

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

# Schalten im Vakuum

Physik und Technik der Vakuumschalter

**VDE VERLAG GMBH** • Berlin • Offenbach

# Inhalt

<b>Zu diesem Buch</b>	5
<b>Vorwort</b>	7
<b>Einleitung</b>	13
<b>1 Wirkungsweise des Vakuumschalters</b>	17
<b>2 Einige physikalische Grundlagen</b>	23
2.1 Grenzen der Vakuumisolation	23
2.2 Begriffe aus der Plasmaphysik	27
<b>3 Vakuumbogen bei kleinen Strömen</b>	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
<b>4 Vakuumbogen bei großen Strömen</b>	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 Boxm��n	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 Vakumbogen	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
<b>5</b>	<b>Vorg��nge nach dem L��schen des Vakumbogens</b>	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	Sp��tentladungen	96
<b>6</b>	<b>Kontaktwerkstoffe</b>	99
6.1	Kontaktwerkstoffe f��r Vakuumsch��tze	101
6.1.1	Herstellung von Wolfram-Kupfer	104
6.2	Kontaktwerkstoffe f��r Leistungsschalter	105
6.2.1	Herstellung von Chrom-Kupfer	108
6.3	Abrei��strom	109
6.3.1	Messung des Abrei��stroms	110
6.3.1.1	Messergebnisse	112
6.3.1.2	Verbundwerkstoffe	113
<b>7</b>	<b>Aufbau und Technologie der Vakuumschaltr��hren</b>	115
7.1	Bauformen	115
7.2	Verwendete Werkstoffe	117
7.3	Sch��tzr��hren	119
7.4	Leistungsr��hren	122
7.4.1	Dimensionierungsfragen	123

<b>8</b>	<b>Herstellung von Vakuumschaltröhren und Qualitätssicherung</b>	129
8.1	Fertigungsablauf	129
8.2	Innendruckmessung	134
8.3	Restgasverhalten	137
<b>9</b>	<b>Konstruktiver Aufbau und Eigenschaften der Vakuumschalter</b>	141
9.1	Vakuumschütze	141
9.2	Vakuum-Leistungsschalter	146
9.2.1	Extreme Betriebsbedingungen	152
9.2.2	Isoliervermögen	152
9.3	SF <sub>6</sub> -isiolerte Schaltanlagen	152
9.4	Einpolige Vakuumschalter	153
9.4.1	Bahnschalter	153
9.4.2	Schalter für Gleichstrom	155
<b>10</b>	<b>Schaltfälle</b>	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
<b>11</b>	<b>Vergleich mit anderen Schaltprinzipien</b>	167
11.1	Zur Marktentwicklung bei Schaltgeräten	167
11.2	Vorteile des Vakuumschalters	170
<b>12</b>	<b>Ausblick</b>	175
<b>Literatur</b>		177
<b>Sachverzeichnis</b>		187