

Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

# **Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung**

Herausgegeben von  
Dietmar Aurich, Karl-Heinz Kloos,  
Günter Lange und Eckard Macherauch

Forschungsbericht

 **WILEY-VCH**

**DFG**

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

*Jürgen Tobolski*

## Einführung

*Dietmar Aurich, Karl-Heinz Kloos, Günter Lange,  
Eckard Macherauch*

## 1 Thermoelastische Spannungen

1.1	Spannungen und Spannungsintensitätsfaktoren in Verbunden aus unterschiedlichen Werkstoffen bei thermischer Belastung	
	<i>Dietrich Munz, Ying Yuan Yang</i> . . . . .	1
1.1.1	Einleitung . . . . .	1
1.1.2	Allgemeine Form des Spannungsfelds . . . . .	2
1.1.3	Spannungsfeld bei zwei singulären Termen . . . . .	4
1.1.4	Spannungsverteilung bei komplexen Eigenwerten . . . . .	5
1.1.5	Einfluß der Geometrie eines Zweistoffverbunds auf den Spannungsintensitätsfaktor . . . . .	6
1.1.6	Stoffverbunde mit einer Zwischenschicht . . . . .	8
1.1.7	Spannungsverteilung bei innen liegenden Ecken . . . . .	12
1.1.8	Spannungsintensitätsfaktoren von grenzflächennahen Rissen . . . . .	14
1.1.9	Bewertung der Spannungen . . . . .	16
1.1.10	Zusammenfassung . . . . .	19
1.1.11	Literatur . . . . .	19
1.2	Bruchmechanische Bewertung von Grenzflächenrissen in thermisch eigengespannten 2-D und 3-D Bimaterialien unter Einsatz der FE-Methode	
	<i>Klaus Herrmann, Torsten Hauck</i> . . . . .	21
1.2.1	Einleitung . . . . .	21
1.2.2	Problemstellung . . . . .	23

## Inhaltsverzeichnis

1.2.3	Lösung eines Anfangs-Randwertproblems der Wärmeleitungsgleichung . . . . .	24
1.2.4	Thermoelastoplastische Spannungsanalyse . . . . .	26
1.2.5	Bruchmechanische Bewertung der Eigenspannungsnahfelder . . . . .	29
1.2.6	Grenzflächenrißausbildung in einem dreidimensionalen elastoplastischen Verbundkörper . . . . .	30
1.2.7	Zusammenfassung . . . . .	35
1.2.8	Literatur . . . . .	36
<b>2</b>	<b>Thermomechanisch bedingte Eigenspannungen</b>	
2.1	Entstehung von Eigenspannungen bei der thermomechanischen Behandlung des Stahls 42 CrMo 4 – Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen <i>Lothar Werner Meyer, Siegfried Lippmann, Andreas Weise, Friedhold Kunz, Ulrich Thieme, Hartmut Ansorge . . . . .</i>	37
2.1.1	Einleitung . . . . .	37
2.1.2	Versuchsbedingungen . . . . .	38
2.1.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	39
2.1.3.1	Vorbemerkungen . . . . .	39
2.1.3.2	Einfluß des Umformgrads . . . . .	40
2.1.3.3	Einfluß der Entfestigung des verformten Austenits . . . . .	42
2.1.3.4	Einfluß der Abkühlintensität des Abkühlmittels . . . . .	42
2.1.3.5	Einfluß der Randabkühlung . . . . .	44
2.1.4	Numerische Simulationen . . . . .	44
2.1.5	Simulationsergebnisse . . . . .	48
2.1.5.1	Umformung und Gefügeentwicklung . . . . .	48
2.1.5.2	Längsspannungsentwicklung beim Abkühlen . . . . .	49
2.1.5.3	Einfluß der Randabkühlung . . . . .	54
2.1.6	Zusammenfassung . . . . .	57
2.1.7	Literatur . . . . .	58
2.2	Tiefemperatur-Autofrettage: Erzeugung einer für pulsierende Innendruckbeanspruchung von dickwandigen Rohren aus austenitischem, rost-freiem Stahl optimalen Eigenspannungsverteilung <i>Haël Mughrabi, Bernhard Donth, Hua Feng, Gerhard Vetter . . . . .</i>	59
2.2.1	Einleitung . . . . .	59
2.2.2	Versuchswerkstoffe und Versuchseinrichtungen . . . . .	60
2.2.3	Finite-Elemente-Modellierung (FEM) . . . . .	61
2.2.4	Ergebnisse . . . . .	62
2.2.4.1	Modellierung und Messung der Eigenspannungen nach Autofrettage . . . . .	62

## Inhaltsverzeichnis

2.2.4.2	Ermüdungsverhalten der autofrettierten dickwandigen Rohre unter pulsierendem Innendruck. . . . .	66
2.2.5	Zusammenfassung . . . . .	68
2.2.6	Literatur . . . . .	68
<b>3</b>	<b>Härtungs- und Nitriereigenspannungen</b>	
3.1	Verzugs-, Spannungs- und Eigenspannungsausbildung beim Tauchkühlen abgesetzter Stahlzylinder – Simulation und Experiment <i>Martin Ehlers, Hermann Müller, Detlef Löhe</i> . . . . .	70
3.1.1.	Einleitung. . . . .	70
3.1.2	Versuchswerkstoff, Probengeometrie und Versuchseinrichtung . . . . .	72
3.1.3	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen . . . . .	74
3.1.4	Ergebnisse der Simulationen . . . . .	75
3.1.5	Diskussion und Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen . . . . .	80
3.1.6	Zusammenfassung . . . . .	81
3.1.7	Literatur . . . . .	82
3.2	Einfluß des Wärmeübergangs beim Gasabschrecken austenitisierter Stahlzylinder auf die Spannungs-, Eigenspannungs- und Verzugsausbildung <i>Ralf Kübler, Hermann Müller, Detlef Löhe</i> . . . . .	83
3.2.1	Einleitung. . . . .	83
3.2.2	Mechanismus der konvektiven Wärmeübertragung . . . . .	84
3.2.3	Versuchswerkstoffe und Probengeometrie . . . . .	86
3.2.4	Versuchseinrichtung . . . . .	87
3.2.5	Versuchsergebnisse. . . . .	88
3.2.6	Simulationsergebnisse. . . . .	91
3.2.7	Diskussion und Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen . . . . .	93
3.2.8	Zusammenfassung . . . . .	96
3.2.9	Literatur . . . . .	97
3.3	Entstehung und Ursachen von Eigenspannungen beim Gasnitrieren <i>Doris Günther, Ute Kreft, Thomas Hirsch, Franz Hoffmann, Peter Mayr</i> . . . . .	98
3.3.1	Einleitung. . . . .	98
3.3.2	Versuchseinrichtung . . . . .	99
3.3.3	Versuchswerkstoffe . . . . .	100
3.3.4	Begleitende Untersuchungen . . . . .	101

## Inhaltsverzeichnis

3.3.5	Röntgenographische Eigenspannungsmessung . . . . .	101
3.3.6	Nitrierparameter und Behandlungsablauf. . . . .	102
3.3.7	Versuchsergebnisse und Diskussion . . . . .	103
3.3.7.1	Eigenspannungsentstehung in unlegierten Stählen. . . . .	103
3.3.7.2	Eigenspannungsentstehung in chromlegierten Stählen . . . .	107
3.3.8	Zusammenfassung . . . . .	112
3.3.9	Literatur . . . . .	113
3.4	Restaustenit- und Eigenspannungsverteilung in tiefgekühlten, einsatzgehärteten Gefügen <i>Christoph Genzel, Walter Reimers, Oliver Schwarz, Johann Grosch.</i> . . . . .	114
3.4.1	Einleitung. . . . .	114
3.4.2	Versuchswerkstoffe und Versuchseinrichtungen . . . . .	115
3.4.2.1	Werkstoffe und Wärmebehandlung . . . . .	115
3.4.2.2	Röntgendiffraktometrie . . . . .	115
3.4.3	Versuchsergebnisse. . . . .	116
3.4.3.1	Phasenanalyse . . . . .	116
3.4.3.2	Eigenspannungen . . . . .	117
3.4.3.3	Mikrostruktur des Martensits. . . . .	121
3.4.4	Diskussion . . . . .	123
3.4.5	Zusammenfassung . . . . .	124
3.4.6	Literatur . . . . .	125
3.5	Eignung der exzentrischen Hohlprobe zur Analyse von Zusammenhängen zwischen Bauteilgröße, Stahlsorte, Eigenspannungen, Verzug und Reißempfindlichkeit beim Härten <i>Horst Binas, Wolfgang Vorwald, Helmut Walter, Werner Schuler</i> . . . . .	126
3.5.1	Einleitung. . . . .	126
3.5.2	Probenform und Stahlsorten . . . . .	127
3.5.3	Meßgrößen und Versuchseinrichtungen . . . . .	129
3.5.4	Ergebnisse und Diskussion. . . . .	130
3.5.4.1	Verzug . . . . .	130
3.5.4.2	Eigenspannungsverteilungen . . . . .	131
3.5.4.3	Flankierende Untersuchungen . . . . .	137
3.5.5	Zusammenfassung . . . . .	140
3.5.6	Literatur . . . . .	140
3.6	Versagensverhalten durchgreifend wärmebehan- delter und gerichteter, bauteilähnlicher Proben <i>Volker Tomala, Thomas Hirsch, Franz Hoffmann, Peter Mayr</i> . . . .	141
3.6.1	Einleitung. . . . .	141
3.6.2	Versuchswerkstoffe, Probenformen und Wärmebehandlung . .	141

## Inhaltsverzeichnis

3.6.3	Versuchsdurchführung . . . . .	145
3.6.4	Versuchsergebnisse . . . . .	146
3.6.5	Diskussion . . . . .	155
3.6.6	Zusammenfassung . . . . .	158
3.6.7	Literatur . . . . .	158
<b>3.7</b>	<b>Mikro- und Makroeigenspannungen von Stählen nach Härten und Anlassen</b>	
	<i>Bertram Hoffmann, Otmar Vöhringer . . . . .</i>	160
3.7.1	Einleitung . . . . .	160
3.7.2	Versuchswerkstoffe . . . . .	161
3.7.3	Versuchsdurchführung und -auswertung . . . . .	162
3.7.4	Versuchsergebnisse . . . . .	163
3.7.4.1	0,2-%-Stauchgrenze . . . . .	163
3.7.4.2	Verzerrungen und Domänen Größen . . . . .	164
3.7.4.3	Makroeigenspannungen . . . . .	166
3.7.5	Diskussion . . . . .	167
3.7.5.1	Verzerrungen . . . . .	167
3.7.5.2	Versetzungsdichten . . . . .	168
3.7.5.3	Widerstandsanteile an der 0,2-%-Stauchgrenze . . . . .	169
3.7.5.4	Abbauverhalten der Makroeigenspannungen im Vergleich zu den Mikro eigenspannungen . . . . .	171
3.7.6	Zusammenfassung . . . . .	172
3.7.7	Literatur . . . . .	173
<b>4</b>	<b>Fügebedingte Eigenspannungen und Verzug</b>	
<b>4.1</b>	<b>Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen dicker Bleche</b>	
	<i>Winfried Dahl, Ulrich Dilthey, Peter Weirich, Jörg de Payrebrune . . . . .</i>	175
4.1.1	Einleitung . . . . .	175
4.1.2	Schweißverbindungen und Versuchswerkstoffe . . . . .	176
4.1.2.1	Schweißverbindungen . . . . .	176
4.1.2.2	Versuchswerkstoffe . . . . .	177
4.1.3	Prüfverfahren . . . . .	179
4.1.3.1	Messungen während des Schweißens . . . . .	179
4.1.3.2	Eigenspannungsmessungen nach dem Zerlegeverfahren . . . . .	182
4.1.3.3	Bruchmechanische Prüfverfahren . . . . .	184
4.1.4	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	187
4.1.4.1	Messungen während des Schweißens . . . . .	187
4.1.4.2	Eigenspannungsbestimmungen nach dem Zerlegeverfahren . . . . .	192
4.1.4.3	Vergleich der Spannungsbestimmungen nach dem Online- und dem Zerlegeverfahren . . . . .	195
4.1.4.4	Bruchmechanikversuche . . . . .	196
4.1.5	Schlußfolgerungen . . . . .	198

## Inhaltsverzeichnis

4.1.6	Zusammenfassung . . . . .	199
4.1.7	Literatur . . . . .	200
4.2	<b>Werkstoff-, Verfahrens- und Geometrieinflüsse auf den schweißbedingten Verzug</b>	
	<i>Reinhold Ritter, Helmut Wohlfahrt, Fan Zhang</i> . . . . .	202
4.2.1	Einleitung . . . . .	202
4.2.2	Versuchswerkstoffe und Versuchsdurchführung . . . . .	204
4.2.3	V Versuchsergebnisse . . . . .	205
4.2.3.1	Verzugsbeeinflussende Faktoren und Meßgrößen . . . . .	205
4.2.3.2	Verfahrensbedingte Einflüsse . . . . .	206
4.2.3.3	Geometriebedingte Einflüsse . . . . .	212
4.2.3.4	Werkstoffeinflüsse . . . . .	214
4.2.4	Verzugsmessungen mit optischen Feldmeßverfahren . . . . .	220
4.2.4.1	Allgemeines . . . . .	220
4.2.4.2	Eingesetzte Feldmeßverfahren . . . . .	220
4.2.4.3	Verzugsmessungen an stumpfgeschweißten Platten . . . . .	223
4.2.5	Zusammenfassung . . . . .	230
4.2.6	Literatur . . . . .	232
4.3	<b>Spannungen und Eigenspannungen beim Schweißen und Flammrichten hochfester Feinkornbaustähle</b>	
	<i>Horst Herold, Norbert Woywode, Jörg Pieschel</i> . . . . .	233
4.3.1	Einleitung . . . . .	233
4.3.2	Versuchsbedingungen und -durchführung . . . . .	234
4.3.2.1	Versuchswerkstoffe . . . . .	234
4.3.2.2	Probengeometrie und -vorbereitung . . . . .	237
4.3.2.3	Versuchseinrichtung und -durchführung . . . . .	237
4.3.2.4	Eigenspannungs- und Reaktionsspannungsmessung . . . . .	240
4.3.3	V Versuchsergebnisse . . . . .	244
4.3.4	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	248
4.3.5	Literatur . . . . .	250
4.4	<b>Zum Einfluß von Eigenspannungen und Mikro- struktur auf die Kaltrißneigung hochfester Stähle</b>	
	<i>Carsten Lachmann, Thomas Nitschke-Pagel, Helmut Wohlfahrt</i> . . . . .	252
4.4.1	Einleitung . . . . .	252
4.4.2	Versuchsprogramm . . . . .	254
4.4.2.1	Versuchswerkstoffe und Probenherstellung . . . . .	254
4.4.2.2	Versuche und Auswertemethoden . . . . .	256
4.4.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	258
4.4.3.1	Eigenspannungszustände nach dem Schweißen . . . . .	258
4.4.3.2	Mikrostruktur nach dem Schweißen . . . . .	260

## Inhaltsverzeichnis

4.4.3.3	Makroeigenspannungszustand in der Umgebung eines Kaltrisses . . . . .	262
4.4.3.4	Mikrostruktur im Rißbereich . . . . .	264
4.4.4	Schlußfolgerungen . . . . .	267
4.4.5	Literatur . . . . .	269
4.5	Eigenspannungsentstehung in flammricht- typischen Wärmefeldern <i>Hamdollah Eslami-Chalandar, Manfred Kaßner, Thomas Nitschke-Pagel, Helmut Wohlfahrt . . . . .</i>	270
4.5.1	Einleitung . . . . .	270
4.5.2	Versuchsprogramm . . . . .	271
4.5.2.1	Versuchswerkstoffe . . . . .	271
4.5.2.2	Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung . . . . .	272
4.5.3	V Versuchsergebnisse . . . . .	274
4.5.3.1	Experimentelle und rechnerische Modelluntersuchungen an Blechen mit einer zentralen kreisförmigen Erhitzungszone . . . . .	274
4.5.3.2	Modelluntersuchungen an Blechen mit trapezförmigen Erhit- zungszonen . . . . .	278
4.5.3.3	Eigenspannungsmessungen an eingespannten Schweißproben . . . . .	283
4.5.4	Zusammenfassung . . . . .	289
4.5.5	Literatur . . . . .	290
4.6	Einfluß von Eigenspannungen auf die Schwing- festigkeit geschweißter Feinkornbaustähle <i>Thomas Nitschke-Pagel, Helmut Wohlfahrt . . . . .</i>	291
4.6.1	Einleitung . . . . .	291
4.6.2	Versuchsprogramm . . . . .	295
4.6.2.1	Versuchswerkstoffe . . . . .	295
4.6.2.2	Probenformen und Schweißausführung . . . . .	295
4.6.2.3	Eigenspannungsmessungen, Schwingfestigkeitsversuche und begleitende Untersuchungen . . . . .	296
4.6.3	Untersuchungsergebnisse . . . . .	298
4.6.3.1	Versuche an Proben . . . . .	298
4.6.3.2	Versuche an Bauteilproben . . . . .	302
4.6.4	Diskussion . . . . .	305
4.6.5	Zusammenfassung . . . . .	306
4.6.6	Literatur . . . . .	307
4.7	Eigenspannungen und Versagen von Lötver- bunden aus Hartmetall und Stahl mit gesteins- bohrerähnlicher Geometrie <i>Berthold Schreieck, Bernd Eigenmann, Detlef Löhe . . . . .</i>	309
4.7.1	Einleitung . . . . .	309
4.7.2	Versuchswerkstoffe und Proben . . . . .	310



## Inhaltsverzeichnis

4.7.3	Durchführung der Untersuchungen . . . . .	312
4.7.4	Untersuchungsergebnisse . . . . .	314
4.7.4.1	Eigenspannungszustände . . . . .	314
4.7.4.2	Versagensverhalten bei schwingender Beanspruchung . . . . .	320
4.7.5	Zusammenfassung . . . . .	323
4.7.6	Literatur . . . . .	324
<b>5</b>	<b>Reibschweißbedingte Eigenspannungen</b>	
5.1	Gefügezustand und Eigenspannungen von Reibschweißverbindungen zwischen ferritisch-perlitischen und ferritisch-austenitischen Stählen <i>Thomas Hirsch, Ines Bujak, Heiko Junge, Helmut Horn, Peter Mayr</i> . . . . .	325
5.1.1	Einleitung . . . . .	325
5.1.2	Werkstoffe und Durchführung der Schweißversuche . . . . .	326
5.1.3	Versuchsdurchführung . . . . .	327
5.1.4	Versuchsergebnisse . . . . .	328
5.1.5	Diskussion . . . . .	338
5.1.6	Zusammenfassung . . . . .	343
5.1.7	Literatur . . . . .	343
5.2	Mikrospannungen durch Verformung und Wärmeeinfluß sowie ihre Kombination beim Reibschweißen <i>Herfried Behnken, Viktor Hauk</i> . . . . .	345
5.2.1	Einleitung . . . . .	345
5.2.2	Werkstoffe und Probenpräparation . . . . .	347
5.2.3	Meßtechnik . . . . .	351
5.2.4	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	351
5.2.4.1	Mikrospannungen in Reibschweißungen . . . . .	351
5.2.4.2	Einflußgrößen auf die Mikrospannungen bei X 2 CrNiMoN 22-5 . . . . .	356
5.2.4.3	Folgerungen . . . . .	361
5.2.5	Zusammenfassung . . . . .	362
5.2.6	Literatur . . . . .	363
<b>6</b>	<b>Laserstrahlbedingte Eigenspannungen</b>	
6.1	Eigenspannungsentwicklung beim Laserstrahlschweißen <i>Andreas Otto, Andreas Kach, Manfred Geiger</i> . . . . .	365
6.1.1	Einleitung . . . . .	365
6.1.2	Eigenspannungsentwicklung beim Laserstrahlschweißen geradliniger Nähte . . . . .	366

## Inhaltsverzeichnis

6.1.3	Eigenspannungsentwicklung beim Laserstrahlschweißen von 3D-Konturelementen . . . . .	372
6.1.4	Zusammenfassung . . . . .	375
6.1.5	Literatur . . . . .	377
6.2	Bestimmung von Eigenspannungen nach Randschichtschmelzen und Schweißen mit Laserstrahlung	
	<i>Klaus Müller, Hans Wilhelm Bergmann</i> . . . . .	378
6.2.1	Einleitung . . . . .	378
6.2.2	Lösungsansatz . . . . .	379
6.2.3	Experimentelles Vorgehen . . . . .	381
6.2.3.1	Auswahl des Versuchswerkstoffs . . . . .	381
6.2.3.2	Versuchsdurchführung . . . . .	381
6.2.4	Ergebnisse und Diskussion. . . . .	382
6.2.4.1	Erstarrungsverhalten . . . . .	382
6.2.4.2	Eigenspannungen beim Randschichtschmelzen . . . . .	384
6.2.4.3	Schweißen von I-Nähten. . . . .	384
6.2.5	Zusammenfassung . . . . .	390
6.2.6	Literatur . . . . .	390
<b>7</b>	<b>Thermisch bedingte Mikroeigenspannungen</b>	
7.1	Thermoelastische Eigenspannungen in weißem Gußeisen	
	<i>Sylvia Hartmann, Henner Ruppertsberg</i> . . . . .	392
7.1.1	Einleitung . . . . .	392
7.1.2	Grundlagen der röntgenographischen Spannungsanalyse (RSA). . . . .	393
7.1.3	Kontinuumsmechanische Berechnung von Eigenspannungen	394
7.1.4	Versuchswerkstoffe . . . . .	396
7.1.5	Versuchseinrichtungen . . . . .	397
7.1.6	Versuchsergebnisse. . . . .	399
7.1.7	Diskussion . . . . .	401
7.1.8	Zusammenfassung . . . . .	405
7.1.9	Literatur . . . . .	405
7.2	Mikromagnetische Ermittlung von thermisch induzierten Eigenspannungen in Stählen und weißem Gußeisen	
	<i>Iris Altpeter, Roman Becking, Rolf Kern, Michael Kröning, Sylvia Hartmann</i> . . . . .	407
7.2.1	Einleitung . . . . .	407
7.2.2	Grundlagen . . . . .	408
7.2.2.1	Eigenspannungen in zweiphasigen Werkstoffen . . . . .	408

## Inhaltsverzeichnis

7.2.2.2	Magnetisches Barkhausenrauschen . . . . .	409
7.2.2.3	Röntgenspannungsanalyse . . . . .	410
7.2.3	Versuchswerkstoffe . . . . .	411
7.2.4	Versuchseinrichtungen . . . . .	412
7.2.4.1	Barkhausenrauschmessungen. . . . .	412
7.2.4.2	Barkhausenrauschmikroskopie . . . . .	412
7.2.4.3	Röntgenspannungsanalyse . . . . .	413
7.2.5	Versuchsergebnisse und Diskussion . . . . .	413
7.2.5.1	Röntgenspannungsanalyse . . . . .	413
7.2.5.2	Mikromagnetische Analysen . . . . .	415
7.2.6	Zusammenfassung . . . . .	424
7.2.7	Literatur . . . . .	425
7.3	Charakterisierung thermischer Mikroei- gennspannungen in partikelverstärkten Metallmatrix- verbundwerkstoffen durch Experimente und Simulation <i>Anke Pyzalla, Hans Berns, Alfons Fischer</i> . . . . .	427
7.3.1	Einleitung. . . . .	427
7.3.2	Berechnungen . . . . .	428
7.3.2.1	Analytische Berechnungen. . . . .	428
7.3.2.2	Numerische Berechnungen . . . . .	430
7.3.3	Experimentelle Verfahren . . . . .	431
7.3.3.1	Auswahl geeigneter Verfahren und Versuchswerkstoffe . . . . .	431
7.3.3.2	Mikro-Moiré-Verfahren . . . . .	432
7.3.3.3	Röntgenbeugung . . . . .	435
7.3.3.4	Neutronenbeugung . . . . .	437
7.3.3.5	Torsionspendelversuche . . . . .	438
7.3.4	Zusammenfassung . . . . .	439
7.3.5	Literatur . . . . .	441
7.4	Thermisch induzierte Veränderungen der Mikro- struktur ferritisch-austenitischer Duplex-Stähle und deren Einfluß auf den Eigenspannungs- zustand <i>Michael Pohl, Andreas Bracke</i> . . . . .	442
7.4.1	Einleitung. . . . .	442
7.4.2	Versuchswerkstoffe . . . . .	443
7.4.3	Versuchseinrichtungen . . . . .	443
7.4.3.1	Ermittlung der thermisch induzierten Verformung . . . . .	443
7.4.3.2	Quantitative Gefügebeschreibung. . . . .	444
7.4.3.3	Eigenspannungsmessung . . . . .	444
7.4.4	Versuchsergebnisse. . . . .	445
7.4.4.1	Thermisch induzierte Verformungen. . . . .	445
7.4.4.2	Thermisch bedingte Veränderungen der Mikrostruktur . . . . .	446

## Inhaltsverzeichnis

7.4.4.3	Einfluß der thermischen Verformung auf den Eigenspannungszustand . . . . .	449
7.4.5	Diskussion . . . . .	451
7.4.6	Zusammenfassung . . . . .	455
7.4.7	Literatur . . . . .	456
<b>8</b>	<b>Bewertung von Eigenspannungsanalysen mit der Bohrlochmethode</b>	
8.1	Analyse von Abschreck- und Verformungseigenspannungen mittels Bohrloch- und Röntgenverfahren	
	<i>Martin Kornmeier, Berthold Scholtes</i> . . . . .	457
8.1.1	Einleitung und Kenntnisstand . . . . .	457
8.1.2	Untersuchte Werkstoffzustände . . . . .	458
8.1.3	Durchführung der Versuche . . . . .	460
8.1.3.1	Abschreckversuche . . . . .	460
8.1.3.2	Zug- und Biegeversuche. . . . .	460
8.1.3.3	Verfahren und Parameter zur Eigenspannungsanalyse . . . . .	461
8.1.3.4	Röntgenographische und mechanische Bestimmung der Dehnungs- bzw. Spannungsauslösung beim Bohrlochverfahren . . . . .	462
8.1.4	Versuchsergebnisse. . . . .	463
8.1.4.1	Eigenspannungstiefenverläufe abgeschreckter Proben . . . . .	463
8.1.4.2	Eigenspannungstiefenverläufe zug- und biegeverformter Proben . . . . .	466
8.1.4.3	Ergebnisse kombinierter röntgenographischer und mechanischer Dehnungsmessungen . . . . .	468
8.1.5	Diskussion . . . . .	470
8.1.6	Zusammenfassung . . . . .	472
8.1.7	Literatur . . . . .	473
8.2	Eigenspannungsanalyse in Schichtwerkstoffverbunden mit einer modifizierten Bohrlochmethode	
	<i>Thomas Schwarz, Hans Kockelmann, Horst-Dieter Tietz, Steffen Böhm</i> . . . . .	475
8.2.1	Einleitung. . . . .	475
8.2.2	Vorgehensweise nach der Bohrlochmethode . . . . .	476
8.2.2.1	Prinzip und praktische Durchführung . . . . .	476
8.2.2.2	Auswerteverfahren für homogene Werkstoffe . . . . .	478
8.2.2.3	Erweiterung auf schichtweise aufgebaute Werkstoffe. . . . .	482
8.2.2.4	Finite-Elemente-Berechnungen . . . . .	482
8.2.3	Auswertemethodik zur Eigenspannungsermittlung . . . . .	485
8.2.4	Verifikation der entwickelten Auswertemethodik . . . . .	489
8.2.5	Zusammenfassung . . . . .	492
8.2.6	Literatur . . . . .	492