

Dipl.-Phys. Dr. rer. nat. Hans Joachim Lippmann

Schalten im Vakuum

Physik und Technik der Vakuumschalter

VDE VERLAG GMBH • Berlin • Offenbach

Inhalt

Zu diesem Buch	5
Vorwort	7
Einleitung	13
1 Wirkungsweise des Vakuumschalters	17
2 Einige physikalische Grundlagen	23
2.1 Grenzen der Vakuumisolation	23
2.2 Begriffe aus der Plasmaphysik	27
3 Vakuumbogen bei kleinen Strömen	31
3.1 Katodenflecke	31
3.1.1 Experimentelle Ergebnisse zum Katodenfleck	33
3.1.2 Laser-Absorptionsfotografie	35
3.1.3 Verhalten der Metallionen	37
3.1.4 Bewegung der Katodenflecke	39
3.2 Physikalische Modelle für den Katodenfleck	40
3.2.1 Katodenfleckmodell nach Ecker	40
3.2.1.1 Theoretische Ansätze	42
3.2.1.2 Strom-Spannung-Kennlinie des Katodenflecks	44
3.2.1.3 Näherungsformel für die Strom-Spannung-Kennlinie	44
3.2.1.4 Einfluss einer Parallelkapazität	45
3.2.2 Dynamische Katodenfleckbildung durch explosionsartigen Emissionsprozess (Explosive Electric Emission-Modell)	47
3.3 Modelle der Plasma-Ausbreitung	51
3.3.1 Modell nach Wieckert	51
3.3.2 Modell von Hantschke	52
3.4 Diffuser Vakuumbogen	52
3.4.1 Brennspannung	55
4 Vakuumbogen bei großen Strömen	57
4.1 Kontrahierter Vakuumbogen	58
4.1.1 Modelle der Kontraktion	61
4.1.2 Modell mit Pinch-Effekt	62

4.1.3	Modell von Boxmān	63
4.1.4	Modell von Wieckert und Egli	67
4.1.5	Modell von Schellekens und Schram	68
4.2	Radialmagnetfeld-Kontakt	69
4.2.1	Spiralkontakt	75
4.3	Einfluss axialer Magnetfelder auf den Vakuumbogen	77
4.3.1	Experimentelle Ergebnisse	78
4.3.2	Yanabu-Modell	80
4.3.3	Erweitertes Boxman-Modell	81
4.4	Kontaktformen mit axialem Magnetfeld	82
4.4.1	Spulenkontakt	82
4.4.2	Axialmagnetfeld-Kontakt (AMF-Kontakt)	83
4.4.3	Hufeisen-Kontakt	86
5	Vorgänge nach dem Löschen des Vakuumbogens	89
5.1	Wiederverfestigung der Schaltstrecke	89
5.1.1	Direkte Messung der Wiederverfestigungsspannung	89
5.1.2	Messung der Wiederverfestigung durch laserinduzierte Fluoreszenz	90
5.2	Potentialmessungen am Dampfschirm	93
5.3	Spärentladungen	96
6	Kontaktwerkstoffe	99
6.1	Kontaktwerkstoffe für Vakuumschütze	101
6.1.1	Herstellung von Wolfram-Kupfer	104
6.2	Kontaktwerkstoffe für Leistungsschalter	105
6.2.1	Herstellung von Chrom-Kupfer	108
6.3	Abreißstrom	109
6.3.1	Messung des Abreißstroms	110
6.3.1.1	Messergebnisse	112
6.3.1.2	Verbundwerkstoffe	113
7	Aufbau und Technologie der Vakuumschaltröhren	115
7.1	Bauformen	115
7.2	Verwendete Werkstoffe	117
7.3	Schützröhren	119
7.4	Leistungsröhren	122
7.4.1	Dimensionierungsfragen	123

8	Herstellung von Vakuumschaltröhren und Qualitätssicherung	129
8.1	Fertigungsablauf	129
8.2	Innendruckmessung	134
8.3	Restgasverhalten	137
9	Konstruktiver Aufbau und Eigenschaften der Vakuumschalter	141
9.1	Vakuumschütze	141
9.2	Vakuum-Leistungsschalter	146
9.2.1	Extreme Betriebsbedingungen	152
9.2.2	Isoliervermögen	152
9.3	SF6-isolierte Schaltanlagen	152
9.4	Einpolige Vakuumschalter	153
9.4.1	Bahnschalter	153
9.4.2	Schalter für Gleichstrom	155
10	Schaltfälle	157
10.1	Schalten kapazitiver Ströme	157
10.2	Schalten kleiner induktiver Ströme	158
10.3	Sonderfall multiple Wiederzündungen	161
10.4	Schalten von Kurzschlussströmen	165
11	Vergleich mit anderen Schaltprinzipien	167
11.1	Zur Marktentwicklung bei Schaltgeräten	167
11.2	Vorteile des Vakuumschalters	170
12	Ausblick	175
Literatur		177
Sachverzeichnis		187