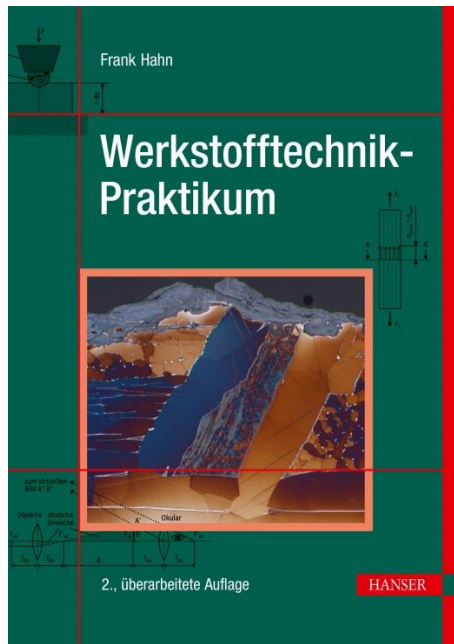


HANSER



Leseprobe

zu

Werkstofftechnik - Praktikum

von Frank Hahn

Print-ISBN: 978-3-446-47242-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47048-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472426>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das Fach „Werkstofftechnik“ ist Bestandteil vieler technischer Studienrichtungen, wie z. B. Maschinen- und Fahrzeugbau, Mechatronik, Wirtschaftsingenieurwesen. Darüber hinaus werden Auszubildende in zahlreichen Lehrberufen mit den Grundlagen der Werkstofftechnik vertraut gemacht. Ziel der Ausbildung ist es, fundamentale Zusammenhänge über Zusammensetzung, Struktur, Gefüge und Eigenschaften zu vermitteln, um im späteren Berufsleben eine zielgerichtete Bearbeitung und einen verantwortlichen und Ressourcen schonenden Einsatz der Werkstoffe zu gewährleisten.

An den Universitäten, Fachhochschulen und Berufsakademien werden die theoretischen Grundlagen in Vorlesungen und Seminaren vermittelt. Ein integriertes Praktikum soll die Studierenden/Auszubildenden mit den Methoden der Werkstoffprüfung vertraut machen. Dabei werden Werkstoffkennwerte bestimmt und die Ursachen für die Eigenschaften ermittelt und besprochen. Die oft komplexen Zusammenhänge lassen sich mit den durchgeführten Experimenten leichter verstehen und erlauben einen fachübergreifenden Überblick, erfordern aber eine ausreichende Vorbereitung von den Praktikumssteilnehmern.

An dieser Stelle setzt das vorliegende Buch an. Neben einer detaillierten Beschreibung des experimentellen Vorgehens sollen insbesondere die physikalischen, chemischen, mathematischen und die werkstofftechnischen Grundlagen gefestigt werden. Die Fragen zur Versuchsvorbereitung dienen der Überprüfung des Wissensstandes und können mit den Antworten im Anhang verglichen werden. Die Versuche werden in dieser Form seit einigen Jahren an der Hochschule Mittweida von den Studierenden der technischen Fachrichtungen durchgeführt und sind für eine Praktikumsdauer von je drei Stunden ausgelegt. Die Werkstoffe und Aufgaben können an anderen Ausbildungsorten variieren, aber die Vorbereitung und der Weg zur Lösung sind in der Regel identisch. Modelllösungen, vorbereitete Tabellen für die Messwerterfassung und Auswerteroutinen sollen nicht nur die Auswertung vereinfachen, sie sollen auch aufzeigen, dass bei der Werkstoffprüfung alle relevanten Daten und Fakten zur Probe, zum Werkstoff und Versuchsablauf erfasst werden müssen, um eine spätere Beurteilung der Versuchsergebnisse zu erlauben.

Für die zweite Auflage wurden die Inhalte aktualisiert, das Praktikum „Ermüdung und Schwingfestigkeit“ wurde grundsätzlich überarbeitet. Alle Praktika sind jetzt sowohl in gedruckter Form als auch als E-PDF einzeln erhältlich.

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Seidel, der mich zum Schreiben des Buches ermuntert und den Text kritisch durchgesehen hat. Ich danke Herrn Andreas Eysert von der Hochschule Mittweida für die zahlreichen metallographischen Aufnahmen und für den fachlichen Rat beim Kapitel „Metallographie“, Frau Angela Bergner für die Unterstützung bei der Erstellung der Grafiken und Herrn Enrico Gehrke für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen.

Mittweida, im Juli 2021

Frank Hahn

Inhalt

1	Thermische Analyse – Zustandssysteme	13
1	Einleitung	15
2	Ziel des Praktikums	17
3	Theoretische Voraussetzungen	18
4	Grundlagen	19
	4.1 Phasenumwandlungen	19
	4.2 Keimbildung und -wachstum	20
	4.3 Legierungsstrukturen	24
	4.4 Grundtypen der Zweistoffsysteme	27
	4.4.1 Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand	30
	4.4.2 Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und Unlöslichkeit im festen Zustand	35
	4.4.3 Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – eutektisches System	39
	4.4.4 Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – peritektisches System	42
	4.4.5 Zweistoffsystem mit intermetallischer Phase	44
	4.4.6 Phasenumwandlungen im festen Zustand	45
	4.5 Das Gesetz der abgewandten Hebelarme	46
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	48
6	Geräte und Hilfsmittel	50
7	Versuchsdurchführung	51
8	Praktikumsauswertung	52
9	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	54

2	Zugversuch an metallischen Werkstoffen	57
1	Einleitung	59
2	Ziel des Praktikums	60
3	Theoretische Voraussetzungen	61
4	Grundlagen	62
	4.1 Kraft und Spannung	62
	4.2 Verlängerung und Dehnung	63
	4.3 Zugproben	65
	4.4 Verfahrensprinzip	67
	4.5 Zugversuch – Verformungsbereiche und Auswertung	70
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	78
6	Geräte und Hilfsmittel	79
7	Versuchsdurchführung	80
8	Praktikumsauswertung	82
9	Modelllösungen	83
10	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	88
3	Metallographie – Probenpräparation und Lichtmikroskopie	91
1	Einleitung	93
2	Ziel des Praktikums	94
3	Theoretische Voraussetzungen	95
4	Grundlagen	96
	4.1 Die metallographische Probenpräparation	96
	4.1.1 Trennen	96
	4.1.2 Einfassen	98
	4.1.3 Schleifen und Polieren	100
	4.1.4 Reinigen und Trocknen der Probe	102
	4.1.5 Aufbau und Einstellung des Auflichtmikroskops	102
	4.1.6 Vergrößerung	107
	4.1.7 Auflösungsgrenzen der Lichtmikroskopie	110
	4.1.8 Gesamte förderliche Vergrößerung	114
	4.1.9 Kontrastierungsverfahren	114

4.2	Das metastabile Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	118
4.2.1	Reineisen	118
4.2.2	Phasen im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	119
4.2.3	Gefüge im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	123
4.2.4	Die Stahlecke im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm – Gefüge- umwandlung des Austenits bei der Abkühlung im thermodyna- mischen Gleichgewicht	125
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	131
6	Geräte und Hilfsmittel	132
7	Versuchsdurchführung	133
8	Praktikumsauswertung	135
9	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	136
4	Härteprüfung	139
1	Einleitung	141
2	Ziel des Praktikums	142
3	Theoretische Voraussetzungen	143
4	Grundlagen	144
4.1	Überblick	144
4.2	Härteprüfung nach Brinell HBW	144
4.3	Härteprüfung nach Vickers HV	149
4.4	Härteprüfung nach Rockwell Skala C HRC	154
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	158
6	Geräte und Hilfsmittel	159
7	Versuchsdurchführung	160
8	Praktikumsauswertung	163
9	Modelllösungen	164
10	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	168

5	Grundlagen der Wärmebehandlung von Stählen	169
1	Einleitung	171
2	Ziel des Praktikums	172
3	Theoretische Voraussetzungen	173
4	Grundlagen	174
4.1	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gefüge von Stählen	174
4.1.1	Das Dilatometerverfahren	174
4.1.2	Diffusionsgesteuerte Umwandlung des Austenits bei leicht erhöhter Abkühlgeschwindigkeit	175
4.1.3	Die Martensitbildung	179
4.1.4	Die Bainitbildung	182
4.1.5	Das Zeit-Temperatur-Umwandlungdiagramm	183
4.1.6	Einfluss von Legierungselementen auf die Umwandlung des Austenits bei der Abkühlung	189
4.2	Wärmebehandlung von Stahl	191
4.2.1	Begriffserklärung	191
4.2.2	Das Normalglühen	192
4.2.3	Das Härten	196
4.2.4	Charakterisierung der Härbarkeit	202
4.2.5	Anlassverhalten von Stählen	206
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	209
6	Geräte und Hilfsmittel	211
7	Versuchsdurchführung	212
8	Praktikumsauswertung	214
9	Modelllösungen	216
10	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	219
6	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	221
1	Einleitung	223
2	Ziel des Praktikums	224
3	Theoretische Voraussetzungen	225

4	Grundlagen	226
	4.1 Zähigkeit und Sprödigkeit	226
	4.2 Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	229
	4.3 Sprödes Werkstoffverhalten beim KBV	232
	4.4 Duktiles Werkstoffverhalten beim KBV	234
	4.5 Der Bruch beim KBV	236
	4.5.1 Sprödbbruch (Spaltbruch)	236
	4.5.2 Verformungsbruch	239
	4.5.3 Mischbruch	241
	4.6 Einflüsse auf die Zähigkeit	242
	4.7 Das Temperaturkonzept	244
5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	247
6	Geräte und Hilfsmittel	248
7	Versuchsdurchführung	249
8	Praktikumsauswertung	252
9	Modelllösungen	254
10	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	256
7	Ermüdung und Schwingfestigkeit	259
1	Einleitung	261
2	Ziel des Praktikums	262
3	Theoretische Voraussetzungen	263
4	Grundlagen	264
	4.1 Ermüdung	264
	4.2 Rissbildung und -wachstum unter schwingender Beanspruchung – Merkmale des Dauerbruchs	266
	4.3 Mechanische Schwingungen	269
	4.4 Einstufige Schwingfestigkeitsuntersuchungen – Wöhlerversuch	271
	4.4.1 Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit im Bereich der Zeitfestigkeit	274
	4.4.2 Bestimmung der Langzeitfestigkeit unter Berücksichtigung des Streubandes im Übergangsbereich	279
	4.5 Angabe der Langzeitfestigkeit	287
	4.6 Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith	288
	4.7 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	290

5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	293
6	Geräte und Hilfsmittel	294
7	Versuchsdurchführung	295
8	Praktikumsauswertung	301
9	Modelllösungen	302
10	Lösungen der Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung ...	311
	Index	313

1

Einleitung

Wie Ihnen aus der Physik und aus der Chemie bekannt ist, können Stoffe im Allgemeinen und Metalle im Besonderen in verschiedenen Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig) auftreten. Insbesondere im festen Zustand reicht der Aggregatzustand zur Beschreibung der Struktur des Werkstoffs nicht aus, da unterschiedliche Zustandsformen parallel vorliegen können. Deshalb ist es notwendig, den Begriff der Phase einzuführen. Eine Phase ist eine Zustandsform eines Stoffes, in der Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften eines Stoffes unter Gleichgewichtsbedingungen konstant sind. Sie ist ein in sich homogener Bestandteil eines Systems. Sollten im festen Zustand in einem Stoff mehrere feste Phasen nebeneinander auftreten, dann liegen Kristallite mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und kristalliner Struktur nebeneinander vor. Die unterschiedlichen Phasen werden durch Phasengrenzflächen voneinander getrennt. Je nachdem, welche Phasen in einem Stoffsystem auftreten, wie groß die Phasenbestandteile (Kristallite) sind und wie diese verteilt sind, werden die Eigenschaften des Stoffes beeinflusst.

Eine Phasenumwandlung ist nur möglich, wenn sich die Zustandsgrößen Druck, Temperatur und/oder Zusammensetzung der Legierung verändern. Aufgabe der thermischen Analyse ist es, Phasenumwandlungen zu untersuchen und Zustandsdiagramme aufzustellen. Die Ursache für eine Phasenumwandlung liegt im Bestreben des Stoffes, ein Minimum der freien Enthalpie zu erreichen. Wird beispielsweise eine metallische Schmelze abgekühlt und die Kristallisation beginnt, wird dadurch ein Zustand niedrigerer freier Enthalpie erreicht. Es wird Kristallisationswärme frei. Bei der thermischen Analyse werden während der Abkühlung die Temperatur und die Zeit gemessen. Die frei werdende Kristallisationswärme führt zu einer Unstetigkeitsstelle im Temperatur-Zeit-Verlauf. Bei reinen Stoffen wird ein Haltepunkt und bei vielen Legierungen ein Knickpunkt registriert. Solche Halte- und Knickpunkte im Temperatur-Zeit-Verlauf können eindeutig einer beginnenden oder abgeschlossenen Phasenumwandlung zugeordnet werden.

Legierungen sind Stoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen und überwiegend metallischen Charakter haben. Eine Komponente kann dabei ein reines chemisches Element (z. B. ein Metall) oder aber eine chemische Verbindung bzw. intermetallische Phase (z. B. Carbide, Nitride) sein. Wird einer geschmolzenen Legierung aus Blei und Zinn von außen mehr Blei zugegeben, ändert sich die Konzentration der Legierung. Das hat eine Änderung der Phasenumwandlung zur Folge, sodass die Kristallisation der Legierung bei höheren oder tieferen Temperaturen beginnt. Die bei der Kristallisation gebildeten festen Phasen können veränderte Eigenschaften (Gitterparameter, mechanische Eigenschaften) zeigen oder es können in Abhängigkeit vom Stoffsystem andere Phasen gebildet werden. Zustandsdiagramme geben Auskunft, welche Phasen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung (= Konzentration) und der Temperatur im Stoffsystem auftreten. Der Druck als weitere Zustandsgröße hat ebenfalls Einfluss auf die Phasenbildung, wird aber häufig konstant gehalten (Normaldruck = 101,3 kPa). Im Praktikum wird gezeigt, wie mit der thermischen

Analyse Zustandsdiagramme aufgestellt werden und wie Temperatur-Zeit-Verläufe bei der Abkühlung zu interpretieren sind.

Aus den Zustandsdiagrammen können Gießer ablesen, welche Temperaturen zum Schmelzen einer Legierung notwendig sind. Da die Eigenschaften einer Legierung von den Phasen und der Zusammenfügung der Phasen und Phasengemische abhängen, lassen sich aus den Zustandsdiagrammen auch Rückschlüsse auf die Stoffeigenschaften ziehen. Nicht zuletzt muss berücksichtigt werden, dass Wärmebehandlungsverfahren gezielt Phasenumwandlungen ausnutzen. Das Verständnis der Zustandsdiagramme ist deshalb entscheidende Grundlage für die Festlegung des Temperatur-Zeit-Regimes bei den meisten Wärmebehandlungsverfahren (z. B. Ausscheidungshärten von aushärtbaren Aluminiumlegierungen; Härten und Normalglühen bei Stählen).

2

Ziel des Praktikums

Unter thermischer Analyse versteht man ein Messverfahren, das aufgrund von Temperatur-Zeit-Verläufen bei der Abkühlung oder Erwärmung Rückschlüsse auf Zustandsänderungen von Metallen/Legierungen erlaubt. Die thermische Analyse ermöglicht das Aufstellen von Zustandsdiagrammen. Am Beispiel des Legierungssystems Pb – Sn, soll gezeigt werden, wie ein Zustandsdiagramm entsteht.

Ziel des Praktikums ist es, die Kenntnisse über Zustandsdiagramme und Phasenumwandlungen zu festigen. Durch Anwendung der Hebelbeziehung sollen die Phasenanteile in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Legierung und der Temperatur ermittelt werden. Metallographische Untersuchungen an den einzelnen Legierungen sollen den komplexen Zusammenhang von Erstarrungsvorgängen und dem entstehenden Gefüge unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung der Legierung verdeutlichen.

3

Theoretische Voraussetzungen

Für das Praktikum sind Vorkenntnisse erforderlich, die mithilfe von Lehrunterlagen oder von Fachliteratur überprüft werden können. Um Ihnen die Vorbereitung zu erleichtern, wird in Klammern das betreffende Kapitel aus

Seidel, W. W.; Hahn, E: Werkstofftechnik. – 11. Auflage (2018) – Carl Hanser Verlag München angegeben.

Überprüfen Sie Ihr Wissen zu folgenden Punkten:

- Kristallgitter von Metallen, Gittermerkmale (1.1.2)
- Gitterbaufehler (1.1.2.3)
- Zusammenhang von Gitter und Eigenschaften (1.1.2.4)
- Diffusion (1.4.2)
- Kristallisation (1.3.3)

4

Grundlagen

■ 4.1 Phasenumwandlungen

Wie bereits im Kapitel 1 ausgeführt, liegt die Ursache für eine Phasenumwandlung im Bestreben eines Stoffes einen Zustand niedriger freier Enthalpie zu erreichen. Gibt es bei einer bestimmten Temperatur T , einem Druck p und der vorgegebenen Konzentration c einen Zustand, der eine geringere freie Enthalpie aufweist, ist eine Phasenumwandlung möglich.

Die freie Enthalpie G ist eine thermodynamische Größe und ist wie folgt definiert:

$$G = H - T \cdot S \quad (1)$$

G freie Enthalpie

H Enthalpie

T Temperatur

S Entropie

In diese Gleichung geht zunächst die Enthalpie H als Summe der inneren Energie U (Gesamtheit von thermischer und chemischer Energie, also Bindungsenergie der Teilchen und Bewegungs-, Rotations- und Schwingungsenergie einschließlich der Energie der Elektronen) und der Volumenarbeit ein:

$$H = U + p \cdot V \quad (2)$$

U innere Energie

p Druck

V Volumen

$p \cdot V$ Volumenarbeit

Die Enthalpie H ist eine energetische Größe, die vereinfacht als Wärmehalt des Systems aufgefasst werden kann, die mit zunehmender Temperatur ansteigt. Die Entropie S , die ebenfalls in die freie Enthalpie G eingeht, ist ein Maß für den Ordnungszustand im System. Ein stoffliches System strebt nicht nur einen energiearmen Zustand an, sondern auch einen Zustand mit möglichst geringem Ordnungsgrad. Ein geordneter Zustand, wie er im Kristall vorliegt, ist unwahrscheinlicher als ein Zustand mit geringer Ordnung (Schmelze). Mit zunehmender Temperatur bewegen sich die Teilchen/Moleküle stärker und schneller, der Ordnungsgrad nimmt ab, wodurch die Entropie ansteigt. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass die freie Enthalpie G einer Phase nicht konstant ist. Allein weil sich durch eine höhere oder niedrigere Temperatur die Bewegungsenergie der Teilchen und auch der Ordnungsgrad im Stoffsystem ändert, muss sich auch die freie Enthalpie mit der Temperatur ändern (Bild 1). Der Anstieg der freien Enthalpie über der Temperatur verläuft für jede Phase charakteristisch.

Bei einer Betrachtung des Phasenübergangs von flüssig nach fest genügt es, bei einer konkreten Temperatur die Differenz der freien Enthalpie ΔG zwischen den Phasen zu untersuchen. Als Ausgangspunkt liegt ein reines Metall im geschmolzenen Zustand vor (Bild 1). Die

Index

A

α -Eisen 119
 α -Mischkristall 120
Abbildungsmaßstab des Objektivs 108
Abkühlen 191
Abkühlgeschwindigkeit, obere kritische 185 f.
–, untere kritische 186, 195
Abkühlmittel 199
Anfangslänge 63 f.
Anfangsmesslänge 75
Anfangsquerschnittsfläche 63, 75
Anlassen 206
Anlassstufe 206
Anlassversprödung 208
Anrissbildung 238
Anwärmen 191
 $\arcsin \sqrt{P_A}$ -Transformation 278
 $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation 283
Ätzen 115
Auhärtbarkeit 202
Aufflichtmikroskop 102
Auflösungsgrenzen der Lichtmikroskopie
110, 114
Ausdehnung, seitliche 240
Ausdehnungskoeffizient, thermischer 174
Außendurchmesser 63
Austauschmischkristall 24
Austenit 123, 126 f.

B

Bainit, oberer 182
–, unterer 182
Bainitisieren 183
Beanspruchungsgrad 146
begrenzte Löslichkeit im festen Zustand 39,
42
Beugung 110
Beugung am Doppelspalt 113
Beugungsbild 111 f.
Bezugssehweite 107
Biegung 231

Blausprödigkeit 208
Brechungszahl 112
Brinellhärteprüfung 144
Bruchdehnung 75
Brucheinschnürung 75
Bruchlastspielzahl 272

C

chemische Kontrastierung 115
Cottrell-Wolke 72
Curietemperatur 119

D

δ -Eisen 118
 δ -Ferrit 123
 δ -Mischkristall 120
Dauerbruch 266
Dauerfestigkeit 271, 273, 287
Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith 288
Dehnungsgeschwindigkeit 69
Dehnung 64, 69, 71
Differenzialinterferenzkontrast 116
Diffusion 23
Dilatometer 174
Druckschwellbereich 271
Dunkelfeldbeleuchtung 103
Durchwärmen 191
dynamische Härteprüfung 144

E

Einfassen 98
Einhärtbarkeit 199, 203
Einlagerungsmischkristall 25
einstufiger Schwingversuch 271
Eisen 118
Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 118
elastische Verformung 70
Elastizitätsmodul 71
elektrochemische Kontrastierung 115
Enthalpie 19
Entmischung 36

Entropie 19
 Ermüdung 261, 264
 Ermüdungsbruch 268
 Erstarrungsintervall 30
 eutektische Legierung 36
 eutektische Temperatur 36, 40
 eutektisches Gefüge 38
 eutektisches System 39
 eutektoid 45
 eutektoide Entmischung 128
 Extensometer 69
 Extensometermesslänge 69
 Extrusion 267

F

Ferrit 123, 126, 128, 178
 Flachzugprobe 67
 förderliche Vergrößerung 114
 freie Enthalpie 19

G

γ -Eisen 118
 γ -Mischkristall 120
 Gangunterschied 110
 Gefüge 93
 Gesamtvergrößerung des Mikroskops 107
 Gesetz der abgewandten Hebelarme 46
 Gewaltbruch 236, 268
 Gibbssche Phasenregel 27
 Gleichgewichtslinie 30
 Gleichmaßdehnung 73 f.
 gleichmäßig plastische Verformung 73
 Grenzschwingspielzahl 274

H

Halten 191
 Härbarkeit 202
 Härte 144
 Härten 182, 196
 Härteprüfung 141
 –, dynamische 144
 – nach Brinell 144
 – nach Rockwell 154
 –, statische 144
 Härtevergleichsplatte 160
 Härteverlaufskurve 205
 Hebelgesetz 46
 Hellfeldbeleuchtung 103, 115
 Hochlage 244
 Höchstkraft 74

Hookesche Gerade 70
 Hookesches Gesetz 70

I

inkongruent schmelzend 44
 Innendurchmesser 63
 instabiler Rissfortschritt 234
 instationäre Schwingung 269
 Interferenz 110
 interkristalliner Sprödbruch 238
 intermetallische Phase 25, 44
 Intrusion 267
 isothermes ZTU-Diagramm 189

K

Keimbildung 20
 Keimradius, kritischer 21 f.
 Keimwachstum 20
 Kerbschlagbiegeversuch 223
 Köhlern 105
 kongruent schmelzend 44
 Konode 32, 46
 Kontrastierung 114
 –, chemische 115
 –, elektrochemische 115
 –, optische 116
 Kornflächenätzung 115
 Korngrenzenätzung 115
 Kraft 62
 Kraftmessung 69
 Kristallgemisch 36, 41
 Kristallisation 20, 24
 Kristallkeim 20
 Kristallseigerung 33
 kritischer Keimradius 21 f.
 Kurzzeitfestigkeit 273

L

Länge, parallele 65
 Langzeitfestigkeit 271, 287
 Lattenmartensit 181
 Ledeburit I 124
 – II 124
 Legierung 15
 Liquiduslinie 31
 logarithmische Formänderung 64
 Löslichkeit 40
 Löslichkeitsgrenze 40
 Lüdersdehnung 72

M

Martensit 179
 Martensitbildung 179
 Martensitstarttemperatur 185
 Massivmartensit 181
 Materialographie 93
 Maximalspannung 270
 Messlänge nach dem Bruch 75
 Metallographie 93
 metallographische Probenpräparation 96
 Mikroskop, Gesamtvergrößerung 107
 –, Strahlengang 103
 Minimalspannung 270
 Mischbruch 241
 Mischungslücke 41
 Mittelspannung 270

N

Normalglühen 192
 Normalisieren 192
 Normalspannung 62
 numerische Apertur 113

O

obere kritische Abkühlgeschwindigkeit 185 f.
 obere Streckgrenze 72
 oberer Bainit 182
 Objektiv, Abbildungsmaßstab 108
 Objektivbezeichnung 113
 Oktaederlücke 180
 optische Kontrastierung 116

P

parallele Länge 65
 Pendelschlagwerk 230
 Peritektikum 43
 peritektische Reaktion 43
 peritektische Temperatur 43
 peritektisches System 42
 peritektoid 45
 Perlit 124, 128 f., 178
 Phase 15
 Phasenumwandlung 19
 Plattenmartensit 182
 Polarisationskontrast 116
 Polieren 101
 polymorph 45
 Primärzementit 124
 Probe 96

Probenbreite 63
 Probendicke 63
 Probendurchmesser 63
 Proportionalitätsfaktor 65
 Proportionalprobe 65

Q

Querschnittsfläche nach dem Bruch 75

R

Randschichthärten 196, 201
 Rastlinie 268
 Reineisen 126
 Restaustenit 206
 Restbruch 268
 Rissbildung 266
 Rissfortschritt, instabiler 234
 –, stabiler 235
 Risswachstum 266
 Rockwellhärteprüfung 154
 Rundzugprobe 66

S

Schlagenergie, verbrauchte 229
 Schlagenergie-Temperatur-Diagramm 244
 Schleifen 100
 Schwingfestigkeit 261
 Schwingung, instationäre 269
 –, stationäre 269
 Schwingungen 269
 Schwingungsstreifen 268
 Schwingversuch, einstufiger 271
 Segregat 41
 seitliche Ausdehnung 240
 sekundäre Ausscheidung 41
 Sekundärhärtemaximum 207
 Sekundärzementit 124, 129
 Smith-Diagramm 289
 Soliduslinie 32
 Spaltbruch 236 f.
 Spannung 62
 –, technische 63
 –, wahre 77
 Spannung-Dehnung-Diagramm 70
 Spannungsamplitude 270
 Spannungsspitze 227
 Spannungsverhältnis 270
 Sprödbbruch 234, 236
 –, interkristalliner 238
 –, transkristalliner 238

Sprödigkeit 226
stabiler Rissfortschritt 235
Stahl 171
stationäre Schwingung 269
statisches Härteprüfverfahren 144
Stirnabschreckversuch 204
Stoffsystem 27
Strahlengang im Mikroskop 103
Streckgrenze, obere 72
–, untere 72
Stufenversetzung 236
Substitutionsmischkristall 24

T

technische Spannung 63, 71
Temperaturkonzept 244
Tertiärzementit 124, 126
thermische Analyse 17, 27, 174
thermischer Ausdehnungskoeffizient 174
Tieflage 244
transkristalliner Sprödbbruch 238
Trennen 96
Trennfestigkeit 233

U

Übergangstemperatur 244
Überlebenswahrscheinlichkeit 274
Überstruktur 25
Universalprüfmaschine 69
Unlöslichkeit im festen Zustand 35
untere kritische Abkühlgeschwindigkeit 186,
195
untere Streckgrenze 72
unterer Bainit 182

V

verbrauchte Schlagenergie 229
Verformung 62

Verformungsbruch 239
Verformungsbruchanteil 250
Verformungsverfestigung 74
Verformungswaben 239
Vergrößerung 107, 109
–, förderliche 114
vergütet 196
Verlängerung 63 f.
Verlängerung der Extensometermesslänge 69
Versetzungsbewegung 234
Vickershärteprüfung 150
vollständige Löslichkeit 30

W

wahre Spannung 77
Wärmebehandlung 191
Wärmebehandlung von Stählen 171
Wechselbereich 271
Werkstoffkennwert 59
Wöhlerkurve 273
Wöhlerversuch 271

Z

Zähigkeit 223, 226, 228, 242 f.
Zeitfestigkeit 271, 273, 275
Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm
183
Zementit 120
Zonenmischkristall 33
ZTU-Diagramm 184, 187
–, isothermes 189
–, kontinuierliches 184
Zugfestigkeit 74
Zugschwellbereich 271
Zugversuch 59
Zustandsdiagramm 27
Zustandssystem 15
Zweistoffsystem 27