

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Physikalische und chemische Effekte an elektrischen Kontakten</b>	<b>1</b>
1.1 Der ruhende Kontakt (M. Huck u. W. A. Merl)	1
1.1.1 Grundlegende Definitionen	1
1.1.2 Der fremdschichtfreie Kontakt	3
1.1.2.1 Einführung	3
1.1.2.2 Die Kontaktfläche	4
1.1.2.2.1 Qualitative Beschreibung	4
1.1.2.2.2 Modelltheorien und profilometrische Theorien	6
1.1.2.3 Der Kontaktwiderstand	11
1.1.2.3.1 Engewiderstand einer Mikroflächenverteilung	11
1.1.2.3.2 Engewiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft	12
1.1.2.3.3 Die <i>R-U</i> -Kennlinie eines Kontaktes	14
1.1.2.3.4 Die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung und des Engewiderstandes	16
1.1.2.4 Das Haften und Verschweißen (A. Keil)	18
1.1.2.4.1 Haften und Verschweißen ohne Strombelastung	18
1.1.2.4.2 Grundbegriffe zum Schweißverhalten elektrischer Kontakte	19
1.1.2.4.3 Schweißverhalten ruhender Kontakte unter Strombelastung (E. Walczuk)	20
1.1.3 Der fremdschichtbehaftete Kontakt (M. Huck u. W. A. Merl)	26
1.1.3.1 Entstehung von Fremdschichten	26
1.1.3.2 Der Hautwiderstand	28
1.1.3.3 Kontaktwiderstand und Kontaktkraft fremdschichtbehafteter Kontakte	31
1.1.3.4 Das Fritten von Fremdschichten (M. Huck u. A. Keil)	32
1.1.3.5 Labormethoden zur zeitraffenden Erzeugung von Fremdschichten (U. Mayer)	36
1.2 Der schaltende Kontakt (A. Keil)	39
1.2.1 Einführung	39
1.2.2 Vorgänge in Gleichstromschaltkreisen	41
1.2.2.1 Schmelzbrücke und Lichtbogengrenzkurve	41
1.2.2.2 Schaltvorgänge in der Nachrichtentechnik unter den Bedingungen der Praxis	42
1.2.3 Vorgänge in Wechselstromschaltkreisen (K.-W. Jäger u. A. Keil)	43
1.2.3.1 Einschaltwinkel und Überswingfaktor	43
1.2.3.2 Schaltvorgänge in der Energietechnik unter den Bedingungen der Praxis (K.-W. Jäger)	44

1.2.4	Grundbegriffe über elektrische Entladungen in Gasen (A. Keil u. E. Vinaricky) . . . . .	45
1.2.4.1	Die Bildung von Ladungsträgern im Gasraum . . . . .	45
1.2.4.2	Die selbständige Dunkelentladung (Townsend-Effekt) . . . . .	46
1.2.4.3	Die Glimmentladung . . . . .	47
1.2.4.4	Die Koronaentladung . . . . .	47
1.2.4.5	Kennzeichen des Lichtbogens . . . . .	47
1.2.4.6	Der Elektronenaustritt aus Metallen . . . . .	48
1.2.4.6.1	Thermoemission . . . . .	48
1.2.4.6.2	Feldemission . . . . .	49
1.2.4.6.3	Thermo-Feld-Emission (T-F) . . . . .	49
1.2.4.6.4	Elektronenemission infolge Stoß . . . . .	50
1.2.4.6.5	Elektronenemission durch Lichtquanten (Photoeffekt) . . . . .	50
1.2.4.7	Die Fallgebiete des Lichtbogens . . . . .	50
1.2.4.7.1	Der Anodenmechanismus . . . . .	50
1.2.4.7.2	Der Kathodenmechanismus . . . . .	51
1.2.4.8	Die Lichtbogencharakteristiken . . . . .	51
1.2.4.9	Nichtstationäre Zustände . . . . .	52
1.2.4.10	Plasmastrahlen (K.-W. Jäger) . . . . .	52
1.2.4.10.1	Entstehung und Eigenschaften . . . . .	52
1.2.4.10.2	Einfluß des Elektrodenwerkstoffs . . . . .	54
1.2.4.10.3	Wirkung der Plasmastrahlen auf Kontaktstücke . . . . .	55
1.2.4.11	„Kurze Bögen“ (A. Keil) . . . . .	56
1.2.5	Beanspruchung der Kontaktoberfläche durch Gasentladungen . . . . .	58
1.2.5.1	Materialwanderung bei Gleichstrom (F. Llewellyn-Jones u. A. Keil) . . . . .	58
1.2.5.1.1	Die Wanderung von der Anode zur Kathode („Feinwanderung“) . . . . .	58
1.2.5.1.2	Die Wanderung von der Kathode zur Anode („Grobwanderung“) . . . . .	61
1.2.5.1.3	Materialwanderung im Bereich hoher Ströme (A. Keil) . . . . .	62
1.2.5.1.4	Materialwanderung bei Wechselstrom . . . . .	63
1.2.5.2	Lichtbogenabbrand (E. Vinaricky) . . . . .	63
1.2.5.2.1	Prüfverfahren zur Beurteilung des Abbrandverhaltens . . . . .	65
1.2.5.2.2	Prüfkriterien für den Abbrand . . . . .	65
1.2.5.2.3	Abbrand von Kontaktwerkstoffen in verschiedenen Anwendungsbereichen . . . . .	66
	Nachrichtentechnik – Steuerungs- und Regelungstechnik – Niederspannungs-Energietechnik – Das Abbrandverhalten von Silber-Metalloxid-Werkstoffen – Mittel- und Hochspannungstechnik	
1.2.5.3	Das Verschweißen einschaltender Kontaktstücke . . . . .	76
1.2.5.3.1	Das Prellen . . . . .	76
1.2.5.3.2	Prellfrei schließende Kontaktstücke . . . . .	77
1.2.5.3.3	Prellend schließende Kontaktstücke . . . . .	78
1.2.5.3.4	Prüfverfahren zur Beurteilung des Schweißverhaltens . . . . .	79
1.2.5.3.5	Vergleich des Schweißverhaltens bei ruhenden und einschaltenden Kontaktstücken . . . . .	83
1.2.5.4	Lichtbogenlaufverhalten (K.-W. Jäger) . . . . .	84
1.2.5.4.1	Das Phänomen der Lichtbogenbewegung . . . . .	84
1.2.5.4.2	Modelle zur Beschreibung der Lichtbogenbewegung . . . . .	85

1.2.5.4.3	Die Lichtbogenverweildauer . . . . .	86
1.2.5.4.4	Die wichtigsten Einflußfaktoren auf die Lichtbogenwanderung . . . . .	88
1.2.5.5	Veränderungen des Kontaktwiderstandes schaltender Kontakte (E. Vinaricky) . . . . .	91
1.2.6	Lebensdauer von Schaltgeräten (K.-W. Jäger) . . . . .	95
1.2.6.1	Kontaktschutz („Funkenlöschung“) und Lichtbogenlöschung (L. Borchert) . . . . .	95
1.2.6.1.1	Maßnahmen in der Nachrichtentechnik . . . . .	96
	Der Ausschaltvorgang in Gleichstromkreisen mit induktiver Last – Kontaktschutz („Funkenlöschung“) bei induktiver Last – Der Einschaltvorgang bei kapazitiver Last	
1.2.6.1.2	Maßnahmen in der Energietechnik (K.-W. Jäger) . . . . .	100
	Aufgabenstellung bei der Lichtbogenlöschung – Selbstlöschung – Erhöhung der Lichtbogenspannung in Löschkammern – Lösch- blechkammern – Isolierstoffkammern	
1.3	Der gleitende Kontakt (M. Huck) . . . . .	107
1.3.1	Metallische Gleitkontakte . . . . .	107
1.3.1.1	Trockene Reibung . . . . .	107
1.3.1.1.1	Das Amonton-Coulombsche Gesetz für den Fall der Bewegungsreibung . . . . .	107
1.3.1.1.2	Das Amonton-Coulombsche Gesetz für den Übergang von der Ruhe- zur Bewegungsreibung . . . . .	109
1.3.1.1.3	Mechanismen des Reibverschleißes . . . . .	110
1.3.1.1.4	Eigenschaften galvanischer Schichten auf Steckverbindern . . . . .	113
1.3.1.2	Schmierung gleitender Kontakte . . . . .	116
1.3.2	Effekte an Kohlebürsten und Schleifstücken (W. Bahrs) . . . . .	117
1.3.2.1	Einführung. . . . .	117
1.3.2.2	Patina . . . . .	118
1.3.2.3	Stromübertragung . . . . .	119
1.3.2.4	Reibwert . . . . .	119
1.3.2.5	Kommutierung . . . . .	120
1.3.2.6	Elektrische und mechanische Störeinflüsse . . . . .	121
1.3.2.7	Verschleiß und Lebensdauer . . . . .	123
1.4	Spezielle Erscheinungen an Kontakten (A. Keil u. C.-L. Meyer) . . . . .	124
1.4.1	Whiskerbildung . . . . .	124
1.4.1.1	Whisker an Zinnoberflächen . . . . .	125
1.4.1.2	Whisker an Silberoberflächen . . . . .	126
1.4.1.3	Entstehung von Whiskern im Lichtbogen . . . . .	126
1.4.2	Chemische Reaktionen unter Einwirkung des Lichtbogens . . . . .	127
1.4.2.1	Chemische Reaktionen im Lichtbogenplasma . . . . .	127
1.4.2.2	Spezielle chemische Reaktionen an Kontaktflächen als Folge von Gasentladungen . . . . .	127
1.4.2.3	Die Formierung . . . . .	129
1.4.3	Chemische Reaktionen mit Kunststoffen . . . . .	129
1.4.3.1	Entstehung von Organo-Metallverbindungen mit Wolfram . . . . .	129
1.4.3.2	„Brown Powder“-Effekt . . . . .	130

1.4.3.2.1	Reibungspolymere . . . . .	131
1.4.3.2.2	Statische Polymere . . . . .	132
1.4.3.3	Verkokung organischer Substanzen . . . . .	133
1.4.3.4	Die „Aktivierung“ . . . . .	134
1.4.4	Mechanische Deformation durch den Schaltlichtbogen . . . . .	135
1.4.5	Wechselwirkungen zwischen Lichtbogen, Gehäusewand und Kontaktstück . . . . .	136
1.4.5.1	Metallisierung von Gehäusewänden . . . . .	136
1.4.5.2	Thermische Einwirkung des Schaltlichtbogens auf Isolierteile . . . . .	136
1.4.6	Spannungsrißkorrosion . . . . .	137
1.4.6.1	An Trägerwerkstoffen . . . . .	137
1.4.6.2	An Kunststoffteilen . . . . .	137
1.4.7	Der Mechanismus der Korrosion durch Handschweiß . . . . .	138
1.4.8	Die Wanderung von Silbersulfid . . . . .	138
1.4.9	„Silver migration“ . . . . .	139
1.4.10	Einwirkung von Silikonen . . . . .	139
1.4.11	Extreme Umweltbedingungen . . . . .	140
1.4.11.1	Tiefe Temperaturen . . . . .	140
1.4.11.2	Hohe Drucke . . . . .	141
	Literatur zu Kapitel 1 . . . . .	141
<b>2</b>	<b>Werkstoffe . . . . .</b>	<b>156</b>
2.1	Über den Schmelzfluß erzeugte Kontaktwerkstoffe (A. Keil u. K. E. Saeger) . . . . .	156
2.1.1	Silber (Ag) . . . . .	156
2.1.1.1	Reines Silber . . . . .	156
2.1.1.1.1	Physikalische und technologische Kennwerte . . . . .	156
2.1.1.1.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	156
2.1.1.1.3	Technologische Eigenschaften . . . . .	157
2.1.1.1.4	Anwendung . . . . .	157
2.1.1.2	Legierungen des Silbers . . . . .	158
2.1.1.2.1	Einfluß kleiner Zusätze von Gold, Palladium oder Platin . . . . .	158
2.1.1.2.2	Silberlegierungen mit Unedelmetallen . . . . .	159
2.1.1.2.3	Silber-Palladium-Legierungen mit höheren Palladiumgehalten . . . . .	160
2.1.1.2.4	Weitere Entwicklungstendenzen . . . . .	161
2.1.1.2.5	Silber-Cadmium-Legierungen . . . . .	162
2.1.2	Gold (Au) . . . . .	162
2.1.2.1	Reines Gold . . . . .	162
2.1.2.1.1	Physikalische und technologische Kennwerte . . . . .	162
2.1.2.1.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	162
2.1.2.1.3	Technologische Eigenschaften und Anwendung . . . . .	163
2.1.2.2	Legierungen des Goldes . . . . .	163
2.1.2.2.1	Zwei- und Mehrstofflegierungen mit den Komponenten Silber und Kupfer . . . . .	163
2.1.2.2.2	Anlaufbeständige Legierungen mit reduziertem Goldgehalt . . . . .	165

2.1.2.2.3	Legierungen mit Nickel und Kobalt . . . . .	165
2.1.3	Palladium (Pd) . . . . .	166
2.1.3.1	Reines Palladium . . . . .	166
2.1.3.1.1	Physikalische und technologische Kennwerte . . . . .	166
2.1.3.1.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	166
2.1.3.1.3	Technologische Eigenschaften und Anwendung . . . . .	167
2.1.3.2	Legierungen des Palladiums . . . . .	167
2.1.3.2.1	PdAg 40 und Palladium-Mehrstofflegierungen . . . . .	167
2.1.3.2.2	Palladium-Kupfer-Legierungen . . . . .	168
2.1.3.2.3	Legierungen mit Nickel, Wolfram, Ruthenium und Iridium . . . . .	168
2.1.4	Platin (Pt) . . . . .	169
2.1.4.1	Reines Platin . . . . .	169
2.1.4.1.1	Physikalische und technologische Kennwerte . . . . .	169
2.1.4.1.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	169
2.1.4.1.3	Technologische Eigenschaften und Anwendung . . . . .	170
2.1.4.2	Legierungen des Platins . . . . .	170
2.1.5	Sonstige Platinmetalle . . . . .	171
2.1.6	Quecksilber (Hg) . . . . .	171
2.1.6.1	Physikalische Eigenschaften . . . . .	171
2.1.6.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	171
2.1.6.3	Anwendung . . . . .	171
2.2	Galvanisch erzeugte Kontaktwerkstoffe (H. Großmann u. A. Keil)	171
2.2.1	Einleitung . . . . .	171
2.2.2	Verfahren der galvanischen Metallabscheidung . . . . .	172
2.2.2.1	Galvanische Abscheidung von Silber . . . . .	172
2.2.2.2	Galvanische Abscheidung von Gold . . . . .	173
2.2.2.3	Galvanische Abscheidung der Platinmetalle . . . . .	174
2.2.2.4	Galvanische Abscheidung von Kupfer . . . . .	175
2.2.2.5	Galvanische Abscheidung von Nickel . . . . .	175
2.2.2.6	Galvanische Abscheidung von Zinn . . . . .	175
2.2.3	Stromlose Verfahren der Metallabscheidung . . . . .	176
2.2.3.1	Ionenaustauschverfahren . . . . .	176
2.2.3.2	Reduktionsverfahren . . . . .	176
2.2.3.2.1	Stromlose Abscheidung von Kupfer . . . . .	177
2.2.3.2.2	Stromlose Abscheidung von Nickel . . . . .	177
2.2.4	Eigenschaften galvanischer Schichten und ihre Prüfung . . . . .	177
2.2.4.1	Schichtdicke . . . . .	177
2.2.4.2	Porosität . . . . .	177
2.2.4.3	Haftfestigkeit . . . . .	178
2.2.4.4	Härte . . . . .	178
2.2.4.5	Duktilität . . . . .	179
2.2.4.6	Verschleißerscheinungen bei reibender Beanspruchung . . . . .	179
2.2.4.7	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	179
2.2.4.8	Lötbarkeit . . . . .	180
2.2.4.9	Diffusionsverhalten galvanischer Schichten . . . . .	180

2.3	Sintertechnisch erzeugte Kontaktwerkstoffe (R. Imm)	181
2.3.1	Allgemeine Bemerkungen	181
2.3.2	Sintertechnisch erzeugte reine Metalle	182
2.3.2.1	Wolfram (W)	182
2.3.2.2	Molybdän (Mo)	184
2.3.2.3	Rhenium (Re)	185
2.3.3	Sintertechnisch erzeugte Verbundwerkstoffe	185
2.3.3.1	Sinterverfahren	185
2.3.3.2	Verbundwerkstoffe aus Metall-Metalloxid	187
2.3.3.2.1	Silber-Cadmiumoxid; pulvermetallurgisch hergestellt	187
2.3.3.2.2	Andere Silber-Metalloxid-Werkstoffe	189
2.3.3.3	Verbundwerkstoffe aus Metall-Metall	190
2.3.3.3.1	Silber-Nickel	190
2.3.3.3.2	Silber-Wolfram, Silber-Molybdän	192
2.3.3.3.3	Kupfer-Wolfram, Kupfer-Molybdän	194
2.3.3.4	Verbundwerkstoffe aus Metall-Metalloid	195
2.3.3.4.1	Silber-Graphit	195
2.3.3.4.2	Kupfer-Graphit	196
2.3.3.5	Verbundwerkstoffe aus Metall-Metallcarbid	196
2.3.3.5.1	Silber-Wolframcarbid, Silber-Molybdäncarbid, Kupfer-Wolframcarbid, Kupfer-Molybdäncarbid	196
2.3.3.6	Verbundwerkstoffe aus drei und mehr Komponenten	197
2.3.3.6.1	Silber-Nickel-Graphit	198
2.3.3.6.2	Silber-Kupferoxid-Graphit	198
2.3.3.6.3	Wolfram-Kupfer-Nickel	198
2.3.4	Nach anderen Verfahren erzeugte Verbundwerkstoffe	199
2.3.4.1	Verfahren der inneren Oxidation	199
2.3.4.2	Silber-Cadmiumoxid, hergestellt nach dem Verfahren der inneren Oxidation	200
2.3.4.2.1	Silber-Cadmiumoxid mit spezieller Gefügeausbildung	202
2.3.4.3	Silber-Zinnoxid, Silber-Indiumoxid, u. a.	203
2.3.4.4	Silber-Magnesiumoxid-Nickeloxid	204
2.4	Gasarme Kontaktwerkstoffe (K. E. Saeger u. E. Vinaricky)	204
2.4.1	Gasarmes Kupfer	205
2.4.2	Verbundwerkstoffe mit hochschmelzenden Komponenten	205
2.5	Kohle und Graphit (C) (W. Bahrs)	206
2.5.1	Einleitung	206
2.5.2	Kristallgitter und Gleiteigenschaften	206
2.5.3	Herstellungsverfahren und Werkstoffgruppen	207
2.5.3.1	Hartkohle, Naturgraphit und Kohlegraphit	208
2.5.3.2	Elektrographit	208
2.5.3.3	Spezialgraphit	209
2.5.3.4	Metallgraphit	209
2.5.3.5	Variationsbreite bei der Herstellung	209
2.6	Elektrisch leitende polymere Werkstoffe für Kontaktierungsaufgaben (M. Streuli)	209

2.6.1	Einführung . . . . .	209
2.6.2	Silikonkautschuke als Trägermaterial für elastische Kontaktwerkstoffe . . . . .	211
2.6.3	Anwendungsformen . . . . .	212
2.6.3.1	In allen Richtungen leitfähige Folien . . . . .	212
2.6.3.2	Folien mit Leitfähigkeit senkrecht zu ihrer Oberfläche . . . . .	213
2.7	Träger- und Leiterwerkstoffe (P. Schuler) . . . . .	214
2.7.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen . . . . .	214
2.7.1.1	Reinaluminium (Al) . . . . .	214
2.7.1.2	Aluminiumlegierungen . . . . .	214
2.7.2	Kupfer und Kupferlegierungen . . . . .	215
2.7.2.1	Technisch reines Kupfer (Cu) . . . . .	215
2.7.2.1.1	Herstellung und Eigenschaften . . . . .	215
2.7.2.1.2	Anwendung . . . . .	218
2.7.2.2	Naturharte Kupferlegierungen . . . . .	218
2.7.2.2.1	Niedriglegierte Kupferlegierungen . . . . . Kupfer-Silber; Kupfer-Cadmium; Kupfer-Tellur; Kupfer-Magnesium; Kupfer-Kobalt	219
2.7.2.2.2	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing) . . . . .	222
2.7.2.2.3	Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronze) . . . . .	225
2.7.2.2.4	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber) . . . . .	227
2.7.2.2.5	Kupfer-Silber-(Cadmium)-Legierungen (Silberbronze) . . . . .	229
2.7.2.2.6	Sonstige naturharte Kupferlegierungen . . . . . Kupfer-Nickel; Kupfer-Nickel-Zinn; Kupfer-Eisen	230
2.7.2.3	Aushärtbare Kupferlegierungen . . . . .	235
2.7.2.3.1	Kupfer-Beryllium-Legierungen (Berylliumbronze) . . . . .	235
2.7.2.3.2	Sonstige aushärtbare Kupferlegierungen . . . . . Kupfer-Chrom; Kupfer-Zirkon; Kupfer-Chrom-Zirkon; Kupfer-Titan	241
2.7.3	Nickel und Nickellegierungen . . . . .	245
2.7.3.1	Technisch reines Nickel (Ni) . . . . .	245
2.7.3.2	Nickellegierungen . . . . .	247
2.7.3.2.1	Nickel-Kupfer-Legierungen . . . . .	247
2.7.3.2.2	Nickel-Beryllium . . . . .	247
2.7.4	Sonstige Trägerwerkstoffe . . . . .	248
2.7.4.1	Werkstoffe auf Eisenbasis (Fe) . . . . .	248
2.7.4.1.1	Stahl . . . . .	248
2.7.4.1.2	Chrom-Nickel-Stahl . . . . .	248
2.7.4.1.3	Magnetische Werkstoffe . . . . .	249
2.7.4.2	Werkstoffe auf Kobaltbasis (Co) . . . . .	249
2.8	Thermobimetalle (H. Trostel) . . . . .	250
2.8.1	Einführung . . . . .	250
2.8.2	Geschichtliches . . . . .	250
2.8.3	Definition . . . . .	250
2.8.4	Thermische Ausbiegung . . . . .	251
2.8.5	Innere Spannungen . . . . .	252

XVIII	Inhaltsverzeichnis	
2.8.6	Formteile . . . . .	253
2.8.7	Auswahl der Komponenten . . . . .	255
2.8.8	Elektrischer Widerstand . . . . .	257
2.8.9	Korrosion . . . . .	258
2.9	Lote (K. Haug u. A. Keil) . . . . .	258
2.9.1	Einleitung . . . . .	258
2.9.2	Hartlote . . . . .	259
2.9.2.1	Legierungen . . . . .	259
2.9.2.2	Lötungen mit und ohne Flußmittel . . . . .	261
2.9.3	Weichlote . . . . .	261
2.9.3.1	Überblick über die Legierungssysteme . . . . .	261
2.9.3.2	Legierungen mit den Komponenten Blei, Cadmium, Zinn, Zink	262
2.9.3.3	Wismuthaltige Legierungen . . . . .	263
2.9.3.4	Indiumhaltige Legierungen . . . . .	264
2.9.3.5	Mechanische Eigenschaften . . . . .	264
2.9.3.6	Flußmittel für Weichlötungen . . . . .	264
2.10	Elektrisch leitende Kleber und Lacke (E. Vinaricky) . . . . .	265
2.10.1	Leitkleber . . . . .	265
2.10.2	Leitlacke. . . . .	267
	Literatur zu Kapitel 2 . . . . .	267

### **3 Technologien für die Herstellung von Kontaktstücken**

	(A. Keil u. E. Vinaricky) . . . . .	272
3.1	Fertigung von Einzelkontakten . . . . .	272
3.1.1	Massive Kontaktniete . . . . .	272
3.1.2	Bimetallkontaktniete. . . . .	273
3.1.3	Niete mit hartgelöteten Kontaktauflagen . . . . .	274
3.1.4	Kontaktkugeln . . . . .	275
3.1.5	Kontaktplättchen . . . . .	275
3.1.5.1	Massive Kontaktplättchen . . . . .	275
3.1.5.2	Aufschweißkontakte . . . . .	276
3.2	Fertigung von Halbzeugen (U. Harmsen u. A. Keil) . . . . .	277
3.2.1	Massive Halbzeuge . . . . .	277
3.2.2	Edelmetallplattierte Halbzeuge (Kontaktbimetalle) . . . . .	277
3.2.2.1	Warmpreßschweißen . . . . .	278
3.2.2.2	Walzplattieren . . . . .	279
3.2.2.3	Bandlötten . . . . .	280
3.2.2.4	Rollennahtschweißen . . . . .	281
3.2.2.5	Plattieren über die Gasphase (I. Györy) . . . . .	281
3.2.2.5.1	Hochvakuumbedampfung . . . . .	281
3.2.2.5.2	Die Kathodenzerstäubung („Sputtern“) . . . . .	282
3.2.2.5.3	Chemische Dampflattierung (CVD) . . . . .	282
3.2.2.5.4	Eigenschaften der erzeugten Schichten . . . . .	282
3.2.2.6	Galvanisieren (H. Großmann u. A. Keil) . . . . .	283



3.2.2.6.1	Galvanisieren von Massenteilen . . . . .	283
3.2.2.6.2	Galvanisieren von Bändern und Drähten . . . . .	285
3.2.2.6.3	Selektivgalvanisieren . . . . . Selektivgalvanisieren massiver Bänder – Selektivgalvanisieren vorgestanzter Bänder	285
3.2.2.6.4	Puls-Plating . . . . .	286
3.2.2.7	Allgemeine Bemerkungen zum Einsatz dünner Goldauflagen . . . . .	287
3.2.2.8	Sonderverfahren zum Edelmetallplattieren (E. Vinaricky) . . . . .	287
3.2.2.9	Feinprofile . . . . .	288
3.2.2.10	Streifenverzinnte Bänder . . . . .	288
3.2.2.11	Stufengefräste Bänder . . . . .	288
3.3	Bestückungsverfahren für Einzelkontakte . . . . .	289
3.3.1	Mechanische Befestigung . . . . .	289
3.3.2	Hartlöten (H. Heinzel u. A. Keil) . . . . .	290
3.3.2.1	Flammenlöten . . . . .	290
3.3.2.2	Widerstandslöten . . . . .	291
3.3.2.3	Hochfrequenzlöten . . . . .	291
3.3.2.4	Ofenlöten . . . . .	291
3.3.2.5	Prüfung von Lötstellen . . . . .	292
3.3.3	Schweißen . . . . .	293
3.3.3.1	Draht-Stumpfschweißen . . . . .	293
3.3.3.2	Draht- und Profilschnittschweißen . . . . .	294
3.3.3.3	Plättenschweißen . . . . .	294
3.3.3.3.1	Buckelschweißen . . . . .	294
3.3.3.3.2	Direktes Aufschweißen . . . . .	295
3.3.3.4	Kugelschweißen. . . . .	295
3.3.3.5	Abtrennstumpfschweißen . . . . .	295
3.3.3.6	Elektronenstrahlschweißen . . . . .	296
3.3.3.7	Laserschweißen . . . . .	297
3.3.3.8	Ultraschallschweißen . . . . .	297
3.3.3.9	Prüfung von Schweißstellen . . . . .	297
3.4	Bemerkungen zur Gestaltung von Kontaktstücken (E. Vinaricky) . . . . .	298
3.4.1	Steckverbinder . . . . .	298
3.4.2	Relais . . . . .	298
3.4.3	Hilfsstromschalter . . . . .	299
3.4.4	Motorschütze . . . . .	300
3.5	Kohlebürsten (W. Bahrs) . . . . .	301
3.5.1	Stromübertragung auf Kommutatoren und Schleifringe . . . . .	301
3.5.2	Stromabnehmer für elektrische Bahnen . . . . .	303
	Literatur zu Kapitel 3 . . . . .	304
<b>4</b>	<b>Anwendungsbeispiele für elektrische Kontakte . . . . .</b>	<b>306</b>
4.1	Einführung (A. Keil u. E. Vinaricky) . . . . .	306
4.2	Stromführungskontakte . . . . .	306

XX	Inhaltsverzeichnis	
4.2.1	Statische Dauerverbindungen . . . . .	306
4.2.1.1	Dauerverbindungen in der Nachrichtentechnik . . . . .	306
4.2.1.1.1	Lösbare Schraubverbindungen . . . . .	306
4.2.1.1.2	Nichtlösbare Verbindungen durch Löten und Schweißen . . . . .	307
4.2.1.1.3	Nichtlösbare Verbindungen ohne Wärmezufuhr . . . . .	307
4.2.1.2	Dauerverbindungen in der Energietechnik . . . . .	309
4.2.1.2.1	Nichtlösbare Verbindungen durch Löten und Schweißen . . . . .	311
4.2.1.2.2	Lösbare Schraubverbindungen . . . . .	311
4.2.1.2.3	Nichtlösbare Preßverbindungen . . . . .	313
4.2.2	Steck- und Andruckverbinder (G. Lampert) . . . . .	314
4.2.2.1	Geschichtliches . . . . .	314
4.2.2.2	Einsatz von Steckverbindern . . . . .	315
4.2.2.3	Allgemeine Anforderungen an Steckverbinder . . . . .	317
4.2.2.4	Leiterplattensteckverbinder . . . . .	317
4.2.2.5	Andruckverbinder . . . . .	318
4.2.2.5.1	Metallische Andruckverbinder . . . . .	318
4.2.2.5.2	Andruckverbinder aus leitfähigen Elastomeren . . . . .	319
4.2.2.6	Konstruktion von Leiterplattensteckverbindern . . . . .	320
4.2.2.6.1	Federkennlinie und -werkstoffe . . . . .	321
4.2.2.6.2	Steck- und Ziehkräfte . . . . .	322
4.2.2.6.3	Kontaktflächen . . . . .	324
4.2.2.6.4	Oberflächen für Anschlüsse . . . . .	325
4.2.2.6.5	Leiterwerkstoffe . . . . .	326
4.2.2.6.6	Isolierkörper und -stoffe . . . . .	326
4.2.2.7	Zuverlässigkeit von Steckverbindern . . . . .	327
4.2.3	Metallische Gleitkontakte (E. Vinaricky) . . . . .	328
4.2.3.1	Einleitung . . . . .	328
4.2.3.2	Schleifringübertrager . . . . .	328
4.2.3.3	Gleitkontakte in Potentiometern . . . . .	329
4.2.3.4	Gleitkontakte in Dreh-, Schiebe- und Codierschaltern . . . . .	332
4.2.3.5	Gleitkontakte für Kleinstmotoren . . . . .	333
4.3	Schaltgeräte . . . . .	335
4.3.1	Schalter . . . . .	335
4.3.1.1	Hoch- und Mittelspannungs-, Netz- und Verbraucherschalter (W. Rieder) . . . . .	335
4.3.1.1.1	Funktionsarten der Schalter . . . . .	335
	Transformator-Stufenschalter – Leistungsschalter – Lastschalter – Trennschalter – Last-Trennschalter – Sonderkonstruktionen	
4.3.1.1.2	Löschverfahren und Schaltmedien . . . . .	344
4.3.1.1.3	Bemerkungen zum Lichtbogenverhalten in Düsenkontakt- anordnungen mit strömendem Schaltmedium (J. Kaminski) . . . . .	347
	Düsenverstopfung – Laminare und turbulente Teilbereiche im Lichtbogen – Abbrandverhalten SF <sub>6</sub> -durchströmter Düsenelektro- den	
4.3.1.1.4	Vakuumschalter (W. C. Brooks u. M. P. Reece) . . . . .	349
	Einführung – Geschichte des Vakuumschalters – Physikalische Vorgänge bei der Stromunterbrechung im Vakuum – Die beiden	

	verschiedenen Formen des Vakuumbogens – Der diffuse Bogen – Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Vakuumschaltern – Kontaktgeometrie – Kontaktwerkstoffe für Vakuumschalter – Technologie der Vakuumschalter – Verhalten von Vakuumschaltern bei Betriebsströmen – Stromunterbrechung – Elektrische Lebensdauer der Vakuumschalter – Unterbrechung kapazitiver Ströme – Unterbrechung induktiver Ströme	
4.3.1.2	Niederspannungs-Schutzschalter . . . . .	363
4.3.1.2.1	Motorschutzschalter (K.-H. Hild) . . . . .	364
	Arbeitsweise des Motorschutzschalters – Anforderungen an den Motorschutzschalter – Schaltbeanspruchung der Motorschutzschalter – Konstruktive Gestaltung des Kontaktsystems – Anforderungen an die Kontaktstücke eines Motorschutzschalters	
4.3.1.2.2	Leistungsschalter . . . . .	368
	Anforderungen an Leistungsschalter – Strombegrenzung – Konstruktive Gestaltung des Kontaktsystems – Anforderungen an die Kontaktstücke	
4.3.1.2.3	Leitungsschutzschalter . . . . .	376
	Anforderungen an den LS-Schalter – Anforderungen an die Kontaktstücke	
4.3.1.2.4	Fehlerstrom-Schutzschalter (Th. Meyer) . . . . .	384
	Aufbau und Wirkungsweise – Anforderungen an die Kontaktstücke – Gesichtspunkte für die Wahl der Kontaktwerkstoffe	
4.3.1.3	Niederspannungs-Verbraucherschalter . . . . .	388
4.3.1.3.1	Leer- und Lastschalter (H. Müller) . . . . .	388
4.3.1.3.2	Schütze (H. Meyer u. H. Müller) . . . . .	388
	Vorbemerkung – Definition – Funktion, Aufgabe, Vorzüge – Aufbau eines Luftschützes – Vorschriften – Gesichtspunkte für die Auswahl von Kontaktwerkstoffen – Folgerungen für die Wahl der Kontaktwerkstoffe – Kondensatorschütze	
4.3.1.3.3	Nockenschalter (K.-H. Schneider) . . . . .	395
	Spezifische Eigenschaften – Aufbau – Kontaktsysteme – Löschsysteme – Vorschriften – Schaltbetrieb – Wahl der Kontaktwerkstoffe	
4.3.1.3.4	Installationsschalter (A. Keil) . . . . .	399
4.3.1.3.5	Schalter für Elektrohauseräte . . . . .	399
4.3.1.4	Steuer- und Hilfsstromschalter . . . . .	400
4.3.1.4.1	Hilfsschütze . . . . .	400
4.3.1.4.2	Relais (R. Nitsch) . . . . .	401
	Grundtypen neutraler (monostabiler) Relais mit luftoffenen Kontakten – Kraft-Weg-Kennlinien und Energiebilanz – Grundtypen bistabiler Relais – Allgemeine Merkmale hermetisch geschlossener Kontaktsysteme – Reed-Kontakte (A. Schön) – Relais mit quecksilberbenetzten Kontakten – Schutzgaskontakte im Metallgehäuse (R. Nitsch) – Wechselstromrelais – Auswahl von Kontaktwerkstoffen für Relais (E. Vinaricky) – Elektronische Relais als Leistungsschalter	
4.3.1.4.3	Mikroschalter (Schnappschalter) (A. Keil) . . . . .	424

4.3.1.4.4	Induktive Näherungsschalter (E. Vinaricky) . . . . .	427
	Aufbau und Funktionsprinzip – Kenndaten	
4.3.1.4.5	Tasten . . . . .	428
	Anforderungen an die Kontaktstellen – Bauformen – Tasten mit metallischen Schaltelementen – Kunststoffbestückte Tasten – Kontaktlose Tasten	
4.3.1.4.6	Elektrolytische Zeitschaltzellen (A. Keil) . . . . .	434
4.4	Schmelzsicherungen (L. Vermij) . . . . .	435
4.4.1	Einleitung . . . . .	435
4.4.2	Bauweise von Sicherungen . . . . .	437
4.4.2.1	Hochspannungssicherungen . . . . .	437
4.4.2.2	Niederspannungssicherungen . . . . .	437
4.4.2.2.1	Niederspannungssicherungen für Industrieanwendungen . . . . .	437
4.4.2.2.2	Niederspannungssicherungen für Haushalt und ähnliche Zwecke	437
4.4.2.2.3	Geräteschutzsicherungen (Feinsicherungen) zum Schutz von Geräten und elektronischer Ausrüstung . . . . .	437
4.4.2.2.4	Sicherungen zum Schutz von Halbleiterelementen . . . . .	437
4.4.2.2.5	Sicherungen zum inneren Schutz von Kondensatoren . . . . .	438
4.4.3	Kenngrößen einer Sicherung . . . . .	438
4.4.3.1	Strombegrenzung einer Sicherung . . . . .	439
4.4.3.2	Zeit-Strom-Charakteristik und Nennstromstärke . . . . .	440
4.4.3.3	Abschaltcharakteristik und Meyersche Konstante . . . . .	442
4.4.3.4	Lichtbogenzeit und Lichtbogenarbeit . . . . .	445
4.4.4	Einige Fragen zur Anwendung von Sicherungen . . . . .	448
4.4.4.1	Selektiv ansprechende und in andere Schaltsysteme integrierte Sicherungen . . . . .	448
4.4.4.2	Temperaturen und Energieverbrauch . . . . .	449
	Literatur zu Kapitel 4 . . . . .	450
<b>5</b>	<b>Anhang</b> . . . . .	<b>456</b>
5.1	Mathematische Statistik bei elektrischen Kontakten (E. Sauter) . . . . .	456
5.1.1	Problemstellung . . . . .	456
5.1.2	Mathematische Hilfsmittel . . . . .	457
5.1.2.1	Diskrete Zufallsgrößen . . . . .	457
5.1.2.1.1	Binomialverteilung . . . . .	459
5.1.2.1.2	Poisson-Verteilung . . . . .	459
5.1.2.2	Stetige Zufallsgrößen . . . . .	459
5.1.2.2.1	Die empirische Verteilung einer stetigen Zufallsgröße . . . . .	461
5.1.2.2.2	Normalverteilung (Gauß-Verteilung) . . . . .	462
	Wahrscheinlichkeitsnetz – Satz von Laplace – Gesetz der großen Zahlen – Zentraler Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrech- nung – Die Rolle der Normalverteilung in den Anwendungen	
5.1.2.2.3	Exponentialverteilung . . . . .	465
5.1.2.2.4	Weibull-Verteilung . . . . .	466
5.1.3	Anwendung . . . . .	466

5.1.3.1	Statistische Beschreibung von Kontaktwiderständen . . . . .	466
5.1.3.1.1	Mischverteilungen . . . . .	467
5.1.3.2	Zuverlässigkeit und Lebensdauer . . . . .	467
5.1.3.3	Statistische Qualitätssicherung . . . . .	468
5.2	Kontaktpflege- und Reinigungsmittel (A. Keil) . . . . .	469
5.2.1	Reinigung stark verschmutzter Kontakte . . . . .	470
5.2.2	Sprays für den Korrosionsschutz . . . . .	470
5.2.3	Kurzschlüsse durch Wasserfilme auf Isolierteilen . . . . .	470
5.2.4	Kältespray . . . . .	470
5.3	Tabellen . . . . .	471
5.3.1	Technologische Gestaltung von Kontaktstellen (C.-L. Meyer u. E. Vinaricky) . . . . .	471
5.3.2	Bestückung von Kontaktstellen . . . . .	474
5.3.3	Prüfvorschriften für Schütze (E. Vinaricky) . . . . .	481
5.3.4	Ergänzung zu den Prüfvorschriften für Motorschaltgeräte nach Gebrauchskategorie AC-3 . . . . .	483
5.3.5	Physikalische Kennwerte von Thermobimetallen (H. Trostel) . . . . .	483
5.3.6	Kenndaten und Anwendungen von Kohlebürsten und -schleif- stücken (W. Bahrs) . . . . .	485
5.3.7	DIN-Normen für das Löten (K. Haug) . . . . .	486
	Literatur zu Kapitel 5 . . . . .	487
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>488</b>