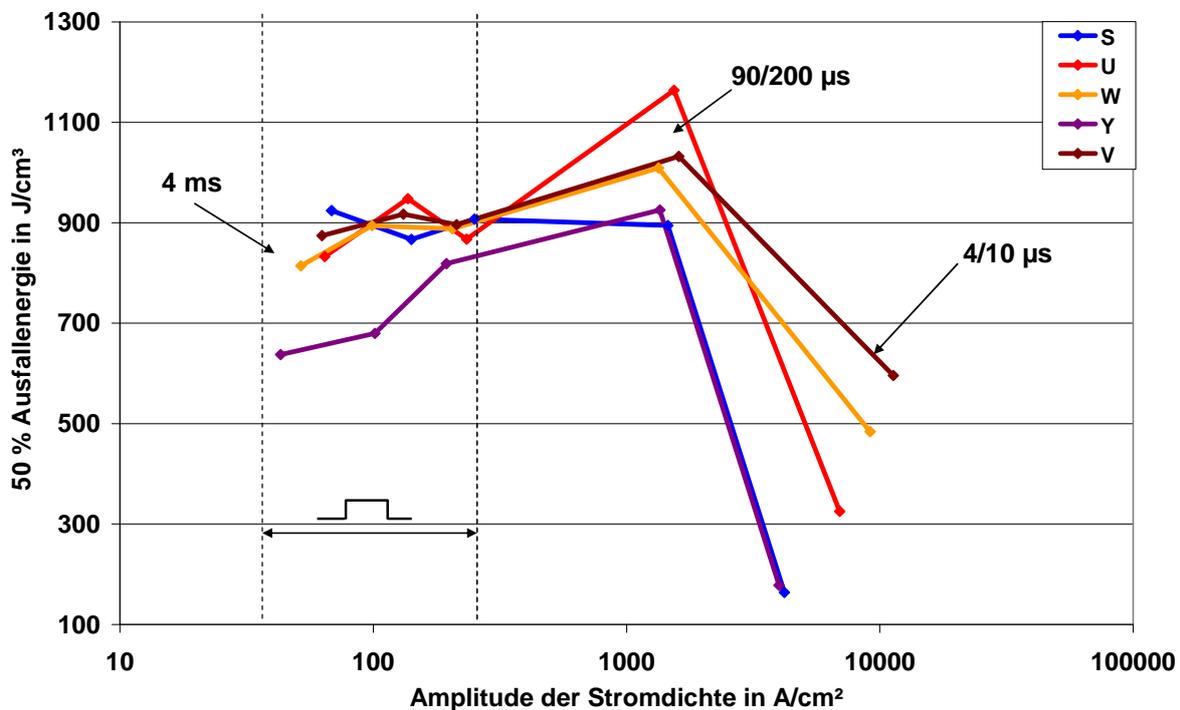


Abbildung 8.12: Vergleich der mittleren Ausfallenergien für MO-Widerstände der Größe 2

Teils bleibt das Energieaufnahmevermögen im Bereich der Rechteckstoßströme näherungsweise konstant, teils lässt sich ein Anstieg mit steigender Stromdichte beobachten. Bis auf einen Hersteller steigt das Energieaufnahmevermögen mit steigender Stromdichte für

90/200 μs Impulse signifikant an. Für 4/10 μs Impulse sinkt dann das Energieaufnahmevermögen sehr deutlich ab, und es lässt sich eine große Streuung zwischen den MO-Widerständen der einzelnen Hersteller erkennen. Alle MO-Widerstände fallen hierbei fast ausschließlich durch eine Änderung der Referenzspannung aus, hier wird der Einfluss dieses Fehlerkriteriums sehr deutlich.

Im Weiteren wird auf die Ausfallarten und deren Häufigkeit in Abhängigkeit der Impulsform für jeden Hersteller einzeln eingegangen.

Dabei werden die gleichen Abkürzungen wie in dem Kapitel für Größe 1 verwendet:

- BR: Bruch,
- ÜB: Überschlag,
- DU: Durchschlag,
- MF: mechanischer Ausfall während der Blitzstromausgangsmessungen mit 10 kA bzw. $J = 1,5 \text{ kA/cm}^2$ (siehe auch Kapitel 7.1.1)
- U_{ref} : Ausfall durch Änderung der Referenzspannung größer als 5 %,
- U_{rest} : Ausfall durch Änderung der Restspannung größer als 5 %.

Farblegende für die folgenden Bilder:

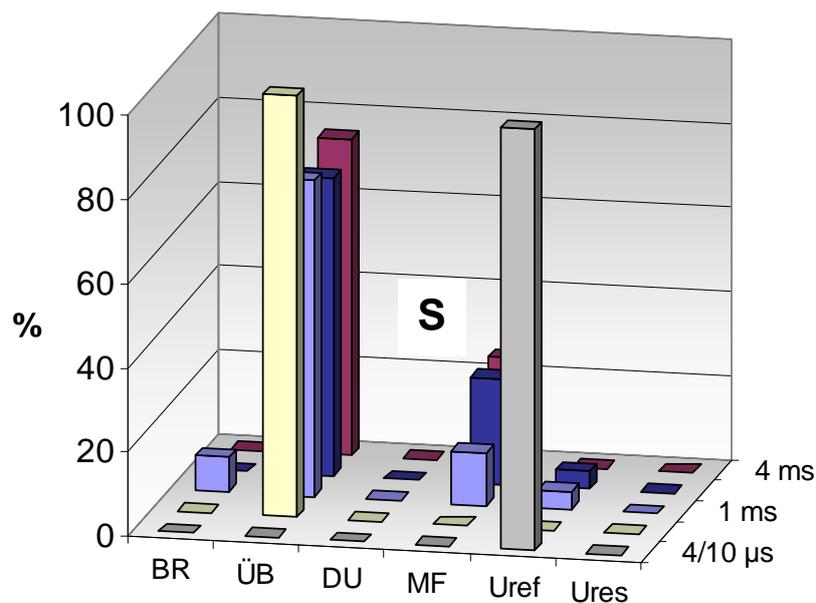
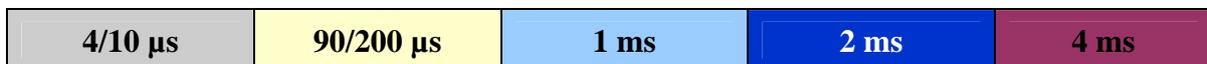


Abbildung 8.13: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers S – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform

Bei der Prüfung der MO-Widerstände des **Herstellers S** – Größe 2 ist für alle Prüfungen (außer bei $4/10 \mu\text{s}$) der Außenüberschlag das dominierende Fehlerkriterium (siehe **Abbildung 8.13**). Lediglich bei $4/10 \mu\text{s}$ ist die Änderung der Referenzspannung das entscheidende Fehlerkriterium.

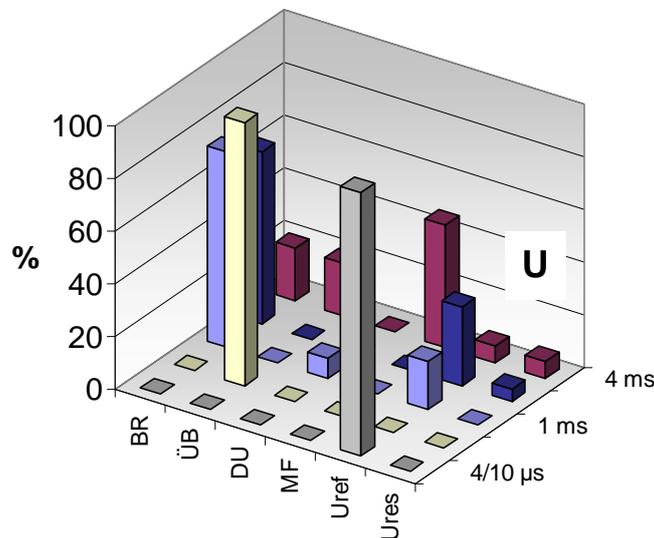


Abbildung 8.14: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform

Für die MO-Widerstände des **Herstellers U** zeichnet sich kein einheitliches Ausfallbild ab (siehe **Abbildung 8.14**). Dominiert bei der $4/10 \mu\text{s}$ -Prüfung noch die Änderung der Referenzspannung als Fehlerkriterium, so ist es bei der $90/200 \mu\text{s}$ -Prüfung der Außenüberschlag, welcher mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu 100 % zum Ausfall führt. Bei den Prüfungen mit Rechteckstoßströmen ist dann der Bruch während der Prüfung als auch der mechanische Schaden während der Ausgangsmessung dominierend.

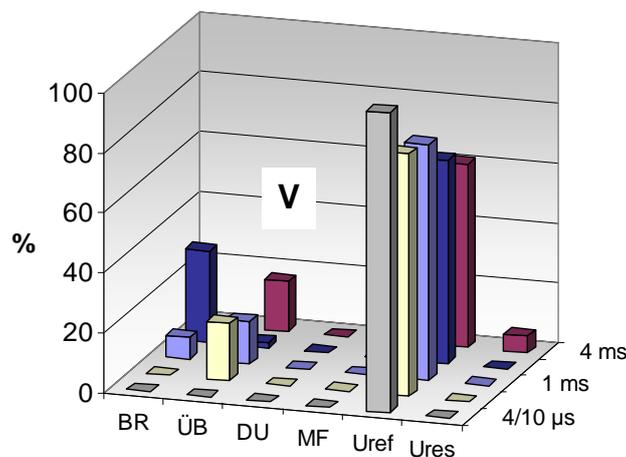


Abbildung 8.15: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers V – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform

Bei den MO-Widerständen des **Herstellers V** ist die Änderung der Referenzspannung das absolut dominierende Fehlerkriterium, während alle anderen Ausfallarten praktisch keine Rolle spielen.

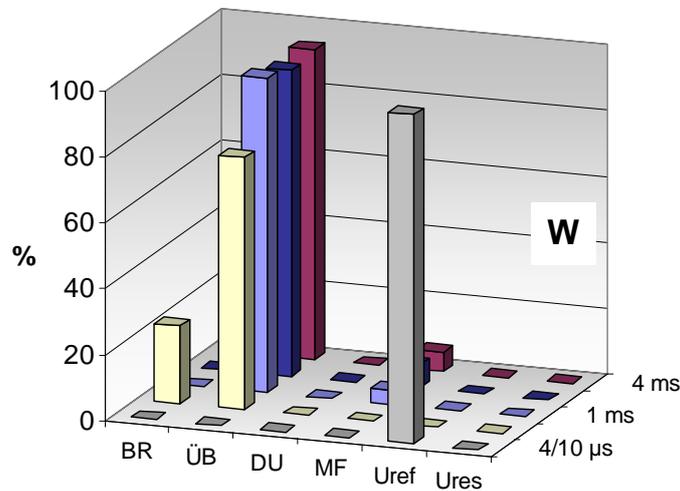


Abbildung 8.16: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers W – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform

Für MO-Widerstände des **Herstellers W** ist ebenfalls die Änderung der Referenzspannung das primäre Ausfallkriterium während der 4/10 µs-Prüfungen. Bei allen anderen Prüfungen dominiert allerdings der Außenüberschlag.

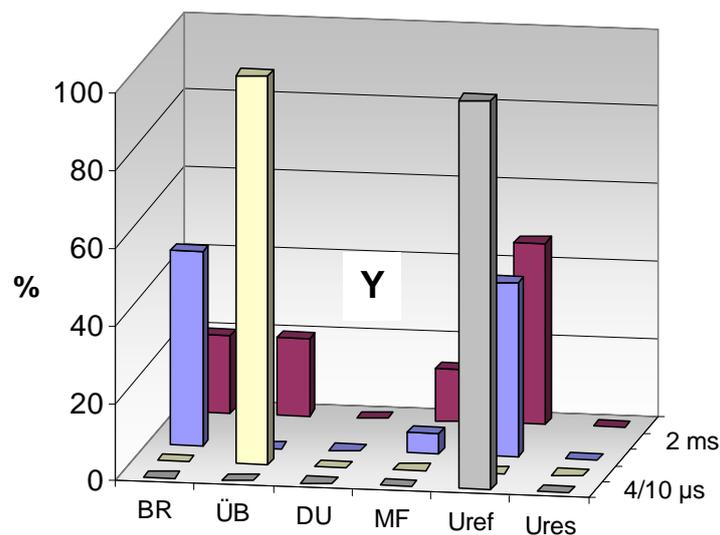


Abbildung 8.17: Prozentuale Ausfälle bei Prüfungen an MO-Widerständen des Herstellers Y – Größe 2 in Abhängigkeit der Impulsform

Bei den MO-Widerständen des **Herstellers Y** tritt als einziger Ausfallmechanismus, wie bei allen anderen Herstellern auch, die Änderung der Referenzspannung während der 4/10 µs-

Prüfungen (siehe **Abbildung 8.17**) auf. Bei den Prüfungen mit 90/200 μs -Impulsen dominiert wie bei Hersteller S, U, W auch der Außenüberschlag als Ausfallursache.

Den vorherigen Diagrammen ist zu entnehmen, dass die Änderung der Referenzspannung bei den MO-Widerständen aller Hersteller das dominierende Ausfallkriterium bei den Hochstoßstromimpulsen der Form 4/10 μs ist. Daher wird in **Abbildung 8.18** der Einfluss der Stromhöhe auf die Änderung der Referenzspannung bei 4/10 μs -Hochstoßstromprüfungen für alle Hersteller vergleichend dargestellt. In diesem Fall ist statt der Stromdichte, wie sie in den meisten der vorherigen Diagramme verwendet wurde, die Stromhöhe als Bezugsparameter gewählt worden, weil ein Hochstoßstromimpuls der Stromhöhe 65 kA oder 100 kA der Standardprüfungspuls zur Prüfung von Mittelspannungsableitern nach [IEC 60099-4] ist. Bei der Arbeitsprüfung von Mittelspannungsableitern werden diese mit zwei Hochstoßströmen von 100 kA beansprucht (siehe Kapitel 3.1). Es lässt sich ein linearer Trend zwischen Stromhöhe und Änderung der Referenzspannung erkennen, der jedoch einer großen Streuung unterworfen ist. Die Steigung variiert hierbei je nach Hersteller ebenfalls sehr stark. Besonders bemerkenswert ist das außergewöhnliche Verhalten der MO-Widerstände V und W, die offensichtlich auf eine minimale Impulsalterung hin optimiert wurden.

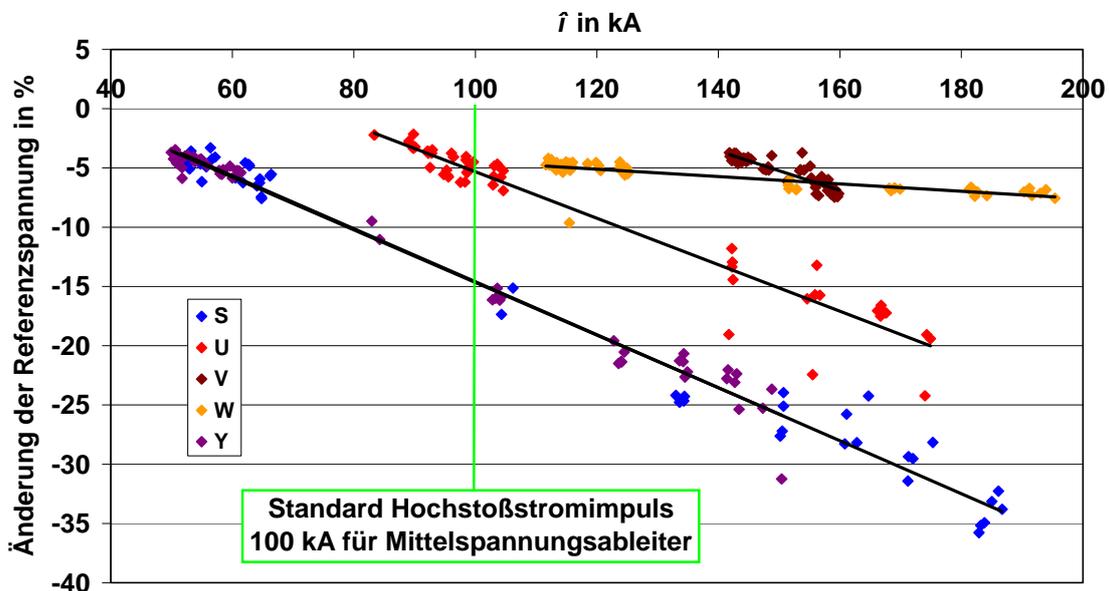


Abbildung 8.18: Änderungen der Referenzspannungen nach Hochstoßstromprüfung 4/10 μs – Größe 2 in Abhängigkeit der Stromhöhe

Aufgrund dieser Ergebnisse ist das Fehlerkriterium erneut zu hinterfragen, denn auch solche MO-Widerstände, die eine Referenzspannungsänderung von mehr als 5 % bei 100 kA aufweisen, werden erfolgreich in Mittelspannungsableitern eingesetzt und bestehen die vorgeschrie-

bene Arbeitsprüfung. Für das Bestehen der Arbeitsprüfung ist die Wahl der Bemessungs- und Dauerspannung entscheidend (siehe auch Kapitel 3.1). Da diese dem Hersteller obliegt, ist damit für den Hersteller die Möglichkeit gegeben, seinen Ableiter für das Bestehen der Arbeitsprüfung zu dimensionieren. Der Preis dafür ist ein höheres Verhältnis von Blitzschutzpegel zu Dauerspannung (U_{pl}/U_c), was ein solches Ableiterdesign weniger wettbewerbsfähig macht. Die Ergebnisse aus Abbildung 8.18 wurden auch intensiv in der Arbeitsgruppe A3.17 mit dem Ergebnis diskutiert, dass das Kriterium auch weiterhin als sinnvoll erachtet wurde. Entscheidend hierfür war, dass alle Spezialisten einheitlich davon ausgingen, dass eine Änderung der Referenzspannung von mehr als 5 % auf eine Veränderung innerhalb des ZnO-Materials hinweist. **Abbildung 8.19** zeigt den Einfluss des Energieeintrags auf die Änderung der Referenzspannung bei 4/10- μ s-Hochstoßstromprüfungen. Es zeigen sich hierbei keine signifikanten Änderungen gegenüber Abbildung 8.18, zumal nicht auszuschließen ist, dass die Änderung der Referenzspannung von der Stromsteilheit des Impulses hervorgerufen wird. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Tatsache hingewiesen, dass eine Erhöhung der Stromamplitude bei gleichzeitig konstanter Kurvenform gleichzeitig eine höhere Stromsteilheit zur Folge hat. Beträgt die Stromsteilheit bei einem 4/10 μ s-Hochstoßstromimpuls mit 100 kA in erster Näherung etwa $S = 100 \text{ kA}/4 \mu\text{s} = 25 \text{ kA}/\mu\text{s}$, so ist sie bei 200 kA schon $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

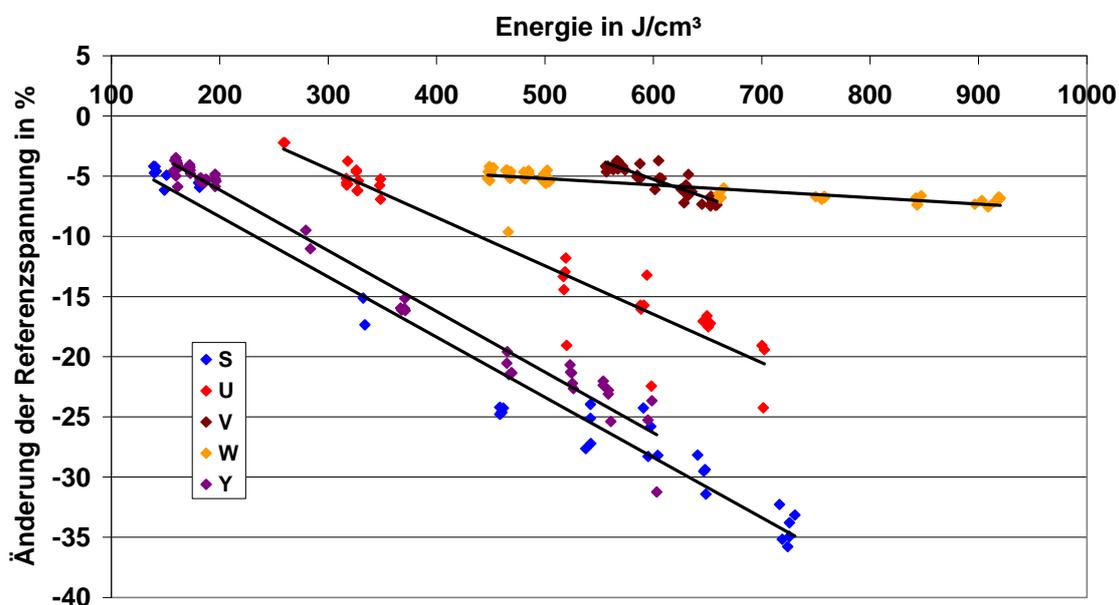


Abbildung 8.19: Änderungen der Referenzspannungen nach Hochstoßstromprüfung 4/10 μ s – Größe 2 in Abhängigkeit der Energie

Eine weitere Frage, die sich im Zusammenhang mit den beobachteten Änderungen der Referenzspannung stellt, ist, inwieweit diese möglicherweise reversibel sind. Eine erneute Mes-

sung von geprüften MO-Widerständen nach einigen Wochen ergab, dass sich keine Veränderung der gemessenen Referenzspannung feststellen ließ. Hieraus kann gefolgert werden, dass bloße Lagerung ohne anliegende Spannung keine Rückbildung der Referenzspannungsänderung bewirkt. Dies ist auch insoweit interessant, als dass damit kein fester Zeitraum zwischen Impulsprüfung und Messung der Referenzspannung definiert werden muss. Im Rahmen einer anderen Untersuchung wurde der Einfluss anliegender Wechselspannung auf die Referenzspannung untersucht. Dabei wurden sowohl die Referenzspannung als auch eine höhere Spannung als die Referenzspannung, welche zu einer leichten Erwärmung des MO-Widerstandes führte, an einen zuvor mit $4/10 \mu\text{s}$ -Hochstoßstromimpuls belasteten MO-Widerstand angelegt. Die Spannung lag an diesen MO-Widerständen für ca. 4 Stunden an. Bei keinem MO-Widerstand ließ sich eine Erholung der Referenzspannung feststellen. Die Diskussion mit Herstellern ergab, dass eventuell mit einer Rückbildung der Referenzspannungsänderung ab $150 \text{ }^\circ\text{C}$ gerechnet werden kann. Dieser Ansatz wurde aber im Rahmen dieses Projektes nicht weiter verfolgt und sollte in der Weiterarbeit untersucht werden.

Da bei den Untersuchungen mit Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ an Mittelspannungs-MO-Widerständen nahezu niemals Strommarken an den Metallisierungen der MO-Widerstände auftraten, ist es auch denkbar, dass die Änderung der Referenzspannung nicht auf eine Schädigung des ZnO-Materials, sondern auf einen Alterungsprozess zurückzuführen ist. Klein (siehe [Klein-04]) entwickelt in seiner Arbeit die Theorie, dass eine solche Änderung auf die Diffusion von Sauerstoffionen zurückgeht. Er vermutet, dass die Wanderung von negative geladenen Sauerstoffionen ins Innere der ZnO-Körner zu einem Absinken der Referenzspannung führt. Ein solcher Erklärungsansatz zum Absinken wird auch von [Deng-98] als mögliche Ursache berichtet. Wie im vorhergehenden Kapitel (Kapitel 8.2) beschrieben, wurde bei anderen Impulsformen ein Zusammenhang zwischen Ausmaß der Schädigung und der Änderung der Referenzspannung beobachtet. Es ist also denkbar, dass die Änderung der Referenzspannung sowohl von Alterungs- als auch von Schädigungsprozessen bestimmt wird. Dies sollte in weiteren Untersuchungen unbedingt verfolgt werden, um das Fehlerkriterium abzusichern.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte auch die Eignung der Verlustleistungsmessung zur Zustandsbewertung von MO-Widerständen untersucht werden. Da diese aber nicht als Fehlerkriterium gewählt worden war und es zu Beginn der Versuchsreihen noch Probleme mit der Zuverlässigkeit der Verlustleistungsmessung gab, kann die Änderung der Verlustleistung für die Impulsstromversuche nicht direkt angegeben werden. Da deshalb keine Daten über die Verlust-

leistungen vor den Versuchen vorlagen, wurden 16 fabrikneue MO-Widerstände auf ihre Verlustleistungen vermessen und die Messungen der Verlustleistungen an den belasteten MO-Widerständen nachher auf den Mittelwert dieser Verlustleistungsmessungen bezogen. Dies war möglich, weil die 16 fabrikneuen MO-Widerstände aus der gleichen Charge wie die belasteten MO-Widerstände stammten und die Verlustleistungsmessungen bei den neuen Widerständen eine geringe Streuung ergab. **Abbildung 8.20** zeigt das Ergebnis des Vergleichs der neuen MO-Widerstände mit den belasteten. Zusätzlich zur Verlustleistung ist auch die Änderung der Referenzspannung (tatsächliche Änderung der mit Impulsstrom geprüften MO-Widerstände) abgetragen. Zur besseren Übersichtlichkeit ist sie allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen abgetragen. Es zeigt sich, dass die Änderung der Verlustleistung in etwa einer quadratischen Abhängigkeit folgt und sie im Maximum 1000 % erreicht, wobei in zwei von drei Fällen eine extreme Änderung der Referenzspannung auch mit einer extremen Änderung der Verlustleistung verknüpft ist. Es lässt sich ferner eine starke Streuung bei der Änderung der Verlustleistung feststellen, ähnlich der Änderung der Referenzspannung.

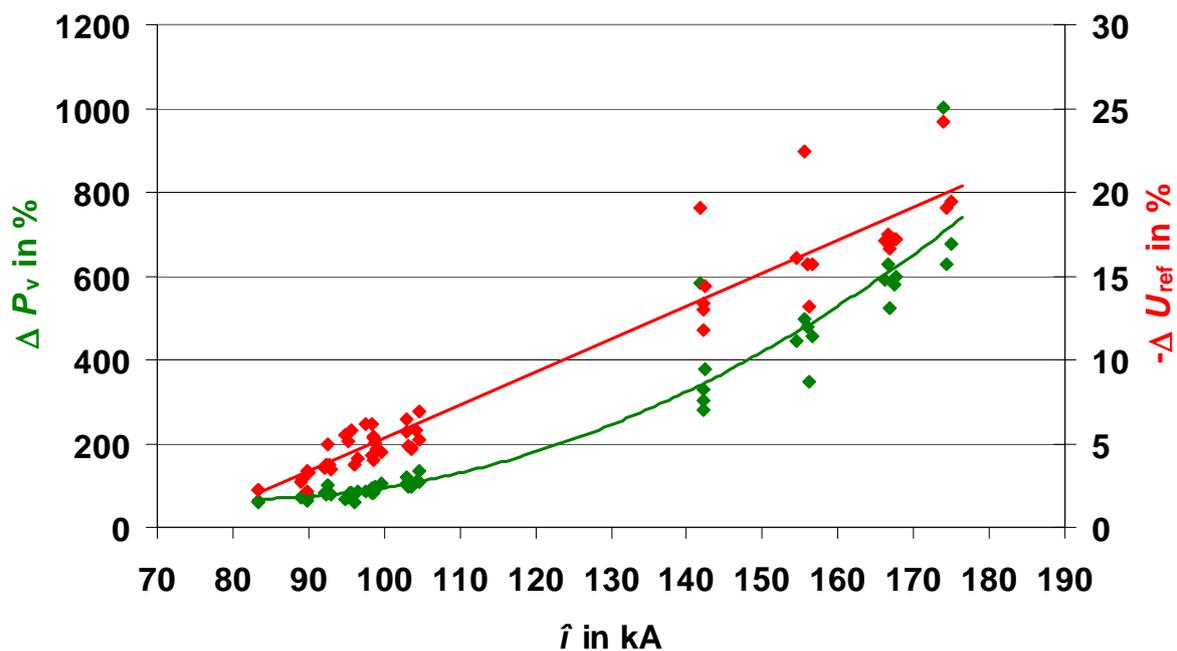


Abbildung 8.20: Änderung der Verlustleistung und der Referenzspannung an MO-Widerständen des Herstellers U – Größe 2 bei Prüfungen mit der Impulsform 4/10 μ s

Die Änderung der Verlustleistung reagiert also erheblich sensibler als die Änderung der Referenzspannung und könnte somit ebenfalls für die Zustandsbewertung von MO-Widerständen in Betracht kommen. Da die Verlustleistungsmessung aber eine große Temperaturabhängigkeit (siehe Kapitel 6.2) und zudem noch eine Zeitabhängigkeit (siehe Kapitel 6.3) aufweist, wird sie nicht zur Anwendung empfohlen.

8.4 Versuchsergebnisse - Übersicht

Nachfolgend werden die Ergebnisse für beide Arten von MO-Widerständen (Größe 1 und 2) in einer Kurzübersicht vergleichend dargestellt (siehe **Abbildung 8.21**). Aus dieser Darstellung kann ein direkter Vergleich der verschiedenen Widerstandsgrößen untereinander vorgenommen werden. Hierbei sind die MO-Widerstände der Größe 1 durch gestrichelte Linien dargestellt. Der Vergleich ergibt kein einheitliches Bild. Während die MO-Widerstände der Größe 1 der Hersteller U und X im Bereich der Rechteckstoßstromprüfungen ein deutlich höheres Energieaufnahmevermögen zeigen, liegen die MO-Widerstände von Hersteller S für 4 und 2 ms unterhalb der Energien der meisten MO-Widerstände der Größe 2 und erreichen erst ab 1 ms ein höheres Energieaufnahmevermögen. Im Bereich der 90/200 μ s Impulse zeigen die MO-Widerstände der Hersteller S und U für Größe 1 deutliche Schwächen in der Glasur, wodurch das Energieaufnahmevermögen signifikant herabgesetzt ist. Lediglich Hersteller X überrascht bei diesen Versuchen durch ein extrem hohes Energieaufnahmevermögen. Die MO-Widerstände der Größe 2 zeigen fast alle ein Ansteigen des Energieaufnahmevermögens bei Prüfungen mit 90/200- μ s-Impulsen.

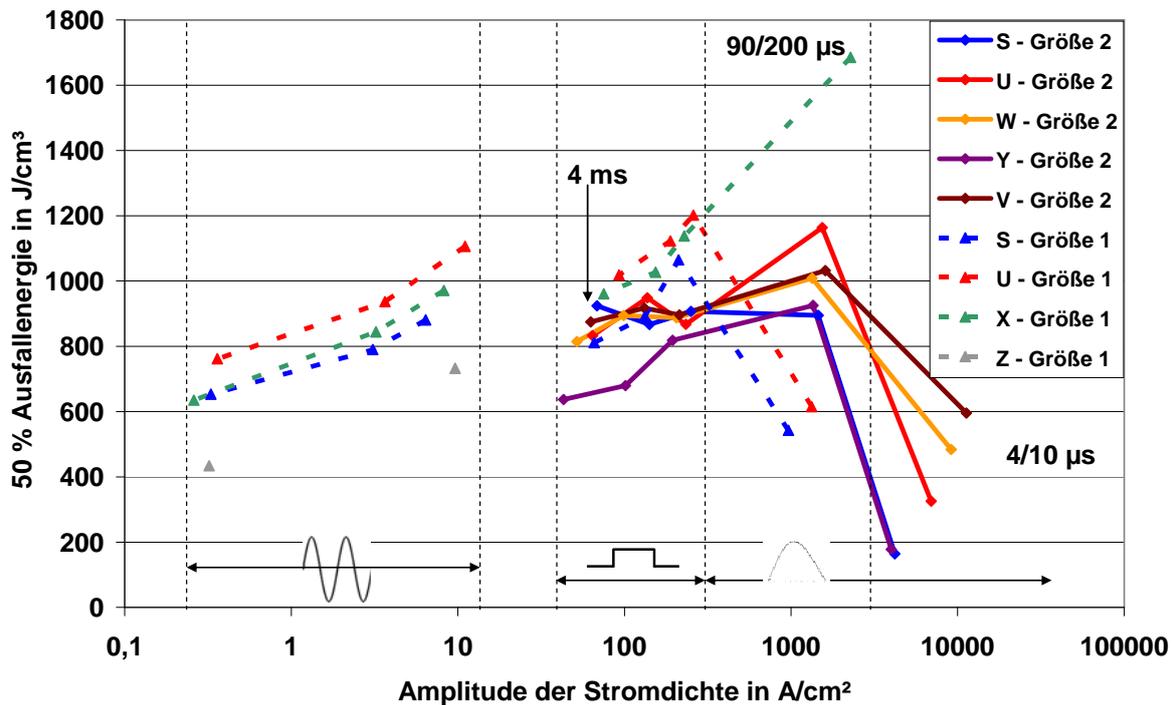


Abbildung 8.21: Vergleichende Darstellung der mittleren Ausfallenergien für Größe 1 und 2. Im direkten Vergleich beider Größen miteinander wäre eigentlich ein größeres Energieaufnahmevermögen der kleineren MO-Widerstände (Größe 2) zu erwarten, da man bedingt durch den einfacheren Fertigungsprozess bei kleineren MO-Widerständen allgemein von einer größeren Homogenität innerhalb des Materials ausgeht. Dies lässt sich aber durch die Daten aus

Abbildung 8.21 nicht bestätigen. Betrachtet man den Bereich der Rechteckstoßströme, so zeigt sich für die MO-Widerstände von Hersteller U, dass die größeren MO-Widerstände (Größe 1) auch ein größeres Energieaufnahmevermögen haben. Es scheint so, als ob der alte Grundsatz: je größer der Durchmesser, desto höher der Anteil der Inhomogenitäten und damit desto geringer das Energieaufnahmevermögen - für die verglichenen MO-Widerstände in dieser Form nicht mehr haltbar ist. Ursächlich für diese erstaunliche Erkenntnis könnte sein, dass die Verfahren zur Herstellung bei den früher kritischeren Hochspannungs-MO-Widerständen besonders vorangetrieben wurde und deshalb dort heute eine bessere Fertigungstechnik als bei Mittelspannungs-MO-Widerständen vorliegt. Dies ist zumindest für MO-Widerstände bis zu einem Durchmesser von 60 mm der Fall. Bei größeren Durchmessern zeigen sich dagegen andere Tendenzen, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

8.5 Abhängigkeit des Wechselstromenergieaufnahmevermögens vom Durchmesser

Im Rahmen einer parallel zu dem Cigré-Projekt durchgeführten Untersuchung wurde eine große Menge von MO-Widerständen ausschließlich auf ihr Energieaufnahmevermögen bei Wechselstrom hin geprüft. Hierfür kamen MO-Widerstände eines Herstellers mit Durchmessern von ca. 60...100 mm zur Prüfung. Für jede Stromhöhe und jeden Durchmesser wurden ca. 50 MO-Widerstände geprüft. Die in **Abbildung 8.22** dargestellten Punkte ergeben sich aus der Auswertung dieser Messdaten. Die 50%-Ausfallenergie wurde aus den Versuchsdaten unter Annahme einer Normalverteilung ermittelt (siehe auch Kapitel 7.2.2).

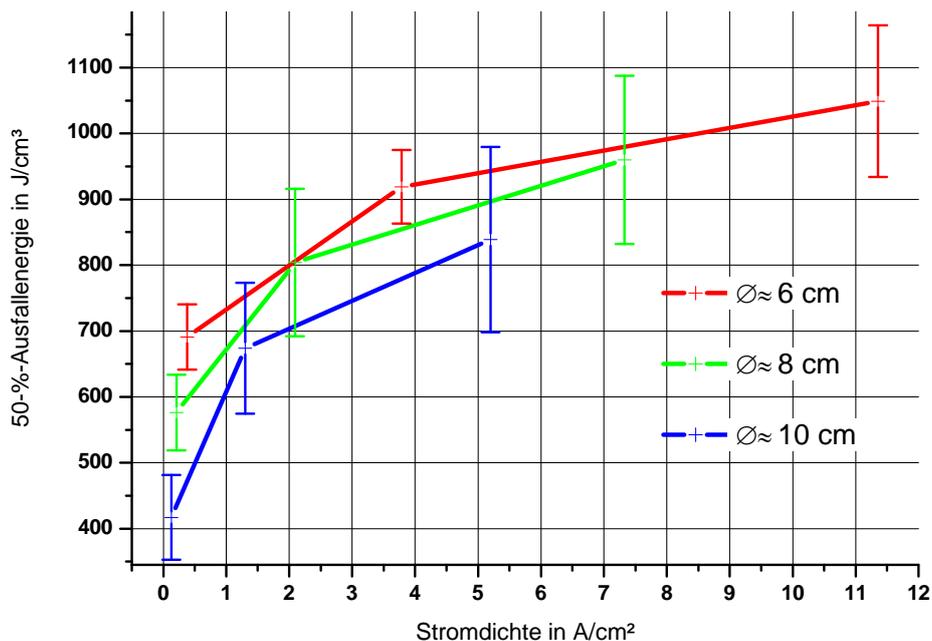


Abbildung 8.22: Vergleich des Wechselstromenergieaufnahmevermögens für MO-Widerstände eines Herstellers bei unterschiedlichen Durchmessern

Es lässt sich deutlich der Einfluss des Durchmessers auf das Energieaufnahmevermögen erkennen (alle MO-Widerstände hatten etwa die gleiche Höhe von ca. 45 mm). Mit steigendem Durchmesser, daher steigendem Volumen, nimmt das Energieaufnahmevermögen deutlich ab. Dieser Effekt ist mit dem Ansteigen von Inhomogenitäten mit zunehmenden Volumen zu erklären. Während des Produktionsprozesses werden die Bestandteile des ZnO-Materials vermischt, gepresst und anschließend gesintert. Mit steigendem Volumen wird es schwieriger, die Homogenität der Mischung, eine homogene Verpressung und die Temperaturverteilung im Material während des Sinterns zu gewährleisten. Daher werden derzeit MO-Widerstände nur bis zu einem maximalen Durchmesser von ca. 105 mm bei Höhen von maximal 45 mm gefertigt.

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Die Daten der Versuche finden sich im Anhang A und B. Im direkten Vergleich der beiden Größen (1 und 2) konnte keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob eine Größe ein höheres Energieaufnahmevermögen aufweist als die andere. Tendenziell wiesen die MO-Widerstände der Größe 1 ein etwas höheres Energieaufnahmevermögen auf. Die höchste Energieaufnahme aller Untersuchungen entfiel mit 1700 J/cm^3 auf die Prüfungen der MO-Widerstände des Herstellers X mit 90/200 μs -Impulsen. Bei der gleichen Impulsform zeigten die MO-Widerstände der Hersteller S und U einen deutlichen Einbruch im Energieaufnahmevermögen, der auf das Versagen der Glasur zurückgeht.

Für die Untersuchungen mit Wechselstrombelastungen ergibt sich eine klare Tendenz, dass mit kürzeren Versuchszeiten und damit mit höheren Stromamplituden das Energieaufnahmevermögen ansteigt. Es zeigt sich auch anhand der Untersuchung von MO-Widerständen eines Herstellers mit gleichen Höhen aber unterschiedlichen Durchmessern ein Absinken des Energieaufnahmevermögens bei zunehmenden Durchmessern. Bei den Versuchen mit Wechselstrombelastungen ergab sich auch, dass einzelne MO-Widerstände ein deutlich niedrigeres Energieaufnahmevermögen haben als andere. Hier bietet sich eine Weiterarbeit an, um die Ursache herauszufinden und ein Stückprüfverfahren, das die Erkennung solcher „Ausreißer“ ermöglicht, zu entwickeln. Die Bewertung der Änderung der Referenzspannung hat sich als gutes und aufgrund ihres unkritischen Verhaltens (keine Zeitabhängigkeit sowie geringe Temperaturabhängigkeit) als leicht zu handhabendes Fehlerkriterium erwiesen. Während die Änderungen der Referenzspannungen nach den Langwellenimpulsen auf eine Schädigung zurückzuführen sein dürften, könnte die Änderung nach Hochstoßstromimpulsen der Form

4/10 μ s auf einen Alterungseffekt zurückzuführen sein. Dahingehend sind weitere Untersuchungen nötig, um diese Fragestellung endgültig abzuklären

Ein deutliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass nahezu niemals eine Änderung der Restspannung nach den Versuchen beobachtet wurde. Daher wird empfohlen, dieses Bewertungskriterium aus den Normen zu streichen. Stattdessen ist die Messung der Referenzspannung nach weiterer Abklärung als Kriterium einzuführen. Des Weiteren erscheint die Beibehaltung der Hochstoßstrombelastung (4/10 μ s) von Überspannungsableitern im Rahmen einer Arbeitsprüfung sinnvoll, da hierdurch der Ableiter gealtert und damit schon in dieser Prüfung ein eventueller Alterungseffekt des späteren Betriebes vorweggenommen wird. Hierdurch wird eine Überprüfung der Auslegung und damit ein sicherer Betrieb des Überspannungsableiters im späteren Einsatz gewährleistet. Da sich durch die Ergebnisse der Untersuchungen herausstellte, dass das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen (zumindest für die 50%-Ausfallenergie) ein Vielfaches des für die derzeitige Auslegung von Ableitern verwendeten Energieaufnahmevermögens ist, kann keine Empfehlung für die Art des Energieeintrages für die Normprüfung gegeben werden. Eine weitere Verwendung von Rechteckstoßströmen, wie sie zum Beispiel für die Arbeitsprüfung angewendet werden, erscheint zumindest aus Sicht dieser Untersuchungen weiterhin sinnvoll. Da ein Ergebnis der Untersuchungen die Erkenntnis ist, dass mit längeren Impulsdauern ein niedrigeres Energieaufnahmevermögen zu erwarten ist, kann für Prüfungen, die sich mit der Grenzenergie von MO-Widerständen beschäftigen, die Empfehlung gegeben werden, diese auch mit den längsten zur Verfügung stehenden Impulsen zu prüfen.

Die neu in die Norm [IEC 60099-4] aufgenommenen Blitzstoßströme der Form 90/200 μ s sind aus Sicht dieser Untersuchung als sinnvoll zu bewerten, da sie die Belastungen, denen Leitungsableiter ausgesetzt sind, nachbilden und MO-Widerstände im Bereich dieser Belastung derzeit teilweise ein herabgesetztes Energieaufnahmevermögen aufweisen.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden mehr als 3200 MO-Widerstände von sieben führenden Herstellern aus Amerika, Europa und Japan auf ihr **Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen** hin untersucht. Es wurden dazu zwei Arten von MO-Widerständen verwendet:

- Größe 1 – Hochspannungs-MO-Widerstände Durchmesser 55...65 mm,
- Größe 2 – Mittelspannungs-MO-Widerstände Durchmesser 35...45 mm.

Es wurden zwei Arten von Prüfungen an diesen MO-Widerständen durchgeführt: Prüfungen mit Impulsstoßströmen (Rechteckstoßströmen (1, 2, 4 ms), Hochstoßstrom 4/10 μ s, Blitzstoßstrom 90/200 μ s), sowie Prüfungen mit Wechselstrombelastungen. Dies ist die erste Untersuchung, in der Blitzstoßströme der Form 90/200 μ s, wie sie seit neuestem in der Norm [IEC 60099-4] für Anwendungen mit erhöhten Blitzströmen enthalten sind, Verwendung fanden.

Die Bewertung der mit Impulsstrom geprüften MO-Widerstände erfolgte mit Hilfe eines komplexen Fehlerkriteriums, in das sowohl mechanische Kriterien (Bruch, Durchschlag, Überschlag), als auch die Änderung der elektrischen Kenndaten (Änderung der Referenz- und Restspannung) einfließen. Die Anwendung eines solchen komplexen Fehlerkriteriums ist bisher einmalig. Alle früheren Untersuchungen wurden immer bis zum Totausfall, also bis zum mechanischen Versagen durchgeführt. Es handelt sich um die erste Untersuchung, die solch eine differenzierte Herangehensweise verwendet. Um die Bedingungen bei allen Versuchen gleichzuhalten, wurde ein standardisierter Versuchsablauf eingeführt und eine spezielle Prüflingsaufnahme entwickelt. Um Einflüsse von alternden Elektroden auf die Versuchsergebnisse auszuschließen, wurden für jeden Versuch zwei neue Elektroden verwendet.

Die Bewertung der Änderung der Referenzspannung hat sich als Kriterium bewährt und bietet sich für die Bewertung des Zustandes von MO-Widerständen an. Ein Vorteil der Messung der Referenzspannung ist die geringe Temperaturabhängigkeit und die nicht vorhandene Zeitabhängigkeit. Es konnte gezeigt werden, dass die Messung der Verlustleistung zwar wesentlich sensibler als die Änderung der Referenzspannung reagiert, aber aufgrund ihrer stärkeren Temperaturabhängigkeit, ihrer Zeitabhängigkeit und der komplizierteren Messung wird sie nicht zur Verwendung empfohlen. Um die Änderung der Referenzspannung z.B. für Zustandsbewertungen für Normprüfungen zu verwenden, sind allerdings noch weitere Untersuchungen nötig. Eine Bewertung der Änderung der Restspannung, wie sie in der Norm [IEC 60099-4] zur Bewertung des Zustandes z.B. nach der Arbeitsprüfung (siehe Kapitel 3.1) vorgeschrieben ist, erscheint dagegen unnötig. Ursprünglich dürfte diese Vorschrift aus der Zeit

der SiC-Ableiter stammen und eine Bewertung des Zustandes der Funkenstrecke ermöglicht haben. Da moderne MO-Ableiter aber funkenstreckenlos ausgeführt sind, ist dieses Kriterium überholt.

Die statistische Auswertung der Versuchsdaten erfolgt mit einem speziell für Hochspannungsanwendungen entwickelten Softwarepaket der Firma Highvolt Software stützt sich dabei auf die statistischen Verfahren MLM (**M**ultiple **L**evel **M**ethod) und PSM (**P**rogressive **S**tress **M**ethod). Die Versuchsdaten wurden alle unter der Annahme einer Normalverteilung ausgewertet und die Verteilungsparameter von der Software unter Anwendung der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt.

Ziel der Arbeit war es, die 50%-Ausfallenergie der MO-Widerstände zu bestimmen, um daraus den Stand der Technik abzuleiten und Vergleiche mit früheren Untersuchungen zu ermöglichen. Es zeigt sich ebenfalls eine starke Abhängigkeit des Energieaufnahmevermögens von der Art der Belastung. Im Bereich der Rechteckstoßströme liegt es in der Region von ca. 1000 J/cm^3 . Mit kürzeren Impulsen steigt es weiter an, solange sich nicht ein Versagen der Glasur einstellt. Für die MO-Widerstände zweier Hersteller war ein signifikantes Absinken des Energieaufnahmevermögens bei Blitzstoßströmen der Form $90/200 \mu\text{s}$ infolge des Versagens der Glasur zu verzeichnen. Die MO-Widerstände eines anderen Herstellers dagegen erreichten bei diesen Impulsen das höchste in dieser Untersuchung überhaupt gemessene Energieaufnahmevermögen mit Werten um 1700 J/cm^3 . Für die kürzesten hier geprüften Impulse, die Hochstoßstromimpulse der Form $4/10 \mu\text{s}$, ist unabhängig vom Hersteller ein Abfall des Energieaufnahmevermögens infolge einer starken Änderung der Referenzspannung zu verzeichnen.

Die Ergebnisse der Prüfungen zeigen, dass das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen weit aus höher liegt, als die derzeit von Ableiterherstellern hinsichtlich der thermischen Stabilität verwendeten Auslegungsenergien. Die Untersuchungen lassen allerdings die Frage offen, welches Energieaufnahmevermögen die geprüften MO-Widerstände nach ihrer Prüfung noch aufweisen, also auch die Frage, welchen Impulsen sie noch standhalten könnten.

Für die Versuche mit Impulsströmen gibt es keine klare Erkenntnis darüber, ob die MO-Widerstände der Größe 1 oder 2 ein höheres Energieaufnahmevermögen aufweisen. Hieraus kann eine hohe Fertigungsqualität für die MO-Widerstände der Größe 1 abgeleitet werden, da mit größerem Durchmesser gemeinhin mit einem Ansteigen der Inhomogenitäten und damit mit einem Abfall in der Fähigkeit zur Energieaufnahme gerechnet wird.

Einige Prüferien befassten sich mit dem Wechselstromenergieaufnahmevermögen bei verschiedenen Stromhöhen (10, 100, 200-300 A). Diese Prüfungen wurden jeweils bis zum me-

chanischen Ausfall durchgeführt. Für die Belastung mit Wechselströmen lassen sich zwei Trends feststellen. Zum einen steigt das Energieaufnahmevermögen mit zunehmender Stromhöhe, also abnehmender Belastungsdauer, an. Zum anderen fällt das Energieaufnahmevermögen unabhängig von der Stromhöhe mit zunehmendem Durchmesser der MO-Widerstände wieder ab. Gegenüber der vergleichbaren Untersuchung von Ringler (siehe Kapitel 3.2) aus dem Jahre 1997 kann ein Anstieg von 30...50 % im Energieaufnahmevermögen der MO-Widerstände verzeichnet werden. Dies spricht für eine deutliche Weiterentwicklung im Material- und Fertigungsbereich in den letzten 10 Jahren. Ein weiteres Indiz für die Weiterentwicklung der Fertigungstechniken liegt in dem Anstieg der Bauhöhen von damals etwa 25 auf heute ca. 45 mm.

Eine mögliche Vereinfachung der bestehenden Normprüfungen durch Verwendung einer Wechselstromprüfung anstelle der derzeit angewandeten Rechteckstoßströme zur Energieinjektion, scheint möglich. Es ist dazu allerdings nötig, eine bestimmte Stromhöhe bzw. Versuchsdauer zu spezifizieren, da das Wechselstromenergieaufnahmevermögen sehr deutlich von diesen Parametern abhängt. Ebenfalls ist es nötig, den Zusammenhang zwischen den Ausfallwahrscheinlichkeiten bei Rechteckstoßstromprüfungen und Wechselstromprüfungen näher zu untersuchen, bevor die Fragestellung endgültig geklärt werden kann.

Grob kann für das ZnO-Material folgende Feststellung getroffen werden:

Je kürzer die Belastungsdauer, desto höher ist das Energieaufnahmevermögen.

Leider lässt sich diese Erkenntnis nicht auf die MO-Widerstände direkt übertragen, da sich hier zusätzliche Fehlermechanismen z.B. in der Glasur bemerkbar machen. Auch gilt diese Regel nur für die mechanischen Ausfallkriterien ohne Berücksichtigung der Änderung der elektrischen Kenndaten.

10 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Daten stellen eine gute Grundlage für eine Bewertung des Einzelimpulsaufnahmevermögens dar. Allerdings sind noch einige Fragestellungen offengeblieben, die aus zeitlichen Gründen nicht mehr untersucht werden konnten.

Eine Frage, die sich in Verbindung mit der Änderung der Referenzspannung stellt, ist, inwieweit und unter welchen Bedingungen diese reversibel ist. So ist es denkbar, dass eine Änderung der Referenzspannung und der damit einhergehende Anstieg der Verlustleistung zu einer Erwärmung des Ableiters führt und damit die Änderung der Referenzspannung wieder rückgängig gemacht wird. Bleibt der Ableiter dabei thermisch stabil, steht einem ungestörten Betrieb im Netz trotz aufgetretener Referenzspannungsänderung nichts im Wege. Interessant sind auch die besonders starken Änderungen der Referenzspannung, die bei Hochstoßstromimpulsen der Form $4/10 \mu\text{s}$ beobachtet wurden. Eventuell ist dieser Abfall der Referenzspannung bei Impulsen dieser Art keinem direkten Schädigungs-, sondern einem reversiblen Alterungsprozess geschuldet. Diese Untersuchungen zum Verhalten der Referenzspannungsänderung sind auch insoweit wichtig, als dass sie möglicherweise eine Auswirkung auf das gewählte Fehlerkriterium haben könnten.

Eine Fragestellung, die insbesondere für die Arbeit von Normungsgremien von Interesse ist, stellt die Korrelation von Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen recht genau untersucht. Ungeklärt ist aber weiterhin die Frage, wie vielen Impulsen ein MO-Widerstand bei Mehrfachbelastung standhält. Kritisch ist hierbei auch die in der Norm für Typprüfungen geforderte Rechteckstoßstromprüfung zu hinterfragen. Dabei wird ein Ableiter mit 18 Rechteckstoßströmen beaufschlagt und danach auf Schäden untersucht. Aus einer solch geringen Anzahl von Impulsen kann sicher keine hohe Zuverlässigkeit eines Ableiters im Betrieb abgeleitet werden. Im Hinblick auf die Untersuchungen mit Mehrfachimpulsbelastungen stellt sich ferner die Frage, ob ein Unterschied im Energieaufnahmevermögen zwischen einem oder mehreren kurz aufeinanderfolgenden Impulsen mit gleichem Energiegehalt besteht. Die Fragestellung ist dahingehend von besonderem Interesse, als dass Kettenleiter (Langwellengenerator) zur Erzeugung von Rechteckstoßströmen in herkömmlichen Laboratorien nur für eine bestimmte Energie und Zeitdauer ausgelegt sind. Die Prüfung von Überspannungsableitern für neue UHV-Systeme wird einen großen Energieeintrag zur Prüfung erfordern. Die Frage ist, inwiefern es einen Unterschied macht, ob man solche MO-Widerstände mit einem Impuls prüft oder ob es ausreicht, die derzeitigen Kettenleiter zu verwenden und die Energie mit

mehreren Impulsen (z.B. 3 Impulse mit einer Zeitdauer von 1 Minute zwischen den Impulsen) einzubringen.

Eine besonders für Hersteller von Serienkompensationsableitern interessante Frage ist die weitere Untersuchung der Ausreißer während der Wechselstromversuche. In der Diskussion mit Herstellern ergab sich, dass auch bei kommerziellen Anlagen nach ersten Beanspruchungen Ausfälle zu verzeichnen sind. Hierzu wäre insbesondere weitere Forschung zur Ursache und zu Detektionsverfahren solcher MO-Widerstände während der Stückprüfung interessant. Als problematisch erweist sich allerdings die geringe Anzahl von Ausreißern innerhalb einer Charge, da nur mit einem Ausreißer auf 100-200 MO-Widerständen zu rechnen ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das komplexe Fehlerkriterium nicht auf die Versuche mit Wechselstrombelastungen angewandt. In der Weiterarbeit sollten auch Versuche mit Wechselstrombelastung unter Berücksichtigung des komplexen Fehlerkriteriums durchgeführt werden, um daraus einen Vergleich zwischen Prüfungen bis zum Totalausfall und Prüfungen unter Berücksichtigung des komplexen Fehlerkriteriums abzuleiten.

Eine aus wissenschaftlicher Sicht interessante Weiterarbeit bietet sich schließlich mit der Untersuchung der Ausbreitung von Druckwellen in MO-Widerständen an. Hier könnte durch die Simulation der realen Abläufe innerhalb eines Ableiters eine praktische Weiterentwicklung von Überspannungsableiterkonstruktionen ermöglicht werden.

11 Anhang A – Größe 1 (Hochspannungs-MO-Widerstände)

Tabelle 15: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller S, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

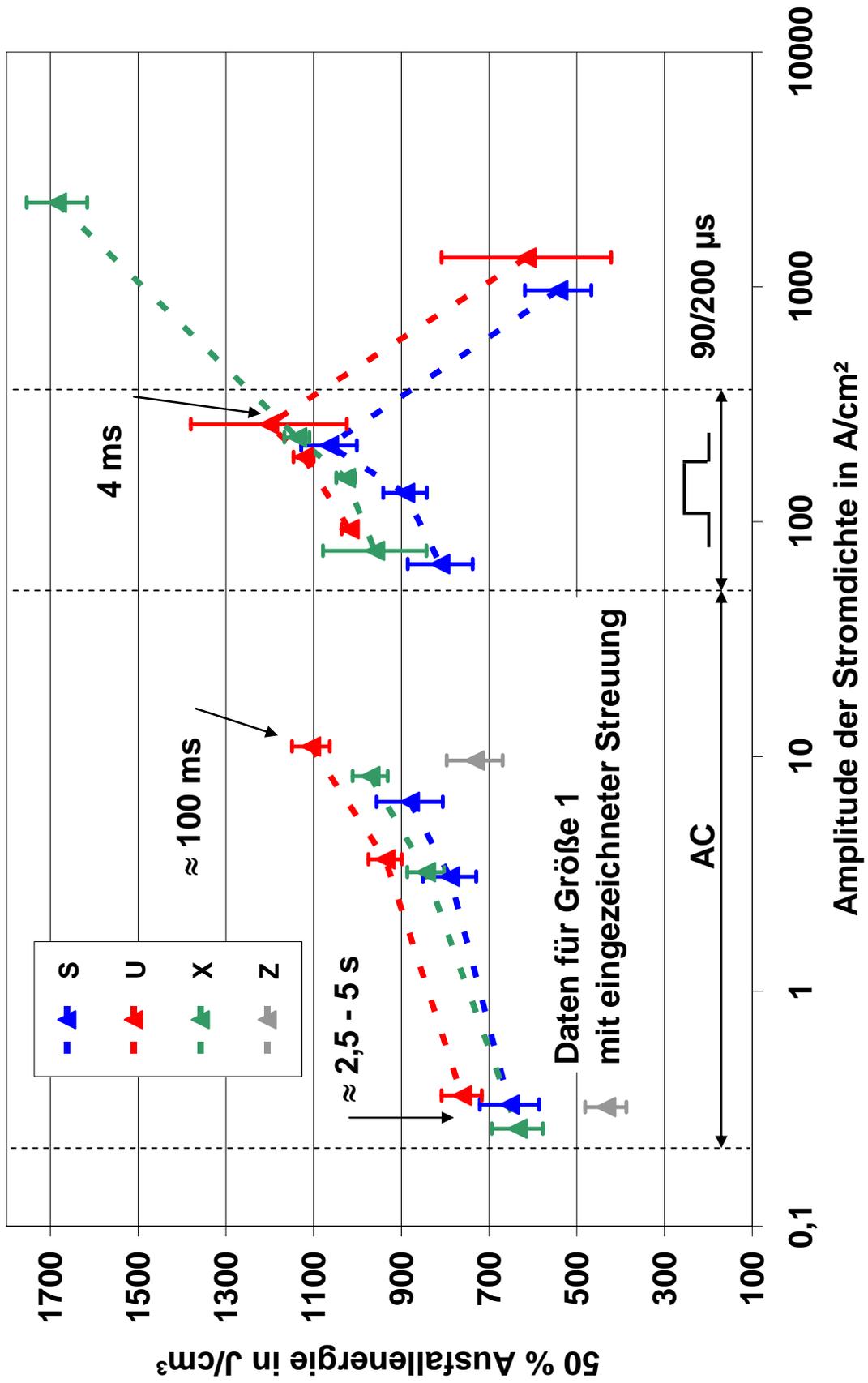
	Hersteller S – Größe 1						
Prüfung	90/200 μs	1 ms	2 ms	4 ms	300 A	100 A	10 A
50 % Ausfallenergie	542,61	1064,96	891,66	811,44	881,01	772,62	648,62
Standardabweichung	75,54	63,57	49,66	73,90	75,32	127,58	74,09
1 % Quantil Punktschätzung	366,89	917,07	776,13	639,53	705,73	475,83	476,27
untere Grenze	-276,83	439,15	572,78	-295,98	654,99	389,81	428,23
obere Grenze	458,86	987,90	830,23	775,82	742,84	538,60	511,69

Tabelle 16: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller U, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

	Hersteller U - Größe 1						
Prüfung	90/200 μs	1 ms	2 ms	4 ms	300 A	100 A	10 A
50 % Ausfallenergie	614,90	1202,03	1122,99	1018,50	1106,16	936,98	750,61
Standardabweichung	193,26	178,13	22,81	17,26	42,95	38,16	73,12
1 % Quantil Punktschätzung	165,31	787,64	1069,92	978,34	1006,24	848,21	580,50
untere Grenze	-2164,36	248,59	1006,31	935,81	979,06	824,07	533,09
obere Grenze	412,44	939,08	1090,88	995,45	1026,41	866,13	615,46

Tabelle 17: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller X, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

	Hersteller X – Größe 1						
Prüfung	90/200 μs	1 ms	2 ms	4 ms	300 A	100 A	10 A
50 % Ausfallenergie	1685,40	1137,98	1027,11	960,54	971,13	844,46	635,39
Standardabweichung	68,84	28,46	21,24	118,11	39,83	41,97	58,40
1 % Quantil Punktschätzung	1525,24	1071,78	977,70	685,77	878,46	746,82	499,54
untere Grenze	976,28	933,12	913,22	-688,09	853,55	720,57	462,14
obere Grenze	1608,90	1102,40	998,87	842,51	897,00	766,35	527,20



12 Anhang B – Größe 2 (Mittelspannungs-MO-Widerstände)

Tabelle 18: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller S, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

Hersteller	S – Größe 2				
Impulsform	4/10 µs	90/200 µs	1 ms	2 ms	4 ms
50 % Ausfallenergie	163,97	894,72	907,15	867,02	924,16
Standardabweichung	16,21	99,15	111,67	99,21	155,48
1 % Quantil Punktschätzung	126,27	664,07	647,38		562,46
untere Grenze	92,69	291,49	-766,31		-1044,87
obere Grenze	144,06	757,20	828,17		729,31

Tabelle 19: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller S, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

Hersteller	U – Größe 2				
Impulsform	4/10 µs	90/200 µs	1 ms	2 ms	4 ms
50 % Ausfallenergie	325,49	1163,58	867,31	948,22	832,82
Standardabweichung	28,40	216,06	44,51	52,37	59,00
1 % Quantil Punktschätzung	259,42	660,96	763,77	826,38	695,55
untere Grenze	147,18	51,19	609,35	468,43	538,55
obere Grenze	289,21	860,00	814,87	883,13	746,05

Tabelle 20: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller V, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

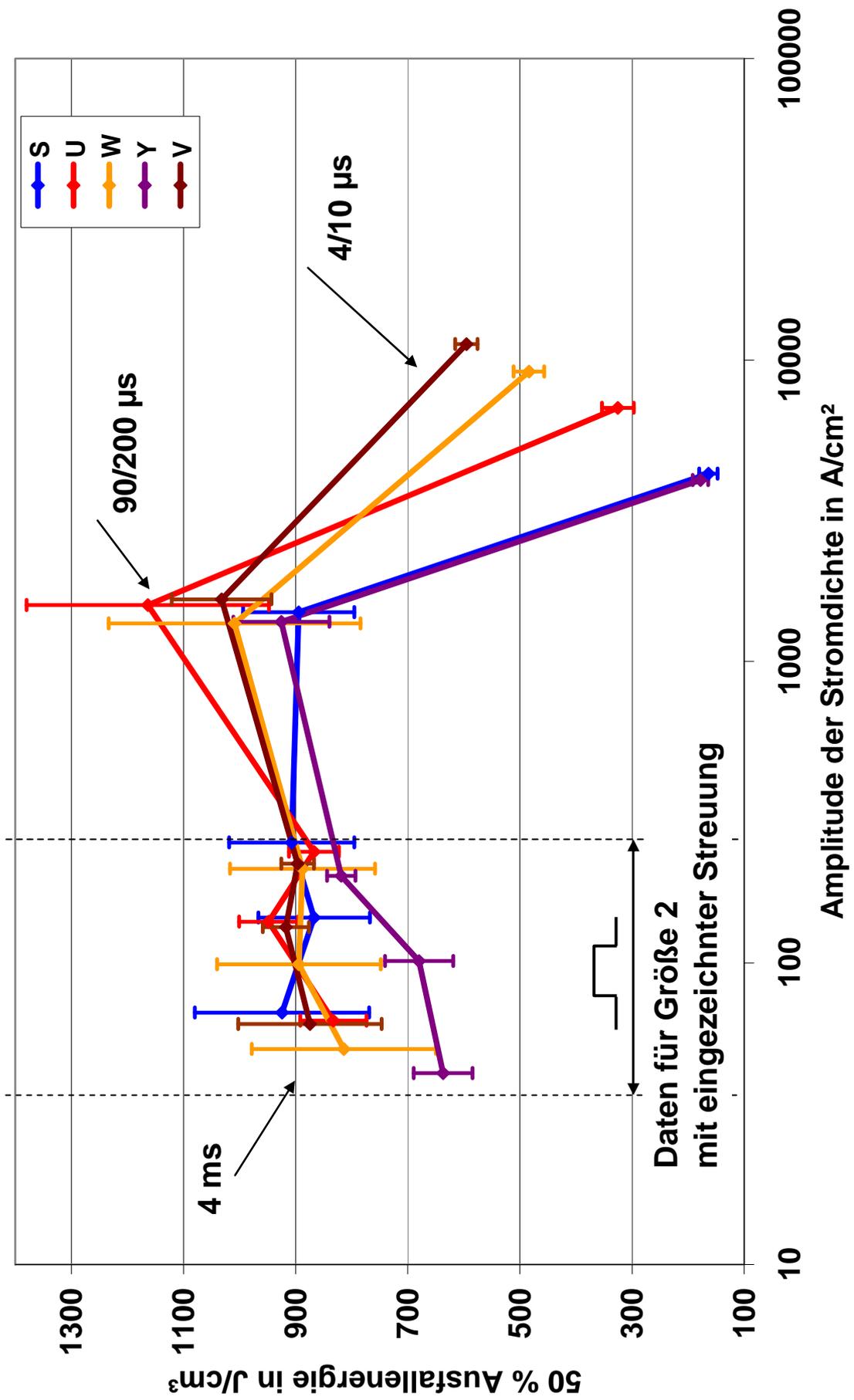
Hersteller	V – Größe 2				
Impulsform	4/10 µs	90/200 µs	1 ms	2 ms	4 ms
50 % Ausfallenergie	595,61	1031,98	896,29	917,37	874,50
Standardabweichung	19,99	88,99	29,19	41,11	127,73
1 % Quantil Punktschätzung	549,10	824,95	828,38	821,73	577,35
untere Grenze	519,61	573,44	707,51	751,97	-6,73
obere Grenze	566,97	918,96	858,20	861,34	720,75

Tabelle 21: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller W, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

Hersteller	W – Größe 2				
Impulsform	4/10 µs	90/200 µs	1 ms	2 ms	4 ms
50 % Ausfallenergie	483,99	1009,07	887,78	894,34	814,18
Standardabweichung	27,11	224,55	129,33	146,04	164,32
1 % Quantil Punktschätzung	420,93	486,69	586,91	554,60	431,92
untere Grenze	308,47	-275,16	138,19	195,45	-138,83
obere Grenze	446,48	664,46	717,96	676,45	608,48

Tabelle 22: Ergebnisse der Prüfung für Hersteller Y, die untere und obere Grenze stellen das 95 % Konfidenzintervall zur Punktschätzung dar

Hersteller	Y – Größe 2				
Impulsform	4/10 µs	90/200 µs	1 ms	2 ms	4 ms
50 % Ausfallenergie	178,21	925,53	818,67	679,81	637,20
Standardabweichung	13,78	85,66	25,52	60,79	52,36
1 % Quantil Punktschätzung	146,14	726,25	759,29	538,39	515,40
untere Grenze	123,99	270,79	641,22	319,18	269,63
obere Grenze	162,16	826,28	790,38	609,98	573,25



Literaturverzeichnis

- [Balz-07] Balzer, *Energieversorgung II*, Vorlesungsskript, TU-Darmstadt, 2007
- [Barr-94] Barrett, Green, *A statistical method for evaluating electrical failures*, IEEE Transactions on power delivery, Volume 9, Number 3, Page 1524-1530, 1994
- [Bart-96] Bartkowiak, Comber, Mahan, *Energy handling capability of ZnO varistors*, Journal of applied Physics, Volume 79, Page 8629-8633
- [Bart-96a] Bartkowiak, Mahan, Modine, Alim, *Influence of ohmic grain boundaries in ZnO varistors*, Journal of applied Physics, Volume 79, Number 1, Page 273-281, 1996
- [Bart-96b] Bartkowiak, Mahan, Modine, Alim, Lauf, McMillan, *Voronoi network model of ZnO varistors with different types of grain boundaries*, Journal of applied Physics, Volume 80, Number 11, Page 6516-6522, 1996
- [Bart-99] Bartkowiak, Comber, Mahan, *Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors*, IEEE Transactions on power delivery, Volume 14, Number 1, Page 152-162, 1999
- [Bogg-00] Boggs, Kuang, Andoh, Nishiwaki, *Increased energy absorption in ZnO arrester elements through control of electrode edge margin*, IEEE Transactions on power delivery, Volume 15, Number 2, Page 562-568, 2000
- [Brow-69] Brown, *Determination of critical flashover voltage and standard deviation from flashover probability data*, IEEE Transactions of power apparatus and systems, Volume PAS-88, Number 3, Page 189-194, 1969
- [Brow-69a] Brown, *Method of maximum likelihood applied to the analysis of flashover data*, IEEE Transactions of power apparatus and systems, Volume PAS-88, Number 12, Page 1823-1830, 1969
- [Carr-90] Carrara, Hauschild, *Statistical evaluation of dielectric test results*, Electra, 1990
- [Cigr-91] Cigré working group 06 of study committee 33, *Metal oxide arresters in AC systems*, 1991, Technical brochure No. 60
- [Clar-99] Clarke, *Varistor ceramics*, Journal of the American Ceramic society, Volume 82, Number 3, Page 485-502, 1999
- [Darv-98] Darveniza, Saha, *Surface flashover on metal-oxide varistors blocks*, IEEE international conference on conduction and breakdown in solid dielectrics, June 22-25, Västerås, Sweden, 1998
- [Davi-88] Davies, Rowlands, Turri, Waters, *Statistical analysis of flashover data using a generalised likelihood method*, IEEE Proceedings, Volume 135, Number 1, Page 79-84, 1988
- [Deng-98] Dengler, *Impulsalterung von Metalloxidableitern und ihre Überwachung im Betrieb*, Dissertation, Universität Stuttgart, 1998
- [Eda-84] Eda, *Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents*, Journal of applied Physics, Volume 56, Number 10, Page 2948-2955, 1984
- [Finc-02] Finck von Finkenstein, Lehn, Schellhaas, Wegmann, *Arbeitsbuch Mathematik für Ingenieure*, Teubner Verlag, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden, 2002

- [He-07] He, Hu, *Discussions on nonuniformity of energy absorption capabilities of ZnO varistors*, IEEE Transactions on power delivery, Volume 22, Number 3, 2007
- [Hinr-94] Hinrichsen, Mainville, Riffon, Rollin, *Pressure relief tests on varistors for the series compensation banks installed at the Montagnais substation*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 9, No. 2, 1994, page 781-787
- [Hinr-00] Hinrichsen, *Metalloxid-Ableiter Grundlagen*, Siemens AG, Berlin, 2000
- [Hinr-07] Hinrichsen, Reinhard, Richter (on behalf of Cigré WG A3.17), *Energy handling capability of high-voltage metal-oxide surge arresters Part 1: A critical review of the standards*, Cigré SC A3 Technical Colloquium, Rio de Janeiro, September 12/13, 2007
- [Hinr-07a] Hinrichsen, *Overvoltage protection and insulation coordination in power systems*, Vorlesungsskript, TU-Darmstadt, 2007
- [Jond-00] Jondral, Wiesler, *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und stochastischer Prozesse für Ingenieure*, Teubner Verlag, Stuttgart-Leipzig, 2000
- [Klein-04] Klein, *Einflüsse auf das Energieaufnahmevermögen von Metalloxidableitern*, Dissertation, Shaker Verlag, 2004
- [Kuch-95] Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 1995
- [Lat-83] Lat, *Thermal properties of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on power apparatus and systems, Volume PAS-102, Number 7, Page 2194-2202, 1983
- [Lat-85] Lat, *Analytical method for performance prediction of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on power apparatus and systems, Volume PAS-104, Number 10, Page 2665-2674, 1985
- [Lehn-06] Lehn, Wegmann, *Einführung in die Statistik*, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Leng-99] Lengauer, Rubesa, Danzer, *Finite element modelling of the electrical impulse induced fracture of a high voltage varistor*, Journal of the European Ceramic Society, Volume 20, Page 1017-1021
- [Maha-01] Mahan, G.D., *Elastic oscillations of cylindrical fuses*, Journal of applied Physics, Volume 90, Number 9, Page 4415-4422
- [Mart-96] Martinez, Zanetta, *Comments on metal oxide surge arresters surges energy absorption capacity*, Conference Record of the 1996 IEEE Symposium on electrical insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996
- [Obra-03] Obralic, *Quantifizierung des Wechselstrom-Energieaufnahmevermögens von MO-Widerständen durch eine statistische Verteilungsfunktion nach Weibull*, Diplomarbeit, TU-Berlin, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik, Berlin, 2003
- [Pfeif-96] Pfeiffer, *Vorlesung elektrische Messtechnik I*, Vorlesungsskript, TH-Darmstadt, 1996
- [Pfeiff-00] Pfeiffer, *Vorlesung Digitale Messtechnik*, Vorlesungsskript, TU-Darmstadt, 2000

-
- [Ring-97] Ringler, Kirkby, Erven, Lat, Malkiewicz, *The energy absorption capability and time-to-failure of varistors used in station-class metal-oxide surge arresters*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 12, No.1, 1997
- [Sach-69] Sachs, *Statistische Auswertungsmethoden*, Springer Verlag, 1969
- [Saks-89] Sakshaug, Burke, Kresge, *Metal oxide arresters on distribution systems - fundamental considerations*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 4, No. 4, 1989
- [Verd-92] Verdolin, Franco, Drummond, Oliveira, Esmeraldo, Pereira, Magnanini, Martinez, *Energy absorption and impulse current capability of metal oxide arresters - a proposed methodology of evaluation*, Cigré Session, 30. August-5. September, 1992
- [Wilk-62] Wilks, *Mathematical statistics*, Wiley-Verlag, New York, 1969

Normen

- [DIN EN 60099-4] Überspannungsableiter - Teil 4: Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze, 2004
- [DIN IEC 60060-1] Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen, 2005
- [IEC 60099-1] Surge arresters - Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems, 1999
- [IEC 60099-4] Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 2004.
- [IEC 60099-5] Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations
- [IEEE C62.11-2005] Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits (>1 kV)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Max Reinhard
31.5.1974 in Frankfurt am Main geboren



Schulbildung

1980-1984 Grundschule in Frankfurt
1984-1993 Gymnasium in Frankfurt

Berufsausbildung

1993-1995 Ausbildung zum Elektroinstallateur

Hochschulausbildung

1996-2002 Studium an der TU-Darmstadt, Studienrichtung Elektrotechnik (EET)

Berufserfahrungen

2003- 2008 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt,
Fachgebiet Hochspannungstechnik
(Fachgebietsleiter Prof. Dr.-Ing. Hinrichsen)
Arbeitsgebiet: Energieaufnahmevermögen von Metalloxid Widerständen

Veröffentlichungen

- [1] Hinrichsen, Reinhard, Richter (on behalf of Cigré WG A3.17), *Energy handling capability of high-voltage metal-oxide surge arresters Part 1: A critical review of the standards*, Cigré SC A3 Technical Colloquium, Rio de Janeiro, September 12/13, 2007
- [2] Reinhard, Hinrichsen, Richter, Greuter (on behalf of Cigré WG A3.17); *Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters - Part 2: Results of a Research Test Program*, Cigré Session 2008, Paris, August 24-29, 2008