

---

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einführende Betrachtungen.....	1
1.1.	Einleitung .....	1
1.2.	Supraleitung .....	1
1.2.1	Phänomene der Supraleitung .....	2
1.2.2	Theoretische Ansätze zur Erklärung der Supraleitung .....	6
1.2.3	Transportströme in HTS.....	9
1.3.	Supraleitende Materialien .....	15
1.3.1	Allgemeine Übersicht.....	16
1.3.2	YBCO.....	18
1.4.	Energetische Anwendungen .....	19
1.4.1	Übersicht zu Strombegrenzern.....	20
1.4.2	Strombegrenzung mit resistiven Strombegrenzern.....	22
1.4.3	Thermische Belastung während der Strombegrenzung .....	25
1.5.	Kühleigenschaften von Flüssigstickstoff .....	27
2.	Netzfrequente Schaltversuche.....	29
2.1.	Beschreibung der Versuchsanlage .....	29
2.2.	Verwendete Proben .....	31
2.3.	100 kVA-Modell .....	32
2.4.	Schaltverhalten im induktiven Kreis.....	38
2.4.1	Zerstörungsfreie Messungen.....	38
2.4.2	Vergleichende Belastungsversuche.....	41
3.	Kennlinienfeldmessungen von $\rho = f(J, T)$ .....	45
3.1.	Anlagenübersicht.....	45
3.2.	Verwendete Proben .....	48
3.3.	Versuchsablauf.....	50

---

3.4.	Messungen.....	50
3.4.1	Messung der kritischen Stromdichte.....	50
3.4.2	Impulsmessung.....	51
3.5.	Kennlinie $\rho(J, T = \text{const.})$ .....	53
3.5.1	Analytische Beschreibung der Kennlinie $\rho(J, T = 77 \text{ K})$ .....	56
3.6.	Das Kennlinienfeld $\rho(J, T)$ .....	64
4.	Simulationsrechnungen .....	71
4.1.	Grundlagen der FEM -Simulationen mit ANSYS .....	71
4.1.1	Physikalische Grundlagen der Wärmeleitung.....	72
4.1.2	Die Bilanzgleichung in Finiten Elementen (Elementmatrizen).....	75
4.1.3	Formfunktionen .....	77
4.1.4	Analogie bei Feldberechnungen.....	79
4.1.5	Elektro-thermische Kopplung .....	80
4.1.6	Schlussfolgerungen zum Vorgehen bei der HTS-Berechnung .....	81
4.1.7.	Modifikation von ANSYS zur HTS-Berechnung .....	83
4.2.	FEM-Simulationen zum Auslöseverhalten .....	88
4.2.1.	Simulationen zum Gleichstrom-Auslöseverhalten.....	89
4.2.1.1.	Vergleich Rechnung - Impulsmessung .....	89
4.2.1.2.	Konstantstrom-Auslösecharakteristik .....	92
4.2.2.	Untersuchungen zur Frage einer diskontinuierlichen Kennlinie	98
4.2.3	Simulationen zum Wechselstrom-Auslöseverhalten .....	112
4.2.3.1	Auslösecharakteristik bei eingprägtem Wechselstrom .....	112
4.2.4.	Schaltverhalten in induktiven Kreisen .....	117
4.2.4.1.	Schalten mit perfekt homogenem Material.....	118
4.2.4.2.	Schaltverhalten mit Hot-Spots .....	122
4.2.4.2.1	Analyseverfahren.....	123

---

4.2.4.2.2	Konzentrierte Schwachstelle .....	126
4.2.4.2.3	Verteilte Schwachstellen .....	132
4.2.4.3.	Schaltverhalten mit einem $J_C$ -Gradienten .....	134
4.2.4.4	Schaltverhalten mit $J_C$ -Gradient und Hot-Spot.....	137
4.3.	2D-FDM -Simulationen .....	140
4.3.1.	Vergleich des Schaltverhaltens auf $ZrO_2$ und Saphir .....	143
4.4.	Vereinfachtes Begrenzermmodell für Netzwerksimulationen.....	147
	Zusammenfassung.....	153
	Anhang A: Beispiel zu Isoparametrischen Elementen.....	158
	Anhang B: Ausgewählte Stoffkenndaten .....	161
	Anhang C: Wärmeausbreitung in Saphir .....	164
	Anhang D: Experimentelle Untersuchungen am Isoliersystem Flüssigstickstoff – Leiterbahn - Substrat .....	167
D.1	Kurze Darstellung des Kenntnisstandes zum Durchschlag in $LN_2$ ...	167
D.2	Anlagenübersicht.....	170
D.3	Versuche.....	171
D.3.1	Allgemeine Beobachtungen .....	172
D.3.2	Untersuchungen mit 1 mm Leiterbahnabstand .....	173
D.3.3	Untersuchungen mit 2 mm Leiterbahnabstand .....	175
D.3.4	Untersuchungen im beheiztem $LN_2$ -Bad .....	175
D.3.5	Direkte Heizung der Proben.....	176
D.3.6	Versuche im Kaltgas .....	177
D.3.7	Optische Nachuntersuchungen zur Probenschädigung nach Durchschlagsversuchen.....	179
D.4	Brennspannung bei Lichtbogenbildung in $LN_2$ .....	182
	Formelzeichen .....	185

Literaturverzeichnis.....	192
Lebenslauf .....	202