

# Inhaltsverzeichnis

0.	Formelzeichenverzeichnis . . . . .	14
1.	Problematik und Bedeutung von Hochstromanlagen . . . . .	20
2.	Allgemeine Gesichtspunkte für die Berechnung und Auswahl von Hochstromleitungen . . . . .	23
2.1.	Elektrische Kenngrößen . . . . .	25
2.1.1.	Grundlagen . . . . .	25
2.1.1.1.	Übertragungsspannung und Spannungsabfall . . . . .	25
2.1.1.2.	Übertragungsstrom . . . . .	25
2.1.1.3.	Resistanz und Stromverdrängung; Reaktanz und Induktivität . . . . .	25
2.1.1.4.	Verlustleistung . . . . .	27
2.1.1.5.	Mechanische und thermische Kurzschlußfestigkeit . . . . .	27
2.1.2.	Übersicht der Hochstromleitungen und Leiteranordnungen . . . . .	29
2.1.2.1.	Offene Leiteranordnungen . . . . .	29
2.1.2.2.	Metallgekapselte Leiteranordnungen . . . . .	29
2.1.3.	Rechenverfahren . . . . .	31
2.1.3.1.	Stromverdrängungseffekt . . . . .	31
2.1.3.2.	Berechnung der Stromverdrängung . . . . .	33
2.1.3.3.	Aufstellung des linearen Gleichungssystems . . . . .	37
2.1.3.4.	Sinusförmige Ströme und symmetrische Belastung in Dreiphasensystemen . . . . .	43
2.1.3.5.	Sinusförmige Ströme und unsymmetrische Belastung in Dreiphasensystemen . . . . .	44
2.1.3.6.	Nichtsinusförmige Ströme und symmetrische Belastung in Dreiphasensystemen . . . . .	46
2.1.3.7.	Nichtsinusförmige Ströme und unsymmetrische Belastung in Dreiphasensystemen . . . . .	46
2.1.3.8.	Sinusförmige Ströme und symmetrische Belastung in Sechssystemen . . . . .	46
2.1.3.9.	Nichtsinusförmige Ströme und unsymmetrische Belastung in Sechssystemen . . . . .	47
2.1.4.	Berechnung elektrischer Kenngrößen . . . . .	47
2.1.4.1.	Betriebsstrom . . . . .	47
2.1.4.2.	Längsspannungsabfall . . . . .	53
2.1.4.3.	Verlustleistung und Blindleistungsbedarf . . . . .	54
2.1.4.4.	Induktivität . . . . .	55
2.1.5.	Analyse der Stromverdrängung unter Auswertung von Rechenergebnissen . . . . .	59
2.2.	Mechanische Beanspruchung und Festigkeit . . . . .	71
2.2.1.	Mechanische Eigenschaften des Leiterwerkstoffs . . . . .	88
2.2.2.	Kraftwirkung des elektrischen Stroms . . . . .	89
2.2.2.1.	Stromkräfte in Gleichstromanlagen . . . . .	90

2.2.2.2.	Stromkräfte in Wechsel- und Drehstromanlagen . . . . .	90
2.2.2.3.	Kräfte bei parallelen Teileitern . . . . .	94
2.2.2.4.	Kräfte an abgebogenen Leitern . . . . .	95
2.2.3.	Mechanische Festigkeit von biegesteifen Leitern . . . . .	96
2.2.3.1.	Mechanisch-dynamische Wirkung der Kurzschlußströme . . . . .	96
2.2.3.2.	Mechanische Beanspruchung . . . . .	97
2.2.3.3.	Berechnung der Frequenzfaktoren der Biegebeanspruchung . . . . .	99
2.2.3.4.	Widerstands- und Flächenträgheitsmomente . . . . .	100
2.2.3.5.	Zulässige Biegebeanspruchung . . . . .	101
2.2.3.6.	Einfluß von Schweißstellen auf die mechanische Festigkeit . . . . .	101
2.2.3.7.	Einfluß von Zwischenstücken . . . . .	108
2.2.3.8.	Kompaktleiterhalterungen . . . . .	109
2.2.3.9.	Mehrleiterhalterungen . . . . .	112
2.2.4.	Mechanische Festigkeit von nichtbiegesteifen Leitern . . . . .	113
2.2.4.1.	Seile . . . . .	113
2.2.4.2.	Bänder . . . . .	114
2.2.5.	Stützpunktbeanspruchung . . . . .	114
2.2.5.1.	Offene Leiteranordnungen . . . . .	115
2.2.5.2.	Metallgekapselte Leiteranordnungen . . . . .	116
2.3.	Thermische Beanspruchung und Festigkeit . . . . .	119
2.3.1.	Wärmeübertragung . . . . .	120
2.3.1.1.	Wärmeleitung . . . . .	120
2.3.1.2.	Wärmeübergang . . . . .	121
2.3.1.3.	Wärmestrahlung . . . . .	122
2.3.1.4.	Wärmekonvektion . . . . .	123
2.3.1.5.	Wärmedurchgang . . . . .	125
2.3.1.6.	Wärmenetzmethode . . . . .	128
2.3.2.	Dauerstromerwärmung . . . . .	129
2.3.2.1.	Offene Leiteranordnungen . . . . .	129
2.3.2.2.	Gekapselte Leiteranordnungen . . . . .	134
2.3.3.	Kurzschlußstromerwärmung . . . . .	138
2.3.3.1.	Offene Leiteranordnungen . . . . .	138
2.3.3.2.	Metallisch gekapselte Leiteranordnungen . . . . .	139
2.4.	Auswahl des Leiter- und Isoliermaterials . . . . .	139
2.4.1.	Leiterwerkstoffe . . . . .	140
2.4.1.1.	Elektrische und physikalische Kenndaten . . . . .	140
2.4.1.2.	Geometrische und mechanische Kenndaten . . . . .	141
2.4.1.3.	Stromtragfähigkeit . . . . .	142
2.4.2.	Isolierstoffe . . . . .	142
2.4.3.	Allgemeine Auswahlkriterien . . . . .	146
2.4.3.1.	Gleichstromanlagen . . . . .	147
2.4.3.2.	Wechsel- und Drehstromanlagen . . . . .	149
2.4.3.3.	Anlagenspezifische Auswahlfaktoren . . . . .	153
2.4.4.	Optimierungsverfahren . . . . .	155
2.4.4.1.	Optimierungskriterien . . . . .	156
2.4.4.2.	Leiteroptimierung . . . . .	156
2.4.4.3.	Anlagenoptimierung . . . . .	160
2.5.	Elektromagnetische Beeinflussung benachbarter Metallteile . . . . .	160

2.5.1.	Wesen der Beeinflussung . . . . .	161
2.5.2.	Berechnung des einwirkenden Magnetfelds . . . . .	161
2.5.2.1.	Mehrere Leiter auf einem gemeinsamen Konstruktionsteil.	162
2.5.2.2.	Mehrere Leiter auf verschiedenen Konstruktionsteilen . .	163
2.5.3.	Beeinflussung benachbarter Konstruktionsteile . . . . .	165
2.5.3.1.	Berechnung der Erwärmung von eisernen Konstruktionsteilen . . . . .	165
2.5.3.2.	Ermittlung der Erwärmung von Konstruktionsteilen anhand von Diagrammen . . . . .	167
2.5.3.3.	Gegenmaßnahmen zur Verminderung der Beeinflussung und ihrer Auswirkungen . . . . .	169
2.5.4.	Beeinflussung benachbarter Rohrleitungen . . . . .	173
2.5.5.	Beeinflussung benachbarter Betonarmierungen . . . . .	175
2.5.6.	Beeinflussung von Steuer- und Meßkabeln . . . . .	175
2.5.6.1.	Beeinflussung durch Spannungen . . . . .	176
2.5.6.2.	Beeinflussung durch Ströme . . . . .	178
2.5.7.	Beeinflussung benachbarter elektrotechnischer Geräte . .	180
<b>3.</b>	<b>Technische Kenndaten elektrotechnischer Betriebsmittel für Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>182</b>
3.1.	Allgemeine Hinweise . . . . .	182
3.2.	Schaltgeräte. . . . .	183
3.2.1.	Schnellschalter . . . . .	183
3.2.2.	Schütze . . . . .	183
3.2.3.	Wechselstrom- und Drehstrom-Hochstromleistungsschalter	184
3.2.4.	Gleichstrom-Hochstromleistungsschalter . . . . .	185
3.2.5.	$I_s$ -Begrenzer . . . . .	186
3.2.6.	Hochstromtrenner . . . . .	186
3.2.7.	Überbrückungsschalter . . . . .	187
3.2.8.	Kurzschließer . . . . .	187
3.3.	Transformatoren. . . . .	188
3.3.1.	Aufbau und Aufstellung . . . . .	188
3.3.2.	Schutz . . . . .	192
3.3.3.	Ofentransformatoren. . . . .	194
3.3.3.1.	Ofentransformatoren für die metallurgische Industrie . .	194
3.3.3.2.	Ofentransformatoren für die chemische Industrie . . . .	197
3.3.4.	Schweißtransformatoren . . . . .	197
3.3.4.1.	Schweißtransformatoren für die Widerstandsschweißung .	197
3.3.4.2.	Schweißtransformatoren für die Lichtbogenschweißung . .	199
3.3.5.	Blocktransformatoren . . . . .	199
3.3.6.	Gleichrichtertransformatoren . . . . .	199
3.4.	Gleichrichter . . . . .	202
3.4.1.	Gefäßgleichrichter . . . . .	202
3.4.2.	Halbleitergleichrichter . . . . .	203
3.4.3.	Thyristoren. . . . .	205
3.5.	Spezielle Betriebsmittel. . . . .	206
3.5.1.	Transduktoren . . . . .	206
3.5.2.	Anoden- und Katodendrosseln . . . . .	207

3.5.3.	Kompensationskondensatoren . . . . .	208
3.5.4.	Betriebsmittel zur Verbesserung der Elektroenergie- qualität . . . . .	208
3.5.5.	Saugdrosseln . . . . .	212
3.5.6.	Stromwandler . . . . .	213
3.5.6.1.	Wechselstromwandler . . . . .	213
3.5.6.2.	Gleichstromwandler . . . . .	214
3.6.	Verbindungsstellen . . . . .	219
3.6.1.	Lösbare Verbindungen . . . . .	219
3.6.1.1.	Physikalische Grundlagen . . . . .	219
3.6.1.2.	Einsatzbedingungen . . . . .	221
3.6.1.3.	Anforderungen an lösbare Verbindungen . . . . .	221
3.6.1.4.	Schraubkontakte . . . . .	223
3.6.1.5.	Klemmkontakte . . . . .	227
3.6.1.6.	Spannkontakte . . . . .	227
3.6.1.7.	Auflagekontakte . . . . .	227
3.6.2.	Schmelzschweißverbindungen . . . . .	227
3.6.2.1.	Grundsätze bei der Schweißverbindung . . . . .	227
3.6.2.2.	Schweißverfahren . . . . .	229
3.6.2.3.	Vorwärmverfahren . . . . .	229
3.6.2.4.	Schweißen von Aluminium-Hochstromleitungen . . . . .	230
3.6.2.5.	Schweißen von Kupfer-Hochstromleitungen . . . . .	235
3.6.2.6.	Schweißnahtprüfung . . . . .	237
3.6.3.	Lötverbindungen . . . . .	237
3.6.4.	Sprengschweißverbindungen . . . . .	238
3.6.4.1.	Allgemeines . . . . .	238
3.6.4.2.	Physikalische Grundlagen . . . . .	238
3.6.4.3.	Ausführungsformen . . . . .	239
4.	<b>Wechselstrom-Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>242</b>
4.1.	Anwendungsgebiete und Ausrüstungsvarianten von Elektroenergie- Umwandlungsanlagen . . . . .	242
4.1.1.	Übersicht und Entwicklungstendenzen . . . . .	242
4.1.2.	Gestaltung der Wechselstrom-Hochstromleitungen . . . . .	244
4.2.	Lichtbogenofenanlagen . . . . .	244
4.2.1.	Drehstrom-Lichtbogenofenanlage . . . . .	244
4.2.2.	Gleichstrom-Lichtbogenofenanlage . . . . .	251
4.3.	Reduktionsofenanlagen . . . . .	254
4.4.	Plasmaofenanlagen . . . . .	259
4.4.1.	Allgemeines . . . . .	259
4.4.2.	Gleichstrom-Plasmaofenanlage . . . . .	259
4.4.3.	Drehstrom-Plasmaofenanlage . . . . .	263
4.5.	Induktionsschmelz- und -erwärmungsanlagen . . . . .	263
4.5.1.	Netzfrequenz-Induktions-Tiegelofenanlage . . . . .	264
4.5.2.	Netzfrequenz-Induktions-Rinnenofenanlage . . . . .	267
4.5.3.	Mittelfrequenz-Induktions-Tiegelofenanlage . . . . .	268

4.5.4.	Netzfrequenz-Induktions-Blockerwärmungsanlage . . . . .	269
4.5.5.	Mittelfrequenz-Induktions-Blockerwärmungsanlage . . . . .	270
4.6.	Anlagen zur direkten Widerstandserwärmung . . . . .	270
4.6.1.	Widerstandserwärmungsanlage mit direktem Stromdurchgang . . . . .	270
4.6.2.	Widerstandsdrahtpatentieranlage . . . . .	272
4.7.	Widerstandsschweißanlagen . . . . .	273
4.7.1.	Punkt- und Nahtschweißanlage . . . . .	273
4.7.2.	Stumpfschweißanlage . . . . .	274
4.8.	Sonstige Ofenanlagen . . . . .	275
4.8.1.	Graphitierungs-ofenanlage . . . . .	276
4.8.2.	Salzbadofenanlage . . . . .	276
4.8.3.	Elektroschlacke-Umschmelzanlage (ESU) . . . . .	277
4.9.	Drehstrom-Generatoranlagen . . . . .	281
4.9.1.	Übersicht zu Generatorausleitungen . . . . .	281
4.9.2.	Offene Leiteranordnungen . . . . .	285
4.9.3.	Gekapselte Leiteranordnungen . . . . .	286
4.9.4.	Betriebserfahrungen . . . . .	289
4.9.5.	Hinweise zur Bemessung offener und gekapselter Generatorausleitungen . . . . .	290
4.9.6.	Berechnungsbeispiele für eine gekapselte Generatorausleitung . . . . .	295
5.	<b>Gleichstrom-Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>305</b>
5.1.	Anwendungsgebiete und Ausrüstungen von Elektroenergie-Umwandlungsanlagen . . . . .	305
5.1.1.	Übersicht und Entwicklungstendenzen . . . . .	305
5.1.2.	Chloralkali-Elektrolyseanlagen . . . . .	307
5.1.3.	Elektrometallurgieanlagen . . . . .	315
5.1.3.1.	Elektrometallurgieanlagen wäßriger Lösungen . . . . .	315
5.1.3.2.	Schmelzfluß-Elektrolyseanlagen . . . . .	317
5.1.3.3.	Gleichstrom-Lichtbogenofen- und -Plasmaofenanlagen . . . . .	322
5.2.	Gestaltung von Hochstromanlagen . . . . .	323
5.2.1.	Auswahl und Schaltung . . . . .	323
5.2.2.	Gleichrichteranlagen . . . . .	329
5.2.2.1.	Elektrische Kenngrößen . . . . .	329
5.2.2.2.	Steuer- und Regeleinrichtungen . . . . .	331
5.2.2.3.	Spannungs- und Stromüberschwingungen . . . . .	336
5.2.2.4.	Ausführung . . . . .	338
5.2.3.	Hochstromleitungen . . . . .	340
5.2.3.1.	Allgemeine Grundsätze . . . . .	340
5.2.3.2.	Gleichrichterausleitungen und -sammelleitungen . . . . .	342
5.2.3.3.	Elektrolysezuleitungen und -umführungsleitungen . . . . .	342
5.2.3.4.	Elektrolyseverbindungsleitungen und -überbrückungsleitungen . . . . .	342
5.2.3.5.	Auswahl . . . . .	343
5.2.3.6.	Auslegung . . . . .	352

<b>6.</b>	<b>Schutzmaßnahmen gegen gefährliche elektrische Durchströmungen . . .</b>	<b>355</b>
6.1.	Aufgabe der Schutzmaßnahmen . . . . .	355
6.2.	Begriffe und Vorschriften . . . . .	355
6.3.	Schutz gegen direktes Berühren . . . . .	357
6.3.1.	Industrielle Elektrowärmeanlagen . . . . .	358
6.3.2.	Elektrolyseanlagen . . . . .	362
6.4.	Schutz bei indirektem Berühren . . . . .	364
6.4.1.	Industrielle Elektrowärmeanlagen . . . . .	365
6.4.2.	Elektrolyseanlagen . . . . .	366
6.5.	Prüfung der Schutzmaßnahmen . . . . .	369
6.6.	Sofortmaßnahmen nach einem Unfall durch elektrischen Strom . . .	370
<b>7.</b>	<b>Prüfung und Inbetriebsetzung von Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>373</b>
7.1.	Aufgaben . . . . .	373
7.2.	Begriffe und Vorschriften . . . . .	374
7.3.	Arbeitsmittel . . . . .	375
7.3.1.	Übersicht über Arbeitsmittel . . . . .	375
7.3.2.	Einsatz der Meßmittel . . . . .	377
7.3.2.1.	Messung von Spannung, Strom, Leistung . . . . .	377
7.3.2.2.	Messung von Temperaturen . . . . .	380
7.3.2.3.	Prüfmittel für den Isolationswiderstand und den Berüh-	
	rungsschutz . . . . .	382
7.3.2.4.	Messung mechanischer Größen . . . . .	383
7.3.2.5.	Meßmittel für Qualitätskenngrößen . . . . .	384
7.4.	Prüfung . . . . .	388
7.4.1.	Vorbereitung der Prüfung . . . . .	388
7.4.2.	Durchführung der Prüfung . . . . .	389
7.5.	Inbetriebsetzung . . . . .	392
7.5.1.	Vorbereitung der Inbetriebsetzung . . . . .	392
7.5.2.	Durchführung der Inbetriebsetzung . . . . .	393
7.6.	Spezielle Messungen und Meßschaltungen zur Ermittlung von An-	
	lagenparametern . . . . .	395
<b>8.</b>	<b>Instandhaltung von Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>407</b>
8.1.	Aufgaben der Instandhaltung . . . . .	407
8.2.	Ursachen der Abnutzung . . . . .	407
8.2.1.	Technische Abnutzung . . . . .	407
8.2.2.	Natürliche Abnutzung . . . . .	408
8.3.	Gliederung der Instandhaltungsmethoden . . . . .	409
8.4.	Ablauf des Instandsetzungsprozesses . . . . .	409
8.5.	Pläne zur Leitung des Instandhaltungsprozesses . . . . .	412

8.5.1.	Instandhaltungsplan . . . . .	412
8.5.2.	Instandsetzungsplan . . . . .	412
8.5.3.	Instandsetzungsablaufplan . . . . .	413
8.5.3.1.	Balkendiagramm . . . . .	413
8.5.3.2.	Netzplantechnik . . . . .	414
8.6.	Theorie der Instandhaltung . . . . .	423
8.6.1.	Optimierungskriterien . . . . .	424
8.6.2.	Ausfallarten . . . . .	425
8.6.3.	Instandhaltungsstrategien . . . . .	425
8.6.3.1.	Wiederherstellende Instandhaltung . . . . .	427
8.6.3.2.	Vorbeugende Instandhaltung nach starrem Zyklus . . . . .	427
8.6.3.3.	Vorbeugende Instandhaltung nach Überprüfung . . . . .	428
8.6.3.4.	Mikrorechnergestützte wiederherstellende Instandhaltung . . . . .	430
8.7.	Instandhaltungshinweise . . . . .	432
9.	<b>Netzurückwirkungen durch Hochstromanlagen . . . . .</b>	<b>461</b>
9.1.	Wechselwirkungen zwischen Abnehmern und Netz . . . . .	461
9.1.1.	Bewertung der Netzurückwirkungen . . . . .	461
9.1.2.	Koordination der Netzurückwirkungen . . . . .	464
9.1.3.	Berechnung der Netzurückwirkungen . . . . .	467
9.2.	Wechselstrom-Hochstromanlagen . . . . .	470
9.2.1.	Direkte Widerstandserwärmung . . . . .	470
9.2.1.1.	Arten der Netzurückwirkungen . . . . .	471
9.2.1.2.	Berechnung der Qualitätsfaktoren . . . . .	471
9.2.1.3.	Maßnahmen zur Verringerung der Netzurückwirkungen . . . . .	472
9.2.2.	Direkte Lichtbogenerwärmung . . . . .	473
9.2.2.1.	Arten der Netzurückwirkungen . . . . .	474
9.2.2.2.	Berechnung der Qualitätsfaktoren . . . . .	475
9.2.2.3.	Maßnahmen zur Verringerung der Netzurückwirkungen . . . . .	477
9.2.3.	Direkte Lichtbogenwiderstandserwärmung . . . . .	481
9.2.3.1.	Arten der Netzurückwirkungen . . . . .	481
9.2.3.2.	Berechnung der Qualitätsfaktoren . . . . .	482
9.2.3.3.	Maßnahmen zur Verringerung der Netzurückwirkungen . . . . .	482
9.2.4.	Induktive Erwärmung . . . . .	482
9.2.4.1.	Arten der Netzurückwirkungen . . . . .	482
9.2.4.2.	Berechnung der Qualitätsfaktoren . . . . .	483
9.2.4.3.	Maßnahmen zur Verringerung der Netzurückwirkungen . . . . .	483
9.3.	Gleichstrom-Hochstromanlagen . . . . .	484
9.3.1.	Arten der Netzurückwirkungen . . . . .	484
9.3.2.	Berechnung der Qualitätsfaktoren . . . . .	484
9.3.3.	Maßnahmen zur Verringerung der Netzurückwirkungen . . . . .	487
9.4.	Überwachung . . . . .	489
10.	<b>Vorschriftenverzeichnis . . . . .</b>	<b>491</b>
11.	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>495</b>
12.	<b>Sachwörterverzeichnis . . . . .</b>	<b>511</b>