

Hans-Werner Zoch  
Günter Spur

# Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten



HANSER

Zoch, Spur

**Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten**

# Edition | Handbuch der Fertigungstechnik

Herausgegeben

von Prof. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Günter Spur



Handbuch  
Urformen



Handbuch  
Umformen



Handbuch Spanen



Handbuch  
Wärmebehandeln  
und Beschichten



Handbuch Fügen, Handhaben,  
Montieren

Hans-Werner Zoch  
Günter Spur

# Handbuch Wärme- behandeln und Beschichten

Edition | Handbuch der Fertigungstechnik

HANSER

*Die Herausgeber:*

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch

Prof. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Günter Spur †

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-42779-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-43003-7

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag, München 2015

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Cornelia Rothenaicher

Satz: Christopher Hayes, Berlin

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelillustration: Frank Wohlgemuth, Hamburg

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: FIRMENGRUPPE APPL, aprinta druck GmbH, Wemding

Printed in Germany

## Vorwort des Bandherausgebers

Wärmebehandeln und Beschichten sind Prozesse im Fertigungsablauf, die die Eigenschaften von Bauteilen maßgeblich verändern. Die Wärmebehandlung vermag die Festigkeitseigenschaften metallischer Werkstoffe in einem Ausmaß zu beeinflussen wie kein anderes Fertigungsverfahren. Dabei sind sowohl eine sehr hohe Schwingfestigkeit oder Verschleißbeständigkeit mögliche Ziele als auch ein gutes Umform- oder Zerspanverhalten. Nach den Hauptgruppen der DIN 8580 Fertigungsverfahren zählt die Wärmebehandlung zu den Stoffeigenschaft ändernden Verfahren, deren übergreifendes Kennzeichen ist, am Bauteil von außen nicht immer sichtbar zu sein. Eine korrekt durchgeführte Wärmebehandlung erfordert daher eine präzise Prozessführung mit oft zahlreichen Parametern und eine Charakterisierung des erzeugten Werkstoffzustandes, der meist mit zerstörenden, aber oft auch zerstörungsfreien Methoden erfolgt.

Moderne werkstofftechnische Konzepte sehen häufig eine Funktionstrennung zwischen den Struktureigenschaften der Werkstoffe wie Steifigkeit, Grundfestigkeit und den Eigenschaften der Randschicht vor. Diese Randschichteigenschaften werden neben Verfahren der Randschichtwärmebehandlung oft durch geeignete, den Einsatzbedingungen angepasste Beschichtungsverfahren eingestellt. Die Bandbreite reicht hier von polymeren oder anorganischen Schichten wie Lacken oder Emails bis hin zu reibungsarmen oder hoch verschleißfesten Schichten, die über Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) aufgebracht werden. Das Gebrauchsverhalten solcher Schichten wird ganz wesentlich von den Schichteigenschaften wie Schichthärte oder Schichthaftung bestimmt, die mit spezifischen physikalischen oder technologischen Prüfverfahren charakterisiert werden.

Gegenüber der Erstauflage aus dem Jahr 1986 haben sich der Gesamtherausgeber, Professor Spur, der das Erscheinen dieses Bandes leider nicht mehr erlebt hat, Verlag und Bandherausgeber entschieden, die beiden Bände Wärmebehandeln und Beschichten in einem einzigen Band zusammenzufassen. Dies drückt auch die enge Verbindung dieser beiden Prozesse aus, denn sehr häufig erfordert eine hohe Tragfähigkeit einer Beschichtung, z. B. bei Kontaktbeanspruchung, eine zuvor durchgeführte festigkeitssteigernde Wärmebehandlung, um ein Einbrechen der modernen, teilweise sehr dünnen Schichten zu verhindern.

Im vorliegenden Handbuch werden die Grundlagen der Wärmebehandlung und Wärmebehandlungstechnik zusammengefasst und die in der Praxis eingesetzten thermischen und thermochemischen Verfahren der durchgreifenden und Randschichtwärmebehandlung für Stahl- und Eisengusswerkstoffe sowie Nicht-eisenmetalle mit dem Schwerpunkt auf Leichtmetalle erläutert. Neben den Prozessparametern wird besonderes Gewicht auf die sich einstellenden Gefüge und Werkstoff- und Bauteileigenschaften gelegt.

Das Beschichten zeigt eine sehr große Anwendungsvielfalt. Sowohl hinsichtlich der aufzubringenden Schichtwerkstoffe, der gewünschten Schichtdicken als auch der Wirkprinzipien der Verfahren reichen die Möglichkeiten hier von durch Auftragschweißen aufgetragenen Dickschichten bis zu galvanischen oder physikalischen/chemischen Dünnschicht-Verfahren. Eine erfolgreiche Auswahl von Beschichtungswerkstoff und -verfahren setzt dabei eine sorgfältige Beanspruchungsanalyse voraus, die häufig, wie bei tribologisch beanspruchten Schichten, eine eingehende Systembetrachtung erfordert.

Dieses Handbuch wurde nur durch eine umfangreiche Zusammenarbeit mit zahlreichen Fachkollegen und Experten aus Industrie und Wissenschaft möglich, wofür allen an dieser Stelle herzlich gedankt wird. Ein besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. Rainer Tinscher, dem Oberingenieur der Werkstofftechnik im IWT, für seine hervorragende Unterstützung bei der Koordination der Buchbeiträge, aber auch fachliche Unterstützung als Autor. Dem Carl Hanser Verlag, namentlich Herrn Volker Herzberg danke ich sehr herzlich für die professionelle Begleitung bei der Erstellung des Buches, seine umfangreiche Unterstützung und auch Geduld bei der Fertigstellung. Möge dieses Handbuch die Zielsetzung des Gesamtherausgebers erfüllen und damit zahlreichen Lesern als zuverlässiges Nachschlagewerk für die tägliche Praxis gute Dienste leisten.

Bremen, im Juni 2015

Hans-Werner Zoch



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Bandherausgebers .....	V
Die Herausgeber .....	XVII
Autorenverzeichnis .....	XIX
<b>I Beschichten .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einführung in die Beschichtungstechnik .....</b>	<b>3</b>
1.1 Allgemeines .....	5
1.2 Einteilung der beschichtenden Fertigungsverfahren .....	8
1.3 Bedeutung der beschichtenden Fertigungsverfahren .....	10
<b>2 Grundlagen des Beschichtens .....</b>	<b>13</b>
2.1 Vorbedingungen für den Einsatz von Beschichtungsverfahren .....	15
2.2 Grundlagen des Erzeugens metallischer Schichten .....	17
2.3 Grundlagen des Erzeugens von Schichten aus anorganisch-nichtmetallischen Stoffen .....	19
2.4 Grundlagen des Erzeugens organischer hochpolymerer Schichten .....	25
<b>3 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand .....</b>	<b>35</b>
3.1 Allgemeines .....	37
3.2 Aufdampfen .....	39
3.2.1 Grundlagen .....	39
3.2.2 Technologie .....	43
3.2.2.1 Verdampfer .....	43
3.2.2.1.1 Widerstandsheizung .....	43
3.2.2.1.2 Induktive Heizung .....	43
3.2.2.1.3 Elektronenstrahlverdampfer .....	43
3.2.2.2 Verdampfen von verschiedenen Materialien .....	44
3.2.2.3 Vorteile und Nachteile des Verfahrens .....	46
3.2.3 Anwendungen .....	47
3.3 Sputtern .....	48
3.3.1 Grundlagen .....	48
3.3.2 Schichteigenschaften .....	52
3.3.3 Sputtern von verschiedenen Materialien .....	53
3.3.4 Vor- und Nachteile des Verfahrens .....	54
3.3.5 Anwendungen .....	55
3.4 Plasma- und ionengestützte Schichtabscheidung durch Verdampfungsverfahren .....	58
3.4.1 Grundlagen .....	58
3.4.1.1 Verdampfung .....	58
3.4.1.2 Plasma und Ionenströme .....	59
3.4.1.2.1 Niederdruckplasma .....	59
3.4.1.2.2 Physikalische und technische Aspekte der Plasmaerzeugung .....	60
3.4.1.3 Grundlagen des Beschichtungsprozesses .....	62
3.4.1.3.1 Zonen beim plasma- und ionengestützten PVD-Prozess .....	62
3.4.1.3.2 Wirkung von hochenergetischen Teilchen .....	62



3.4.2	Beschichtungsverfahren .....	64
3.4.2.1	Elektronenstrahlverdampfung mit Plasma- und Ionenaktivierung .....	64
3.4.2.1.1	Physikalische Grundlagen .....	65
3.4.2.1.1.1	Elektronenstrahlverdampfer .....	65
3.4.2.1.1.2	Plasma- und Ionenaktivierung bei der Elektronenstrahlverdampfung .....	66
3.4.2.1.2	Technische Realisierung: Beispiel optische Beschichtung .....	68
3.4.2.2	Bogenentladungsverdampfung .....	68
3.4.2.2.1	Anodische Bogenentladungsverdampfung mit Trärgas .....	69
3.4.2.2.1.1	Hohlkathoden-Bogenentladungsverdampfung (HKBEV) .....	69
3.4.2.2.1.2	Niedervolt-Bogenentladungsverdampfung (NVBEV) .....	71
3.4.2.2.2	Vakuum-Bogenentladungsverdampfung (VBEV) .....	72
3.4.2.3	Laserstrahlverdampfung (PLD) .....	77
3.4.3	Der technologische Prozess .....	79
3.4.3.1	Beschichtbare Materialien .....	79
3.4.3.2	Oberflächenkonditionierung .....	80
3.4.3.3	Beschichtungsprozess .....	81
3.4.3.4	Schichtdickenverteilung .....	81
3.5	Beschichten durch Plasmapolymerisation .....	83
3.5.1	Einleitung .....	83
3.5.1.1	Allgemeines und Begriffsbestimmung .....	83
3.5.1.2	Historisches .....	84
3.5.2	Grundlagen .....	84
3.5.2.1	Zusammensetzung technischer Plasmen .....	85
3.5.2.2	Monomere .....	85
3.5.2.2.1	Kohlenwasserstoffe .....	85
3.5.2.2.2	Monomere mit funktionellen Gruppen .....	86
3.5.2.2.3	Siliziumorganische Verbindungen .....	86
3.5.2.2.4	Fluorkohlenstoffe .....	86
3.5.2.3	Innere Parameter der Plasmaphase .....	87
3.5.2.4	Mechanismen der Plasmapolymerisation .....	88
3.5.2.5	Operative Einflussfelder .....	88
3.5.2.5.1	Die Substrate .....	88
3.5.2.5.2	Die Reaktoren .....	89
3.5.2.5.3	Der Stoffeintrag .....	89
3.5.2.5.4	Der Energieeintrag .....	89
3.5.3	Besondere Eigenschaften von Plasmapolymere .....	90
3.5.4	Apparatives .....	90
3.5.5	Anwendungen .....	91
3.5.6	Ausblick .....	92
3.6	Beschichten durch chemisches Abscheiden aus der Gasphase .....	94
3.6.1	Allgemeines .....	94
3.6.2	Grundlagen .....	94
3.6.3	Technologie .....	98
3.6.4	Anwendung und Bedeutung .....	100
<b>4</b>	<b>Beschichten aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand .....</b>	<b>107</b>
4.1	Nichtmetallisches organisches Beschichten - Lackieren .....	109
4.1.1	Allgemeines .....	109
4.1.2	Vorbehandlung .....	109
4.1.3	Lacksysteme .....	114
4.1.4	Spritzlackieren ohne elektrostatische Lackaufladung .....	122
4.1.5	Sprühen mit elektrostatischer Lackaufladung .....	125
4.1.6	Tauchlackieren .....	128
4.1.7	Fluten .....	132
4.1.8	Walzen, Gießen und Rakeln .....	133

4.1.9	Schleuderlackierung.....	134
4.1.10	Vakuumlackieren .....	134
4.1.11	Zentrifugieren und Trommeln.....	134
4.1.12	Streichen und Rollen .....	134
4.1.13	Bandbeschichten .....	135
4.2	Nichtmetallisches anorganisches Beschichten – Emaillieren.....	137
4.2.1	Definitionen und allgemeine Technologie.....	137
4.2.2	Allgemeine Grundlagen .....	137
4.2.3	Einteilung der Emails .....	139
4.2.4	Metallsubstrate für die Emaillierung.....	140
4.2.5	Emailfritte .....	140
4.2.6	Emaillierverfahren.....	141
4.2.6.1	Nassauftragen.....	141
4.2.6.1.1	Konventionelle Nass-Auftragsverfahren.....	141
4.2.6.1.2	Nass-Auftragsverfahren im elektrischen Feld.....	141
4.2.6.2	Trockenauftragen .....	142
4.2.7	Nachbehandlung, Anwendung und Prüfung von Emaillierungen .....	143
4.3	Metallisches Beschichten.....	144
4.3.1	Thermisches Spritzen.....	144
4.3.1.1	Allgemeines .....	144
4.3.1.2	Spritzgerechtes Konstruieren und Technische Zeichnungen.....	146
4.3.1.3	Vorbehandlung der Bauteiloberfläche .....	147
4.3.1.4	Grundwerkstoffe .....	148
4.3.1.5	Zusatzwerkstoffe.....	148
4.3.1.6	Thermische Spritzverfahren.....	151
4.3.1.6.1	Drahtflammspritzen .....	151
4.3.1.6.2	Pulverflammspritzen.....	152
4.3.1.6.3	Hochgeschwindigkeitsflammspritzen .....	152
4.3.1.6.4	Hochgeschwindigkeitsdrahtflammspritzen .....	154
4.3.1.6.5	Lichtbogendrahtspritzen.....	155
4.3.1.6.6	Plasmaspritzen .....	156
4.3.1.6.7	Kaltgasspritzen.....	156
4.3.1.6.8	Weitere Spritzverfahren.....	157
4.3.1.7	Prozessüberwachung.....	158
4.3.1.8	Nachbehandlung .....	160
4.3.1.9	Prüfung von Spritzschichten.....	161
4.3.1.10	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz.....	162
4.3.1.11	Anwendungen.....	162
4.3.2	Schmelztauchen .....	165
4.3.2.1	Allgemeines .....	165
4.3.2.2	Die wichtigsten Schmelztauchverfahren.....	165
4.3.2.3	Grundlagen .....	166
4.3.2.4	Schmelztauchwerkstoffe.....	167
4.3.2.5	Metallträger .....	167
4.3.2.6	Schmelztauchverfahren .....	168
4.3.2.7	Eigenschaften der Schmelztauchüberzüge .....	172
4.3.2.8	Weiterverarbeitung von Werkstücken mit Schmelztauchüberzug und schmelztauchveredelten Feinblechen.....	174
4.4	Sol-Gel-Beschichtungsverfahren .....	175
4.4.1	Einleitung.....	175
4.4.2	Die Solsynthese .....	176
4.4.3	Die Sol-Applikation .....	179
4.4.4	Die Wärmebehandlung.....	181
4.4.5	Anwendungen.....	184

<b>5</b>	<b>Beschichten aus dem ionisierten Zustand durch elektrolytische oder chemische Abscheidung</b> .....	189
5.1	Grundlagen .....	191
5.2	Technologie .....	193
5.2.1	Fertigungsablauf .....	193
5.2.2	Vorbehandlung .....	197
5.2.3	Prozessparameter .....	200
5.2.3.1	Elektrolytische Abscheidung.....	200
5.2.3.2	Außenstromlose Abscheidung .....	202
5.2.4	Prozesskontrolle.....	203
5.2.5	Nachbehandlung .....	205
5.3	Galvanische Überzüge.....	206
5.3.1	Anwendungsspezifische Schichttypen.....	206
5.3.2	Schichteigenschaften und Qualitätskontrolle.....	208
5.4	Umweltaspekte.....	211
5.4.1	Ressourcenschonung.....	211
5.4.2	Verwendung giftiger oder schädlicher Komponenten.....	212
<b>6</b>	<b>Beschichten aus dem festen Zustand</b> .....	217
6.1	Pulverbeschichten .....	219
6.1.1	Allgemeines .....	219
6.1.2	Pulverlackssysteme.....	219
6.1.2.1	Herstellung von Pulverlacken.....	219
6.1.2.2	Duroplaste und Thermoplaste .....	220
6.1.3	Pulverbeschichtungsverfahren.....	224
6.1.3.1	Allgemeines .....	224
6.1.3.2	Pulversinterverfahren .....	225
6.1.3.3	Elektrostatische Pulverbeschichtungsverfahren .....	225
6.2	Metallplattieren.....	230
6.2.1	Plattierverfahren .....	230
6.2.2	Weiterverarbeitung von plattiertem Halbzeug .....	235
6.2.3	Eigenschaften und Einsatzgebiete von Plattierungen .....	236
6.3	Folienbeschichten.....	238
6.3.1	Allgemeines/Einleitung.....	238
6.3.2	Vorbehandlung der Substratoberfläche.....	238
6.3.3	Beschichtungsverfahren und -systeme.....	239
6.3.4	Applikationstechnik .....	240
<b>7</b>	<b>Beschichten durch Schweißen</b> .....	243
7.1	Allgemeines .....	245
7.2	Verfahrensgrundlagen.....	245
7.3	Auftragschweißverfahren .....	246
7.3.1	Schmelzschweißverfahren mit thermischer Aktivierung.....	246
7.3.2	Schmelzschweißverfahren mit radiativer Aktivierung.....	249
7.3.3	Schmelzschweißverfahren mit mechanischer Aktivierung .....	250

<b>II</b>	<b>Wärmebehandlung der Metalle</b> .....	253
<b>1</b>	<b>Einführung in die Wärmebehandlung</b> .....	255
1.1	Allgemeines .....	257
1.2	Bedeutung der Wärmebehandlung.....	258
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Wärmebehandlung</b> .....	261
2.1	Allgemeines .....	263
2.2	Wärmeübertragung.....	263
2.3	Gitterstörungen .....	264
2.4	Umwandlungen im festen Zustand .....	269
2.5	Erholung und Rekristallisation .....	272
2.6	Eindiffusion von Fremdelementen .....	276
2.7	Oxidationsvorgänge.....	278
2.8	Bauteilgestalt und Wärmebehandlung – Entstehung von Spannungen, Eigenspannungen, Maß- und Formänderungen .....	281
2.8.1	Begriffsdefinitionen der Maß- und Formänderungen und der Eigenspannungen .....	282
2.8.2	Messen von Maß- und Formänderungen und Eigenspannungen .....	284
2.8.3	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten des Entstehens von Maß- und Formänderungen sowie Eigenspannungen .....	285
2.8.4	Einfluss vor- und nachgeschalteter Fertigungsoperationen auf den Verzug und die resultierende Eigenspannungsverteilung .....	288
2.8.5	Einfluss des Werkstoffs auf die Maß- und Formänderungen .....	290
2.8.6	Charakteristische Maß- und Formänderungsmechanismen und Eigenspannungszustände für verschiedene Wärmebehandlungsverfahren .....	293
2.8.7	Konstruktionseinfluss auf die Verzugsentstehung.....	300
2.8.8	Simulation von Wärmebehandlungsprozessen .....	301
<b>3</b>	<b>Wärmebehandlungsanlagen und -öfen</b> .....	305
3.1	Übersicht der Wärmebehandlungsprozesse und -anlagen .....	307
3.1.1	Wärmebehandlungsprozesse .....	307
3.1.2	Klassifikation der Thermoprozessanlagen .....	309
3.1.3	Thermische Verfahren .....	309
3.1.4	Ofenart .....	309
3.1.5	Gutlagerung .....	312
3.1.6	Erwärmungsprinzip.....	312
3.1.7	Hüllmittel .....	314
3.1.8	Produktionsbereich.....	314
3.2	Anlagen zur Erwärmung und Wärmebehandlung von Stählen und NE-Metallen .....	315
3.3	Erwärmung des Gutes .....	318
3.3.1	Ebene Wand mit Konvektion .....	321
3.3.2	Unendlich langer Zylinder mit Konvektion .....	321
3.4	Beheizung von Industrieöfen .....	323
3.4.1	Brenner für Industrieöfen.....	323
3.4.2	Elektrische Widerstandsbeheizung.....	326
3.5	Energetische Beurteilung von Industrieöfen .....	328
3.5.1	Bilanzen.....	328
3.5.2	System und Systemgrenzen .....	329
3.5.3	Definition von Wirkungsgraden .....	330

<b>4</b>	<b>Wärmebehandlung von Stählen</b> .....	<b>335</b>
4.1	Einführung.....	337
4.2	Thermische Verfahren.....	338
4.2.1	Einfluss einer Zeit-Temperatur-Folge auf den Gefügestand der Eisenwerkstoffe.....	338
4.2.2	Glühen.....	348
4.2.2.1	Diffusionsglühen.....	348
4.2.2.2	Grobkornglühen.....	348
4.2.2.3	Rekristallisationsglühen.....	349
4.2.2.4	Normalglühen.....	350
4.2.2.5	Weichglühen und GKZ-Glühen.....	351
4.2.2.6	TH- und FP-Glühen.....	353
4.2.2.7	Spannungsarmglühen.....	354
4.2.3	Martensitisches Härten.....	355
4.2.4	Anlassen.....	364
4.2.5	Bainitisieren.....	367
4.2.6	Eigenschaften wärmebehandelter Bauteile und Werkzeuge.....	369
4.2.7	Praxis des Härten, Bainitisierens, Anlassens und Vergütens.....	371
4.2.7.1	Vorbereiten und Vorbehandeln, Spannungsarmglühen und Vorvergüten.....	371
4.2.7.2	Härten, Anlassen und Vergüten von Bauteilen.....	371
4.2.7.3	Härten und Anlassen von Werkzeugen.....	373
4.2.7.4	Anlassen.....	376
4.2.7.5	Bainitisieren.....	376
4.2.8	Wärmebehandlungsmittel.....	377
4.2.9	Anlagen zum Wärmebehandeln.....	379
4.2.10	Hinweise zum Richten.....	380
4.2.11	Hinweise für die Konstruktion.....	381
4.2.12	Mängel durch Fehler beim Härten und Anlassen.....	381
4.2.13	Hinweise zum Prüfen der wärmebehandelten Bauteile und Werkzeuge.....	382
4.2.14	Randschichthärten.....	384
4.2.14.1	Randschichthärten und Anlassen zum Verbessern der Gebrauchseigenschaften von Bauteilen und Werkzeugen aus Stahl.....	384
4.2.14.1.1	Ziel des Randschichthärtens und Anlassens.....	384
4.2.14.1.2	Ablauf des Randschichthärtens.....	384
4.2.14.2	Prinzip des Randschichthärtens und Anlassens.....	384
4.2.14.2.1	Austenitisieren.....	384
4.2.14.2.2	Abschrecken.....	385
4.2.14.2.3	Anlassen randschichtgehärteter Werkstücke.....	385
4.2.14.3	Eigenschaften randschichtgehärteter Werkstücke.....	385
4.2.14.3.1	Härte und Härteprofil – Einhärtungstiefe.....	385
4.2.14.3.2	Festigkeitsverhalten.....	385
4.2.14.3.3	Verschleißverhalten.....	386
4.2.14.4	Durchführung des Randschichthärtens.....	386
4.2.14.4.1	Flammhärten.....	386
4.2.14.4.2	Induktionshärten.....	390
4.2.14.4.3	Laserstrahlhärten.....	399
4.2.14.4.4	Elektronenstrahlhärten.....	404
4.2.14.4.5	Weitere Verfahren.....	406
4.2.14.5	Praxis des Randschichthärtens.....	408
4.2.14.5.1	Werkstoffauswahl.....	408
4.2.14.5.2	Vorbehandeln und Vorbereiten der Werkstücke.....	408
4.2.14.5.3	Hinweise zum Abschrecken.....	408
4.2.14.5.4	Angaben und Darstellung in Zeichnungen.....	409
4.2.14.5.5	Hinweise zum Prüfen randschichtgehärteter Werkstücke.....	410
4.2.14.5.6	Nachbehandlung.....	411
4.2.14.6	Hinweise zum Vermeiden fehlerhafter randschichtgehärteter Werkstücke.....	411
4.2.14.6.1	Wärmebehandlungsgerechte Formgestaltung.....	411
4.2.14.6.2	Wärmebehandlungsgerechter Werkstoff- und Ausgangszustand.....	412

4.2.14.6.3	Fehler beim Wärmebehandeln .....	415
4.2.14.7	Schleifhärten.....	417
4.3	Thermochemische Verfahren .....	424
4.3.1	Allgemeines .....	424
4.3.2	Einsatzhärten.....	424
4.3.2.1	Grundlagen .....	424
4.3.2.2	Aufkohlungsvorgang .....	426
4.3.2.3	Aufkohlungsmedien.....	431
4.3.2.4	Carbonitrieren .....	438
4.3.2.5	Prüfung des Einsatzhärtungsergebnisses.....	442
4.3.2.6	Einsatzhärbarkeit .....	445
4.3.2.7	Eigenschaften einsatzgehärteter Teile .....	446
4.3.2.8	Begleiterscheinungen beim Einsatzhärten .....	448
4.3.3	Nitrieren und Nitrocarburieren .....	459
4.3.3.1	Grundlagen .....	459
4.3.3.2	Gasnitrieren und Gasnitrocarburieren.....	465
4.3.3.3	Plasmanitrieren und Plasmanitrocarburieren.....	468
4.3.3.4	Salzbadnitrocarburieren .....	470
4.3.3.5	Prüfen nitrierter/nitrocarburierter Werkstücke .....	470
4.3.3.6	Eigenschaften .....	472
4.3.3.7	Einflüsse vorangegangener Arbeitsgänge - Vorbehandeln und Vorbereiten.....	477
4.3.4	Borieren .....	480
4.3.4.1	Grundlagen, Eigenschaften .....	480
4.3.4.2	Verfahrenstechnik.....	480
4.3.4.3	Vor- und Nachbehandlung der Werkstücke .....	481
4.3.4.4	Schichtdicke, Schichttypen .....	481
4.3.4.5	Werkstoffe .....	481
4.3.4.6	Anwendungsbeispiele .....	483
4.3.4	Eindiffundieren metallischer Elemente.....	486
4.3.5.1	Grundlagen .....	486
4.3.5.2	Technischer Aspekt.....	487
4.3.5.3	Systeme für Temperaturanwendungen.....	489
4.3.5.4	Systeme zum Verschleißschutz.....	492
4.4	Thermomechanische Verfahren.....	495
<b>5</b>	<b>Wärmebehandlung von Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffen.....</b>	<b>503</b>
5.1	Unterschiede in der Wärmebehandlung von Gusseisenwerkstoffen und Stahl.....	505
5.1.1	Eisenbasis-Gusswerkstoffe.....	506
5.1.1.1	Bezeichnung der Gusseisenwerkstoffe mit Kurznamen .....	507
5.2	Wärmebehandlung von Stahlguss.....	508
5.3	Wärmebehandlung von naheutektischem Gusseisen .....	510
5.3.1	Eutektische Erstarrung in dem System Fe-C-Si .....	510
5.3.2	Allgemeine Wärmebehandlungsschritte für Silizium-legierte Gusseisensorten .....	511
5.3.2.1	Austenitisieren von Fe-C-Si-Legierungen (Hochtemperaturglühung).....	513
5.3.2.2	Temperglühen: Graphitisierungsglühen .....	514
5.3.2.3	Temperglühen zu schwarzem Temperguss .....	514
5.3.2.4	Glühfrischen zu weißem Temperguss.....	516
5.4	Wärmebehandlungsprozesse für graphithaltige Gusseisenwerkstoffe .....	517
5.4.1	Austenitisieren graphithaltiger Gusswerkstoffe.....	519
5.4.2	Eutektoidisches Umwandeln .....	520
5.4.3	Ferritisierungsglühen, Weichglühen .....	521
5.4.3.1	Ferritisierung von Temperguss.....	521
5.4.3.2	Ferritglühung von Gusseisen mit Kugelgraphit.....	521
5.4.4	Normalglühen, Perlitglühen.....	523
5.4.4.1	Perlitisieren von Gusseisen mit Lamellengraphit.....	523

5.4.4.2	Perlitglühen von Temperguss.....	525
5.4.4.3	Perlitglühen von Kugelgraphitguss.....	527
5.5	Härten und Vergüten von Gusseisen .....	528
5.5.1	Abschrecken in die Martensitstufe .....	528
5.5.1.1	Härten von Temperguss .....	529
5.5.1.2	Härten von Gusseisen mit Kugelgraphit .....	530
5.5.2	Abschrecken und Anlassen (Martemp: Vergüten).....	532
5.5.3	Bainitvergütung (Zwischenstufenvergüten).....	533
5.5.3.1	ADI-Behandlung von Gusseisen mit Kugelgraphit (Ausferritisieren).....	537
5.5.4	Vergüten von verschleißbeständigem, legiertem Gusseisen.....	541
5.5.4.1	Vergüten von Hartguss.....	541
5.5.4.2	Vergüten von Chrom legierten Sondergusseisen .....	543
5.6	Spannungsarmglühen von Gusskomponenten .....	547
5.7	Randschichthärten von Gusseisenkomponenten.....	548
5.7.1	Einsatzbereiche für Gusseisenkomponenten .....	548
5.7.2	Induktionshärten von Gusswerkstoffen .....	549
5.7.3	Flammhärten von Gusswerkstoffen .....	549
5.7.4	Umschmelzhärten von Gusseisen .....	549
5.7.5	Elektronenstrahlhärten, Laserstrahlhärten .....	550
<b>6</b>	<b>Wärmebehandlung von Nichteisenmetalllegierungen .....</b>	<b>553</b>
6.1	Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen.....	555
6.1.1	Legierungssysteme des Aluminiums.....	555
6.1.2	Glühverfahren für Aluminiumlegierungen.....	556
6.1.2.1	Spannungsarmglühen von Aluminiumlegierungen .....	556
6.1.2.2	Erholung und Rekristallisationsglühen von Aluminiumlegierungen.....	557
6.1.2.3	Weichglühen von Aluminiumlegierungen .....	559
6.1.3	Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen.....	559
6.1.4	Wärmebehandlungssimulation von Aluminiumlegierungen.....	567
6.2	Wärmebehandlung von Magnesiumlegierungen .....	569
6.2.1	Legierungssysteme des Magnesiums .....	569
6.2.2	Glühverfahren für Magnesiumlegierungen .....	569
6.2.3	Ausscheidungshärten von Magnesiumlegierungen .....	569
6.3	Wärmebehandlung von Titanlegierungen.....	572
6.3.1	Legierungssysteme des Titans .....	572
6.3.2	Glühverfahren für Titanlegierungen .....	573
6.3.2.1	Spannungsarmglühen von Titanlegierungen .....	573
6.3.2.2	Weichglühen und Rekristallisationsglühen von Titanlegierungen .....	574
6.3.2.3	β-Glühen von Titanlegierungen .....	576
6.3.3	Härteverfahren für Titanlegierungen.....	576
6.3.3.1	Martensitisches Härten von Titanlegierungen.....	576
6.3.3.2	Ausscheidungshärten von Titanlegierungen .....	578
<b>III</b>	<b>Mechanische Randschichtverfestigungsverfahren.....</b>	<b>581</b>
<b>1</b>	<b>Mechanische Randschichtverfestigungsverfahren – Grundlagen.....</b>	<b>583</b>
1.1	Einleitung.....	585
1.2	Kenngrößen des Randschichtzustandes.....	585
1.3	Auswirkungen des Randschichtzustandes bei zyklischer Beanspruchung.....	585
1.3.1	Auswirkungen auf das Wechselverformungsverhalten .....	585
1.3.2	Auswirkungen auf das Rissinitierungs- und Rissausbreitungsverhalten.....	586
1.3.3	Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit .....	587