

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Induktionserwärmung</b>	<b>15</b>
2.1	Eigenschaften . . . . .	15
2.1.1	Induzierte Ströme . . . . .	15
2.1.2	Eindringtiefe . . . . .	16
2.1.3	Stromverteilung . . . . .	19
2.1.4	Ferromagnetische Materialien . . . . .	21
2.2	Induktor-Einsatz-Anordnungen . . . . .	25
2.2.1	Anordnungen . . . . .	25
2.2.2	Induktoren . . . . .	27
2.2.3	Wirkungsgrad . . . . .	29
2.3	Berechnung idealisierter Anordnungen . . . . .	30
2.4	Berechnung mithilfe magnetischer Ersatzschaltungen . . . . .	60
2.4.1	Spule . . . . .	60
2.4.2	Kreiszyllindrische Anordnung . . . . .	65
2.4.3	Induktor rechteckförmigen Querschnitts mit Platte . . . . .	69
2.4.4	Anordnung mit geschlossenem magnetischen Rückschluss . . . . .	72
2.5	Numerische Berechnung . . . . .	75
2.5.1	Diskretisierung . . . . .	76
2.5.2	Differentialgleichungen . . . . .	79
2.5.3	Randbedingungen . . . . .	84
2.5.4	Logische Prüfungen . . . . .	97
2.5.5	Näherungslösung . . . . .	104
2.6	Stromversorgung . . . . .	115
2.6.1	Übersicht zu Speisequellen . . . . .	115
2.6.2	Anforderungen . . . . .	116
2.6.3	Thyristor-Wechselrichter . . . . .	117
2.6.4	Wechselrichter mit Transistoren . . . . .	125
2.6.5	Anpassung . . . . .	131

2.7	Anwendungen . . . . .	138
2.7.1	Eigenschaften . . . . .	138
2.7.2	Schmelzen . . . . .	141
2.7.3	Durchwärmen . . . . .	151
2.7.4	Härten und Anlassen . . . . .	158
2.7.5	Löten und Schweißen . . . . .	162
2.7.6	Induktives Plasma . . . . .	163
2.7.7	Indirekte Erwärmung . . . . .	166
2.8	Arbeits- und Maschinensicherheit . . . . .	166
2.8.1	Induzierte Körperströme . . . . .	166
2.8.2	Kapazitive Ableitströme . . . . .	167
2.8.3	Eruption metallischer Schmelzen . . . . .	168
2.9	Magnetische Erwärmung . . . . .	174
2.9.1	Prinzip . . . . .	174
2.9.2	Vor- und Nachteile . . . . .	175
2.9.3	Anwendungen . . . . .	176
<b>3</b>	<b>Kondensatorfelderwärmung</b>	<b>179</b>
3.1	Elektrische Polarisierung . . . . .	179
3.1.1	Polarisationsarten . . . . .	181
3.1.2	Dipolmoment . . . . .	183
3.1.3	Polarisationsdynamik . . . . .	183
3.1.4	Permittivität . . . . .	185
3.1.5	Wirk- und Blindleistung . . . . .	194
3.2	Einrichtungen . . . . .	199
3.2.1	Arbeitskondensator . . . . .	200
3.2.2	Speisequellen . . . . .	207
3.2.3	Anpassung . . . . .	210
3.3	Gesundheitsschutz . . . . .	219
3.4	Anwendungen . . . . .	220
3.4.1	Kennzahlen . . . . .	220
3.4.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	221
3.5	Wellenbildung am Arbeitskondensator . . . . .	222
3.5.1	Leitungsbeläge . . . . .	223
3.5.2	Differentialgleichungen . . . . .	225
3.5.3	Allgemeine Lösung . . . . .	226
3.5.4	Unendliche Länge . . . . .	227
3.5.5	Endliche Länge . . . . .	228

<b>4</b>	<b>Mikrowellenerwärmung</b>	<b>235</b>
4.1	Besonderheiten . . . . .	235
4.2	TEM-Wellenleiter . . . . .	236
4.2.1	Wellengleichungen . . . . .	237
4.2.2	Reflexionsfaktor . . . . .	241
4.2.3	Anpassung . . . . .	246
4.3	Komponenten . . . . .	259
4.3.1	Mikrowellenquelle . . . . .	261
4.3.2	Richtkoppler . . . . .	263
4.3.3	Zirkulator . . . . .	264
4.3.4	Absorber . . . . .	265
4.3.5	Tuner . . . . .	265
4.3.6	Leitungsstück . . . . .	266
4.3.7	Applikator . . . . .	267
4.4	Hohlwellenleiter . . . . .	267
4.4.1	Rechteckhohlleiter . . . . .	269
4.4.2	Kreishohlleiter . . . . .	275
4.5	Applikatoren . . . . .	278
4.5.1	Einmodige Applikatoren . . . . .	278
4.5.2	Mehrmodige Applikatoren . . . . .	281
4.5.3	Mikrowellenstrahler . . . . .	284
4.6	Anpassung . . . . .	284
4.6.1	Voraussetzungen . . . . .	285
4.6.2	Anpassungsbeispiele . . . . .	285
4.7	Dielektrischer Halbraum . . . . .	293
4.7.1	Annahmen . . . . .	294
4.7.2	Differentialgleichung . . . . .	295
4.7.3	Feldgleichung . . . . .	296
4.7.4	Feldverteilung im Halbraum . . . . .	297
4.7.5	Reflexion . . . . .	300
4.8	Anwendungen . . . . .	304
4.8.1	Kennwerte . . . . .	304
4.8.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	307
4.9	Gesundheitsschutz . . . . .	308
4.9.1	Biologische Wirkungen . . . . .	308
4.9.2	Grenzwerte . . . . .	312
4.9.3	Messungen . . . . .	315

<b>5</b>	<b>Direkte Widerstandserwärmung</b>	<b>317</b>
5.1	Stromeintrag über Kontakte . . . . .	317
5.1.1	Kontakte . . . . .	318
5.1.2	Erwärmen langer Werkstücke . . . . .	321
5.1.3	Erwärmen und Umformen . . . . .	322
5.1.4	Stromversorgung . . . . .	323
5.1.5	Leistungsberechnung . . . . .	326
5.1.6	Eigenschaften und Kennziffern . . . . .	332
5.1.7	Widerstandsschweißen . . . . .	332
5.1.8	Weitere Anwendungen . . . . .	337
5.2	Stromeintrag über Elektroden . . . . .	338
5.2.1	Reduktionsöfen . . . . .	340
5.2.2	Glasschmelze . . . . .	343
5.2.3	Elektroschlacke-Umschmelzen . . . . .	346
5.2.4	Weitere Anwendungen . . . . .	347
<b>6</b>	<b>Lichtbogenschmelzen</b>	<b>351</b>
6.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	352
6.1.1	Einteilung von Plasmen . . . . .	352
6.1.2	Entladungsweg . . . . .	353
6.1.3	Elektronen Emission . . . . .	355
6.1.4	Ionisation . . . . .	356
6.1.5	Bogenansatz . . . . .	358
6.1.6	UI-Kennlinie . . . . .	358
6.2	Gleichstrombogen . . . . .	359
6.2.1	Bogenkennlinie . . . . .	360
6.2.2	Arbeitspunkt . . . . .	360
6.2.3	Elektroden . . . . .	363
6.2.4	Stromversorgung . . . . .	365
6.2.5	Gleichstrom-Lichtbogenofen . . . . .	367
6.2.6	Weitere Anwendungen des Gleichstrombogens . . . . .	372
6.3	Wechselstromlichtbogen . . . . .	377
6.3.1	Eigenschaften . . . . .	377
6.3.2	Fourieranalyse . . . . .	380
6.3.3	Kreisdiagramm . . . . .	381
6.3.4	Drehstrom-Lichtbogenofen . . . . .	386
6.3.5	Weitere Anwendungen des Wechselstrombogens . . . . .	410
6.3.6	Hochfrequenzplasma . . . . .	411

6.4	Funkenentladung . . . . .	412
6.4.1	Prinzip . . . . .	412
6.4.2	Anwendungen . . . . .	415

Leading the world in induction heating technologies

# Ausgezeichnet und flexibel



InductoForge



INDUCTOSCAN



An Inductotherm Group Company

- Anlagenbau für induktives Härten, Erwärmen, Löten
- HF/MF/IFP-Umrichter
- Schmiedeerhitzer
- Netzfrequenz-Erwärmanlagen
- Induktivlohnhärtereien
- Prozessentwicklung
- Induktorbau/Härtezubehör

**i-SYST** Die modulare, nachrüstbare IoT-Lösung für induktive Erwärmungsprozesse

INDUCTOHEAT Europe GmbH  
Ostweg 5, 73262 Reichenbach/Fils  
Telefon +49 (0)7153 504-200  
info@inductoheat.eu  
www.inductoheat.eu



Leading Manufacturers of Melting, Thermal Processing & Production Systems for the Metals & Materials Industry Worldwide