

Die induktive Wärmebehandlung

Die induktive Wärmebehandlung

unter besonderer Berücksichtigung
des Härtens der Stähle

Von

Dipl.-Ing. Walter Brunst

Stuttgart-Ditzingen

Unter Mitarbeit von

Dr.-Ing. Kurt Kegel, Berlin
und Dipl.-Ing. Norbert Weyss, Mannheim

Mit 264 Abbildungen und 5 Tafeln



Springer-Verlag
Berlin/Göttingen/Heidelberg
1957

ISBN-13: 978-3-642-92696-9 e-ISBN-13: 978-3-642-92695-2
DOI: 10.1007/978-3-642-92695-2

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1957

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche
berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinn
der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von
jedermann benutzt werden dürften.

Vorwort

Das Verfahren der induktiven Wärmebehandlung hat in der Fertigungstechnik, insbesondere im Zuge der Rationalisierung und Automatisierung, immer mehr an Bedeutung gewonnen. Für diese Maßnahmen ist diese Art der Wärmebehandlung hervorragend geeignet, weil sie die Erwärmung eines Werkstückes in kürzester Zeit und in gewünschtem engen oder weiten Bereich gestattet. Das Verfahren ermöglicht dies, weil es dasjenige ist, welches die höchste Energieübertragung auf ein Werkstück gestattet. Sie ist ein vielfaches derjenigen anderer Verfahren. Während z. B. mit der Flamme etwa 1000 Watt/cm² übertragen werden können, sind diese bei dem induktiven Verfahren bis zu 10000 Watt/cm². Durch das Prinzip der direkten Stromerwärmung des Werkstückes, die dem induktiven Verfahren eigen ist, kann es nur für stromleitende Werkstoffe verwendet werden. Selbstredend steht hiermit die Wärmebehandlung der Stähle, neben den Nicht-eisenmetallen, im Vordergrund; aber auch Werkstoffe, die nur in bestimmten Temperaturbereichen Leiter der Elektrizität sind, müssen hier genannt werden, wie auch die Anwendung in der Elektro-Medizin.

Das vorliegende Buch befaßt sich mit der induktiven Energieübertragung auf die metallischen Werkstoffe unter besonderer Berücksichtigung der Wärmebehandlung und Härtung der Stähle mit den Mittel- und Hochfrequenzen.

Im Gegensatz zum amerikanischen und englischen Schrifttum sind in Deutschland die Veröffentlichungen, bis auf das vor kurzem von E. HÖHNÉ im Springer-Verlag erschienene Werkstättbuch „Induktionshärten“, in den Fachzeitschriften zerstreut, und es ist keine zusammenfassende Arbeit mit den zum Verständnis des Verfahrens und seiner Geräte notwendigen technisch-wissenschaftlichen Unterlagen vorhanden. Der Verfasser hat es sich zur Aufgabe gemacht, diese Lücke mit dem vorliegenden Buche zu schließen. Mit Rücksicht auf den Umfang desselben wurden nur die wichtigsten Dinge für den Strom- und Temperaturverlauf sowie für das Verständnis der Umformer und die Wärmebehandlung der Stähle aufgenommen. Charakteristische Beispiele für Berechnung und ausgeführte Anlagen sollen insbesondere dem Ingenieur und Meister, beiden als Hersteller und Anwender derartiger Anlagen, eine abgerundete Übersicht über das Verfahren geben. Sicher kann es auch dem Studierenden ein Leitfadens für seine Arbeiten sein.

Bei der Namensgebung der besprochenen Vorrichtungen wurden von den heute gebräuchlichsten diejenigen verwendet, die nach Ansicht des Verfassers bezüglich ihrer Aufgabe und Bedeutung die zweckentsprechendsten sind. Zum Beispiel wurde für die Energiequelle einheitlich für den Mittel- und Hochfrequenzbereich das Wort „Umformer“ gewählt, da diese Bezeichnung der technischen Aufgabe voll und ganz entspricht. Ferner wurde für die Arbeitsspule die Bezeichnung „Heizspule“ bzw. „Heizleiter“ gewählt, weil auch dies am sinnfälligsten erschien.

Abschließend möchte ich noch die angenehme Pflicht erfüllen und allen denjenigen meinen Dank sagen, die meine Arbeit ermöglicht und unterstützt haben. Zuerst möchte ich hier der Robert Bosch GmbH., Stuttgart, danken. Durch ihr Einverständnis und Entgegenkommen wurde es überhaupt ermöglicht, daß das Buch zustande kam.

Herrn Dr.-Ing. Kurt Kegel, Berlin, möchte ich für seine Mitarbeit und das Überlassen vieler Unterlagen sowie seinen Beitrag über den Temperaturverlauf danken. Er hat auch die mühevollen Arbeit des Korrekturlesens übernommen. Herrn Dipl.-Ing. Norbert Weyss, Mannheim, danke ich für seinen umfassenden Beitrag über die Oszillatordrüben und die Unterlagen für die Röhrenumformer. Die Beiträge von Herrn Kegel und Herrn Weyss haben das Buch wesentlich bereichert. Auch möchte ich Herrn Dr.-Ing. Paul Wiest, Stuttgart, für die Durchsicht des Abschnittes über den stofflichen Teil der Stähle danken.

Den verschiedenen Firmen, die durch Überlassung der vielen Unterlagen meine Arbeit unterstützt haben, spreche ich ebenfalls meinen verbindlichsten Dank aus.

Nicht zuletzt möchte ich aber dem Springer-Verlag für die ausgezeichnete Drucklegung, unter Berücksichtigung meiner besonderen Wünsche und derjenigen der Mitarbeiter danken.

Stuttgart-Ditzingen, im Winter 1956/57

W. Brunst

Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten Bezeichnungen	X
I. Einleitung	1
II. Elektrotechnische Grundlagen	8
A. Induktions- und Durchflutungsgesetz	8
§ 1 1. Einwellige Wechselströme	8
§ 2 2. Induktionsgesetz	9
§ 3 3. Durchflutungsgesetz	11
§ 4 4. Induktivität	12
§ 5 5. Gegeninduktivität	14
B. Elektrischer Widerstand	16
§ 6 1. Allgemeines	16
§ 7 2. Reines Eisen	21
§ 8 3. Kohlenstoffstähle	22
C. Axialer Stromfluß in einem zylindrischen Leiter	25
§ 9 1. Allgemeines	25
§ 10 2. Schlechter Leiter	28
§ 11 3. Guter Leiter	31
D. Strom- und Leistungsverteilung in einer Platte	33
§ 12 1. Metallplatte	33
§ 13 2. Ferro-magnetische Platte	35
§ 14 E. Erwärmung zylindrischer Leiter durch Induktionsströme	40
F. Glühübertrager und Vektordiagramm	46
§ 15 1. Allgemeines	46
§ 16 2. Lufttransformator	48
§ 17 3. Vektordiagramm	53
§ 18 4. Wirkungsgrad zwischen Übertrager bzw. Heizleiter und Werkstück	55
G. Berechnungsunterlagen für Heizleiter und Werkstück	58
§ 19 1. Vorbemerkungen	58
§ 20 2. Ohmscher Widerstand	58
a) Heizspule	58
b) Werkstück	60
c) Resultierender Widerstand	61
§ 21 3. Reaktanz	61
a) Heizspule	61
b) Werkstück	61
c) Resultierende Reaktanz	63
§ 22 4. Impedanz	63
§ 23 5. Berechnungsbeispiele	63

III. Wärmetechnische Grundlagen	68
A. Energiebedarf bei der induktiven Erwärmung von Metallen	68
§ 24 1. Allgemeines	68
§ 25 2. Wärmeleitung	74
§ 26 3. Wärmeübergang	78
§ 27 4. Strahlung	79
B. Temperaturverlauf	81
§ 28 1. Allgemeines	81
2. Rechnerische Unterlagen	82
§ 29 a) Erwärmung	82
§ 30 b) Abkühlen an der Oberfläche	86
§ 31 c) Erwärmungskurven und Diagramm für die Einhärtetiefe	87
§ 32 3. Meßtechnische Unterlagen	89
a) Meßmethoden	90
b) Meßergebnisse	91
α) Aufheizung im Vorschub S. 91 – β) Standerwärmung S. 91	
§ 33 C. Thermischer Wirkungsgrad	93
IV. Praktische Ausbildung der Spulen und Vorrichtungen	95
§ 34 A. Stromverteilung im Werkstück	95
B. Spulenaufbau und Formgebung der Spulen	98
§ 35 1. Allgemeines	98
§ 36 2. Einwindige Spulen	103
§ 37 3. Mehrwindige Spulen	115
V. Umformer	127
§ 38 A. Allgemeines	127
B. Maschinenumformer	131
§ 39 1. Aufbau der Umformer	131
§ 40 2. Kompensation der Maschinenumformer	136
C. Röhrenumformer	139
§ 41 1. Allgemeines	139
§ 42 2. Steuerung	139
§ 43 3. Anodenspannungsgleichrichter	140
4. Senderöhre als Oszillatorröhre	141
§ 44 a) Elektronenquelle	141
§ 45 b) Triode	143
§ 46 c) Betrieb der Senderöhren in „Klasse-C-Einstellung“	147
§ 47 d) Harmonische Analyse der Stromkuppen. Stromfaktor. Grundwellenanteil und Verlustfunktion in Abhängigkeit vom Stromfußwinkel	151
§ 48 e) Vorbemerkungen zur Dimensionierung	154
§ 49 f) Ergänzungen im Kennlinienfeld	154
§ 50 g) Belastungslinie	156
§ 51 h) Annahmen	157
§ 52 i) Dimensionierung mit Hilfe der Verlustfunktion φ_a	159
§ 53 k) Grenzwertkontrolle auf Grund der Gleichstrommeßwerte	165
§ 54 l) Diskussion und Schlußkontrollen	171
§ 55 m) Außenwiderstand im Anodenkreis, seine Beziehungen zum Innenwider- stand der Röhre und zur Last	173
§ 56 5. Heiztransformator für die Oszillatorröhre	177
a) Wolframkathoden	177
b) Thorierte Wolframkathoden	178

§ 57	6. Oszillator	178
§ 58	7. Umformer mit Energiespeicher	186
§ 59	D. Funkenstörung der Umformer	186
VI. Wirtschaftlichkeit der induktiven Wärmebehandlung		192
§ 60	A. Allgemeines	192
§ 61	B. Maschinenumformer	194
§ 62	C. Röhrenumformer	195
VII. Induktive Wärmebehandlung, insbesondere Oberflächenhärtung der Stähle ...		197
§ 63	A. Allgemeines	197
§ 64	B. Abschrecken der Stähle	202
§ 65	C. ZTU (TTT)-Diagramm	206
§ 66	D. Härtenspannungen	209
	E. Stähle	215
§ 67	1. Auswahl	215
§ 68	2. Einhärtetiefe, Oberflächenhärte und Gefügebau der Vergütungsstähle ...	220
Literaturverzeichnis		233
Sachverzeichnis		238
Tafelanhang		
Tafel I:	Verlauf von Gitterspannung, Anodenspannung und Anodenstrom in einem Resonanzverstärker bzw. Oszillator. Erklärung der dynamischen Kennlinien (§ 46)	
Tafel II:	Cosinus-Schablone mit θ_a -, ψ_a - und $\varphi_{a\theta,s}$ -Skalen (§ 52)	
Tafel III:	Leitertafel zur Ermittlung der maximalen Leistung eines Umformers N_{\max} für einen geforderten Durchsatz D in kg/h (§ 60)	
Tafel IV:	Leitertafel zur Ermittlung der kWh-Kosten pro kg Erwärmungsgut bei Verwendung eines Maschinenumformers (§ 61)	
Tafel V:	Leitertafel zur Ermittlung der kWh-Kosten pro kg Erwärmungsgut bei Verwendung eines Röhrenumformers (§ 62)	

Liste der wichtigsten Bezeichnungen

<i>a</i>	Temperaturleitfähigkeit	
<i>A</i>	Ausnutzungsgrad eines Umformers	
<i>A_e</i>	Arbeit in elektrischen Einheiten	Ws; kWh
<i>B</i>	Magn. Induktion	Volt · sek · cm ⁻²
<i>c</i>	Spez. Wärme	cal · g ⁻¹ · °C ⁻¹
<i>C</i>	Konstante	
<i>d</i>	Wanddicke bei Rohren	mm, cm
<i>D</i>	Durchgriff	
<i>D</i>	Durchsatz	kg/h
<i>e</i>	Basis der natürlichen Logarithmen	2,718
<i>e</i>	Elementarladung	1,602 · 10 ⁻¹⁹ A · sek
<i>E</i>	Elektrische Feldstärke	Volt · cm ⁻¹
<i>E_D</i>	Einschaltdauer	
<i>f</i>	Frequenz	Hertz
<i>h</i>	Abstand Heizleiter-Werkstück	mm, cm
<i>H</i>	Magn. Feldstärke	Amp · cm ⁻¹ (effektiv)
<i>i</i>	Momentanwert eines (sinusförmigen) veränderlichen Stromes	Amp
<i>i_a</i>	Anodenstrom, Momentanwert	Amp
<i>i_g</i>	Gitterstrom, Momentanwert	Amp
<i>i_k</i>	Kathodenstrom, Momentanwert	Amp
<i>i_m</i>	Maximalwert eines (sinusförmigen) veränderlichen Stromes	Amp
<i>I</i>	Effektivwert eines Stromes	Amp
<i>I_a</i>	Anodengleichstrom (arithmet. Mittelwert)	Amp
<i>I_{ap}</i>	Bei eingipfeligen Stromkuppen: Gipfelwert der Anodenstromkuppe („Spitzenstrom“). Allgemein: Momentanwert in der <i>Mitte</i> der Anodenstromkuppe	Amp
<i>I_{apd}</i>	Tatsächliche Anodenstrom <i>spitze</i> bei doppelgipfeligen (ingesattel- ten) Stromkuppen	Amp
<i>I_{a1p}</i>	Amplitude der Grundschiwingung der Anodenstromkuppe	Amp
<i>I_{a2p}</i>	Amplitude der zweiten Harmonischen der Anodenstromkuppe	Amp
<i>I_e</i>	Durchschnittliche Emissionsspitzenwerte des Kathodenstromes	Amp
<i>I_f</i>	Heizstrom einer Oszillatrorröhre	Amp
<i>I_g</i>	Gittergleichstrom (arithmet. Mittelwert)	Amp
<i>I_{gp}</i>	Gipfelwert der Gitterstromkuppe	Amp
<i>I_H</i>	Effektivwert des Stromes in einer Heizspule	Amp
<i>I_k</i>	Kathodengleichstrom	Amp
<i>I_{kp}</i>	Gipfelwert der Kathodenstromkuppe („Kathodenspitzenstrom“)	Amp
<i>I_w</i>	Effektivwert des Stromes im zu erwärmenden Werkstück	Amp
<i>j</i>	Sättigungsstromdichte	Amp/cm ⁻²
<i>k</i>	Kopplungsfaktor	
<i>K</i>	Kosten/Anwärmgut	Pfg/kg
<i>K_R</i>	Röhrenkosten	Pfg/kWh

K_s	Strompreis	Pfg/kWh
K_u	Energiekosten bezogen auf Ausgang des Umformers	DM
l	Länge	cm
L	Induktivität	Henry
M	Gegeninduktivität	Henry
N	Leistung	Watt, kW
N_f	Spez. Flächenleistung	Watt/cm ²
N_g	Gesamtleistung	Watt, kW
N_L	Leerlaufleistung	Watt, kW
N_n	Nennleistung des Umformers	Watt, kW
N_s	Spez. Leistung	Watt/cm ³
P_a	Anodenverlustleistung	Watt
P_f	Heizleistung einer Oszillatorröhre	Watt
P_g	Gitterverlustleistung	Watt
P_{gs}	Gittersteuerleistung	Watt
P_{ia}	Anodeneingangsleistung	Watt
P_o	Ausgangsleistung an der Anode	Watt
P_{oN}	Nutzleistung an der Anode einer Oszillatorröhre (Gittersteuerleistung bereits abgezogen)	
Q	Wärmeinhalt	cal, Cal
Q_e	Wärmeinhalt in elektr. Einheiten	Watt · sek
r	Radius	cm
R	Widerstand	Ohm
R_a	Reelle Komponente des Arbeitswiderstandes für die Grundschwingung, mit Einschluß der Kreis- und Leitungsverluste, transformiert auf die Anoden-Kathoden-Strecke („Anoden-Außenwiderstand“ je Röhre)	Ohm
R_{a-a}	Aperiodischer Außenwiderstand von Anode zu Anode bei Gegentakt-schaltung	Ohm
R_g	Gitter(ableit)widerstand	Ohm
R_i	Innerer Widerstand der Anoden-Kathoden-Strecke	
R_{iL}	Für die Grenzleistung „maßgeblicher“ Innenwiderstand (nach Urteil)	Ohm
s	Eindringtiefe	cm
S	Steilheit einer Oszillatorröhre	mA/V
t	Zeit	sek
t_H	Heizzeit	sek
t_p	Pausenzeit	sek
T	Periodendauer = $\frac{1}{f}$	sek
u	Momentanwert einer (sinusförmigen) veränderlichen Spannung	Volt
u_a	Anodenspannung, Momentanwert	Volt
u_f	Heizspannung, Momentanwert	Volt
U	Effektivwert einer (sinusförmigen) veränderlichen Spannung	Volt
U_A	Stoffabhängiger Spannungswert als Maß für die Austrittsarbeit der Elektronen	Volt
U_a	Anodengleichspannung (Speisespannung)	Volt
U_{ap}	Amplitude der Anodenwechselspannung (HF) (meist gleichgesetzt U_{a1p} Grundschwingung)	Volt
$U_{ap\ min}$	Anodenwechselspannung mit Gleichspannungskomponente, Talwert („Anodenrestspannung“)	Volt
U_f	Heizspannung, Effektivwert	Volt
U_g	Gittergleichspannung	Volt
$ -U_g $	Positiv gerechneter Zahlenwert der (negativen) Gittergleichspannung	Volt

U_{gp}	Amplitude der Gitterwechselspannung	Volt
$U_{gp,max}$	Gitterwechselspannung mit Gleichspannungskomponente, positiver Gipfelwert	Volt
U_{gv}	Verschiebungsspannung des ideellen Anoden-Stromflußesatzes	Volt
U_h	Hall-Spannung	Volt
U_H	Effektivwert der Spannung am Eingang der Heizwicklung	Volt
v	Geschwindigkeit	
w	Windungszahl	
X	Reaktanz	Ohm
Z	Impedanz	Ohm
α	Temperaturkoeffizient	
η	(Anoden-) Wirkungsgrad	
η_n	Wirkungsgrad bei Nennlast	
η_t	Wirkungsgrad bei Teillast	
η_u	Übertragungswirkungsgrad ab Umformer Ausgang	
ϑ	Temperatur	°C
Θ	Durchflutung	Amp
Θ_n	Halber Stromflußwinkel der Anodenstromkuppe	
Θ_g	Halber Stromflußwinkel der Gitterstromkuppe	
κ	Leitwert	Siemens
κ_i	Suszeptibilität	
λ	Wellenlänge	m oder cm
	Wärmeleitfähigkeit	cal · cm ⁻¹ · sek ⁻¹ · °C ⁻¹
μ	Verstärkungskoeffizient	
	Permeabilität	
ρ	Spez. Widerstand	Ohm · cm
φ	Phasenwinkel	
φ_a	(Anoden-) Verlustfunktion	
$\varphi_{a,0,9}$	(Anoden-) Verlustfunktion bei Spannungsaussteuerung = 0,9	
Φ	Magn. Induktionsfluß	Volt · sek
χ_a	Halbe Anodenstromaussteuerung	
χ_g	Halbe Gitterstromaussteuerung	
ψ_a	Reziproker Anodenstromfaktor	
ψ_g	Reziproker Gitterstromfaktor	
ω	Kreisfrequenz	sek ⁻¹