

# Umrechnungen von Einheiten

In der linken Spalte sind die SI-gerechten Einheiten angegeben.

<b>Kraft</b> Newton: 1 N = 1 kg m/s <sup>2</sup>	1 kp = 1 kgf = 9,807 N 1 dyn = 1 g cm/s <sup>2</sup> = 10 <sup>-5</sup> N 1 lbf = 4,45 N
<b>Spannung, Druck</b> Pascal: 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> 1 MPa = 1 N/mm <sup>2</sup> = 1 MN/m <sup>2</sup>	1 kp/mm <sup>2</sup> = 9,807 MPa 1 psi = 1 lbf/in <sup>2</sup> = 6,9·10 <sup>-3</sup> MPa 1 ksi = 10 <sup>3</sup> psi = 6,9 MPa 1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa = 0,1 MPa 1 at = 1 kp/cm <sup>2</sup> = 10 m WS = 0,09807 MPa 1 Torr = 1 mm Hg = 1,33·10 <sup>-4</sup> MPa 1 atm = 760 Torr = 1,013 bar = 0,1013 MPa
<b>Energie, Arbeit, Wärmemenge</b> Joule: 1 J = 1 N m = 1 W s = 1 kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	1 cal = 4,187 J 1 kp m = 9,807 J 1 kWh = 3,6·10 <sup>6</sup> J 1 eV = 1,602·10 <sup>-19</sup> J 1 erg = 1 dyn cm = 10 <sup>-7</sup> J 1 BTu = 1055 J 1 ft lbf = 1,36 J 1 ft tonf = 3,037 kJ 1 in lbf = 0,113 J
<b>Leistung</b> Watt: 1 W = 1 J/s = 1 N m/s = 1 kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	1 cal/s = 4,187 W 1 ft lbf/s = 1,36 W 1 in lbf/s = 0,113 W 1 PS = 735,5 W 1 hp = 745,7 W 1 BTu/h = 0,293 W

BTu	<i>British Thermal unit</i>	kgf	<i>kilogram-force</i>
ft	<i>foot</i> (1 ft = 0,305 m)	ksi	<i>kilopounds per square inch</i>
ft lbf	<i>foot pound-force</i>	lb	<i>pound (mass)</i> (1 lb = 0,454 kg)
ft tonf	<i>foot ton-force</i>	lbf	<i>pound-force</i>
Hg	<i>Quecksilbersäule</i>	lbf/in <sup>2</sup>	<i>pound-force per square inch</i>
hp	<i>horse power</i>	psi	<i>pounds per square inch</i>
in lbf	<i>inch pound-force</i>	WS	<i>Wassersäule</i>

Ralf Bürgel

**Hochtemperatur-  
Werkstofftechnik**

## **Aus dem Programm** **Werkstofftechnik**

**Werkstoffkunde für Ingenieure**  
von R. Laska und Ch. Felsch

**Stahlerzeugung kompakt**  
von K. Taube

**Praktikum in Werkstoffkunde**  
von E. Macherauch

**Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung**  
von W. Weißbach

**Aufgabensammlung Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung**  
von W. Weißbach, U. Bleyer und M. Bosse

**Handbuch Hochtemperatur - Werkstofftechnik**  
von R. Bürgel

**Tribologie-Handbuch, Reibung und Verschleiß**  
von H. Czichos und K.-H. Habig

**Praktische Oberflächentechnik**  
von K.-P. Müller

**Vieweg**

Ralf Bürgel

# **Handbuch Hochtemperatur- Werkstofftechnik**

Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen,  
Hochtemperaturlegierungen

Mit 236 Bildern und 65 Tabellen



Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden, 1998

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1998

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Bertelsmann Fachinformation GmbH.



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherungen und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

<http://www.vieweg.de>

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-322-99905-4      ISBN 978-3-322-99904-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-322-99904-7

## Vorwort

Dieses Lehr- und Fachbuch, das in den Jahren 1993–1998 entstand, wendet sich sowohl an Studierende der Werkstoffkunde im fortgeschrittenen Stadium ihrer Ausbildung sowie an Dozenten als auch an Ingenieure in der Industrie und angewandten Forschung und Entwicklung.

Viele Themen der Hochtemperatur-Werkstofftechnik werden in den Standardlehrbüchern recht kurz behandelt, so daß man zur Einarbeitung in dieses Gebiet auf breit gestreute Fachliteratur zurückgreifen muß. Monographien vertiefen dagegen bestimmte Bereiche stark. Das vorliegende Buch versucht, diese Lücke zwischen kurzen Allgemein- und umfassenden Einzeldarstellungen zu schließen. Besondere Aufmerksamkeit wird der Verbindung zwischen Grundlagenverständnis, technischen Schlußfolgerungen und Anwendungen gewidmet.

Das Buch behandelt zum einen die nach *metallphysikalischen* Gesetzmäßigkeiten oberhalb etwa 40 % der absoluten Schmelztemperatur mit technisch bedeutender Geschwindigkeit ablaufenden Werkstoffvorgänge, die für alle metallischen Materialien allgemein gelten. Zum anderen werden Hochtemperaturlegierungen und deren Beanspruchungen in Bauteilen vorgestellt. Als Hochtemperaturwerkstoffe bezeichnet man nach gängigem *technischen* Sprachgebrauch solche, die oberhalb etwa 500 °C langfristig eingesetzt werden können. Keramische Werkstoffe werden nicht ausführlich behandelt, sondern lediglich an einigen Stellen ergänzend und vergleichend erörtert.

Teile des Buchinhaltes sind Gegenstand der Vorlesungen *Festigkeit und Verformung metallischer Werkstoffe*, *Werkstoffbeanspruchungen in Bauteilen*, *Hochtemperaturwerkstoffe*, *Phasengleichgewichte*, *Metallkunde* sowie *Festigkeitslehre*, welche ich an der Fachhochschule Osnabrück halte.

Herr Dr.-Ing. Viktor Guttman hat nahezu das gesamte Manuskript sehr sorgfältig und kritisch Korrektur gelesen. Frau Beate Trück und Herr Heinz Rechtenbacher, meine ehemaligen Kollegen bei ABB in Mannheim, haben mich bei der Suche nach geeignetem Bildmaterial tatkräftig unterstützt. Ich danke den genannten Personen für ihren kompetenten Einsatz in langjähriger freundschaftlicher Verbundenheit.

Die Benutzer dieses Buches bitte ich um Kritik und Verbesserungsvorschläge.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>Zeichen und Einheiten</b> .....	XIII
<b>Abkürzungen</b> .....	XVI
<b>1 Grundlagen</b> .....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Thermodynamische und kinetische Grundlagen.....	3
1.2.1 Temperatur und thermische Energie.....	3
1.2.2 Grundbegriffe der Thermodynamik und Kinetik von Reaktionen.....	5
1.2.3 Thermodynamische Triebkraft $\Delta G$ .....	5
1.2.4 Reaktionskinetik.....	9
1.3 Diffusion.....	11
1.3.1 Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten.....	11
1.3.1.1 Interstitielle Diffusion.....	12
1.3.1.2 Reguläre Gitterdiffusion.....	15
1.3.2 Diffusion in Substitutionsmischkristallen.....	20
1.3.3 Diffusion entlang von Gitterfehlern.....	23
1.3.3.1 Diffusion entlang von Versetzungen.....	23
1.3.3.2 Diffusion entlang von Korngrenzen.....	24
1.3.4 Diffusion in geordneten Gittern.....	26
1.4 Grundlagen der Wärmeübertragung.....	26
1.4.1 Begriffe.....	27
1.4.2 Wärmedurchgang durch eine Wand.....	28
<b>2 Gefügestabilität</b> .....	38
2.1 Erholung.....	39
2.2 Rekristallisation.....	43
2.2.1 Allgemeines.....	43
2.2.2 Kinetik der Rekristallisation.....	44
2.2.3 Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten der Rekristallisation.....	46
2.3 Kornvergrößerung.....	57

2.4	Ausscheidungsvorgänge.....	64
2.4.1	Allgemeines.....	64
2.4.2	Energiebilanz bei Ausscheidungsvorgängen .....	68
2.5	Teilchenvergrößerung/Ostwald-Reifung .....	76
2.6	Gefügebedingte Volumenänderungen .....	85
<b>3</b>	<b>Statische Festigkeit und Verformung, Kriechen .....</b>	<b>88</b>
3.1	Allgemeines.....	88
3.2	Grundlagen der Hochtemperaturverformung .....	89
3.3	Kriechen.....	94
3.3.1	Kriechkurve .....	94
3.3.2	Darstellungsformen der Kriech- und Zeitstanddaten und Aspekte der Bauteilauslegung.....	99
3.4	Versetzungskriechen .....	103
3.4.1	Mikrostrukturelle Interpretation.....	103
3.4.2	Gesetzmäßigkeiten des Versetzungskriechens .....	107
3.4.2.1	Spannungsabhängigkeit .....	107
3.4.2.2	Temperaturabhängigkeit.....	111
3.4.2.3	Abhängigkeiten von Werkstoffparametern.....	113
3.5	Korngrenzgleiten.....	118
3.6	Diffusionskriechen.....	121
3.7	Verformungsmechanismuskarten .....	125
3.8	Kriechen von Legierungen .....	130
3.8.1	Mischkristallhärtung.....	130
3.8.1.1	Direkte Wechselwirkungen Fremdatome/Versetzungen .....	130
3.8.1.2	Veränderung von Werkstoffparametern durch Fremdatome.....	134
3.8.2	Teilchenhärtung.....	135
3.8.2.1	Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten .....	135
3.8.2.2	Besonderheiten dispersionsgehärteter Legierungen .....	143
3.8.2.3	Hoch $\gamma'$ -haltige Ni-Basislegierungen .....	146
3.8.2.4	Kriechkurvenverlauf teilchengehärteter Legierungen .....	147
3.8.3	Kriechen geordneter intermetallischer Phasen .....	149
3.9	Bruchmechanismuskarten .....	150
3.10	Kriechschädigung und Kriechbruch .....	153
3.10.1	Transkristalline Kriechschädigung .....	153
3.10.2	Interkristalline Kriechschädigung.....	154
3.10.2.1	Kriechrißinitiierung .....	157
3.10.2.2	Kriechrißwachstum .....	165
3.10.3	Tertiäres Kriechen .....	167
3.11	Einfluß der Kornform auf die Zeitstandeigenschaften .....	169



---

3.12	Kriechverhalten von Einkristallen .....	172
3.13	Extrapolation von Zeitstandergebnissen .....	173
3.14	Zeitstandfestigkeitsnachweis bei veränderlichen Beanspruchungen..	179
3.15	Spannungsrelaxation .....	180
3.16	Entwicklung und Auswahl kriechfester Legierungen.....	185
<b>4</b>	<b>Zyklische Festigkeit und Verformung, Ermüdung .....</b>	<b>191</b>
4.1	Begriffe und Einführung .....	191
4.2	Ermüdung bei tiefen Temperaturen .....	199
4.3	Ermüdung bei hohen Temperaturen .....	204
4.4	Schädigung und Bruch unter zyklischen Belastungen .....	211
4.5	Lebensdauerabschätzung für zyklische Belastungskollektive .....	212
4.6	Lebensdauerabschätzung für kombinierte Kriech- und Ermüdungsbeanspruchung.....	213
4.7	Thermische Ermüdung.....	219
4.7.1	Wärmedehnungen und Wärmespannungen .....	219
4.7.2	Prüftechniken zur thermischen Ermüdung.....	231
4.7.3	Einflußgrößen auf die thermische Ermüdung.....	236
4.7.3.1	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	237
4.7.3.2	Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit.....	237
4.7.3.3	Elastizitätsmodul .....	239
4.7.3.4	Korngröße .....	242
4.7.3.5	Mechanische Eigenschaften .....	242
4.7.3.6	Konstruktive und geometrische Einflüsse .....	243
4.7.3.7	Korrosionsbeständigkeit.....	244
4.7.3.8	Zusammenfassung der Einflußgrößen auf die thermische Ermüdung.....	244
<b>5</b>	<b>Hochtemperaturkorrosion .....</b>	<b>247</b>
5.1	Begriffe .....	247
5.2	Thermodynamik der Metall/Gas-Reaktionen .....	248
5.3	Oxidation .....	254
5.3.1	Einführung und Begriffe.....	254
5.3.2	Kinetik der Oxiddeckschichtbildung .....	254
5.3.3	Mechanismen des Deckschichtwachstums.....	260
5.3.4	Oxidation von Legierungen .....	265
5.3.5	Deckschichten auf Legierungen.....	267
5.3.6	Zyklisches Oxidationsverhalten.....	272
5.3.7	Haftung von Deckschichten und Aktivelementeffekte .....	274
5.3.8	Plastisches Verhalten von Oxiddeckschichten.....	278
5.3.9	Korngrenzenzerfall ( <i>Pest</i> ) .....	279
5.3.10	Zundergrenze .....	279

5.4	Aufkohlung .....	280
5.4.1	Allgemeines .....	280
5.4.2	Besondere Erscheinungsformen der Aufkohlung .....	284
5.4.2.1	<i>Metal Dusting</i> .....	284
5.4.2.2	Grünfäule .....	286
5.5	Entkohlung .....	288
5.6	Aufstickung .....	289
5.7	Aufschwefelung .....	291
5.8	Heißgaskorrosion .....	294
5.8.1	Begriffe und Einführung .....	294
5.8.2	Korrosive Substanzen bei Verbrennungsprozessen .....	296
5.8.3	Prüfmethoden .....	299
5.8.4	Mechanismen der Heißgaskorrosion .....	301
5.8.4.1	Allgemeines .....	301
5.8.4.2	Niedertemperatur- (Typ II-) Heißgaskorrosion .....	303
5.8.4.3	Hochtemperatur- (Typ I-) Heißgaskorrosion .....	308
5.8.4.4	Einflüsse weiterer Elemente .....	313
5.8.5	Zusammenfassung und Aspekte der Werkstoffwahl .....	315
5.9	Erosion-Korrosion-Wechselwirkungen .....	319
5.10	Korrosionsbedingte Volumenänderungen .....	319
5.11	Wechselwirkungen zwischen Korrosion und mechanischen Eigenschaften .....	320
<b>6</b>	<b>Hochtemperaturlegierungen .....</b>	<b>326</b>
6.1	Definition und Anwendungsgebiete .....	326
6.2	Beanspruchungen und Werkstoffanforderungen .....	326
6.3	Auswahlkriterien für Basiselemente und Übersicht über Hochtemperatur-Werkstoffgruppen .....	329
6.4	Hochtemperaturlegierungen auf Fe-Basis .....	333
6.4.1	Übersicht .....	333
6.4.2	Hitzebeständige Stähle .....	336
6.4.3	Warmfeste Stähle .....	339
6.4.4	Hochwarmfeste Stähle .....	340
6.5	Hochtemperaturlegierungen auf Co-Basis .....	347
6.5.1	Allgemeines und Vergleich .....	347
6.5.2	Legierungsaufbau, Gefüge und Eigenschaften .....	348
6.6	Hochtemperaturlegierungen auf Ni-Basis .....	352
6.6.1	Allgemeines und Vergleich .....	352
6.6.2	Phasen in Ni-Basislegierungen .....	358
6.6.2.1	Der $\gamma$ -Mischkristall .....	358
6.6.2.2	Die $\gamma'$ -Phase .....	359
6.6.2.3	Karbide .....	368
6.6.2.4	TCP-Phasen und Phaseninstabilitäten .....	370
6.6.2.5	Weitere Phasen .....	373

6.6.3	Wärmebehandlung $\gamma'$ -gehärteter Ni-Basislegierungen .....	375
6.6.3.1	Allgemeines .....	375
6.6.3.2	Ausgangswärmebehandlung .....	376
6.6.3.3	Heiß-isostatisches Pressen (HIP).....	387
6.6.3.4	Regenerierende Wärmebehandlung.....	387
6.6.4	Korrosionseigenschaften.....	388
6.7	Gerichtet erstarrte Superlegierungen.....	388
6.7.1	Allgemeines .....	388
6.7.2	Herstellung .....	390
6.7.2.1	Prinzip der gerichteten Erstarrung .....	390
6.7.2.2	Verfahrensparameter und Gefügefehler .....	393
6.7.2.3	Mikroseigerungsverhalten bei der Erstarrung .....	399
6.7.3	Legierungsaufbau und besondere Eigenschaften.....	403
6.8	Gerichtet rekristallisierte Dispersions-Superlegierungen .....	408
6.8.1	Allgemeines .....	408
6.8.2	Legierungstypen.....	410
6.8.3	Herstellung .....	410
6.8.4	Rekristallisation .....	412
6.8.5	Legierungsaufbau und besondere Eigenschaften.....	415
6.8.6	Blechlegierungen.....	417
6.8.7	Korrosions- und Beschichtungsverhalten.....	418
6.9	Hochschmelzende Legierungen.....	419
6.9.1	Allgemeines .....	419
6.9.2	Festigkeitssteigerung und Legierungsaufbau .....	422
6.10	Intermetallische Phasen als Konstruktionswerkstoffe.....	422
6.10.1	Allgemeines .....	422
6.10.2	Klassifizierung der intermetallischen Phasen.....	423
6.10.3	Besondere Eigenschaften der intermetallischen Phasen.....	427
6.10.4	Potentielle intermetallische Konstruktionswerkstoffe .....	429
6.11	Edelmetall-Legierungen .....	435
6.12	Verunreinigungen und Reinheitsgradverbesserung.....	435
6.12.1	Allgemeines .....	435
6.12.2	Einflüsse von Verunreinigungen auf die Eigenschaften .....	436
6.12.3	Maßnahmen zur Reinheitsgradverbesserung .....	440
6.13	Vergleich von Hochtemperaturwerkstoffen und Aspekte der Werkstoffwahl .....	442
<b>7</b>	<b>Hochtemperaturbeschichtungen .....</b>	<b>450</b>
7.1	Hochtemperatur-Korrosionsschutzschichten .....	450
7.1.1	Funktion.....	450
7.1.2	Beanspruchungen und Anforderungen .....	451

7.1.3	Aufbringverfahren.....	452
7.1.3.1	CVD-Verfahren .....	454
7.1.3.2	PVD-Verfahren.....	459
7.1.3.3	Thermische Spritzverfahren.....	460
7.1.3.4	Plattieren .....	464
7.1.4	Beschichtungsarten und Eigenschaften .....	464
7.1.4.1	Diffusionsschichten .....	464
7.1.4.2	Auflageschichten.....	467
7.1.5	Thermisch-mechanisches Verhalten beschichteter Bauteile .....	472
7.1.5.1	Wärmespannungen.....	473
7.1.5.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften von Beschichtungen.....	477
7.1.5.3	Thermozyklisches Verhalten.....	480
7.2	Wärmedämmschichten .....	485
7.2.1	Funktion.....	485
7.2.2	Anforderungen.....	489
7.2.3	Aufbringverfahren für Keramikschichten .....	490
7.2.4	Arten und Eigenschaften .....	491
7.2.4.1	Keramikschichten.....	492
7.2.4.2	Haftschichten .....	497
<b>8</b>	<b>Maßnahmen an betriebsbeanspruchten Bauteilen .....</b>	<b>500</b>
8.1	Zustandsbeurteilungen.....	500
8.2	Rekonditionierungsmaßnahmen .....	508
<b>Literatur</b>	.....	<b>511</b>
<b>Anhang</b>		
	Chemische Zusammensetzungen von Hochtemperaturlegierungen .....	521
	Handelsnamen .....	528
<b>Werkstoffverzeichnis</b>	.....	<b>529</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>533</b>

## Zeichen und Einheiten

Gleiche Zeichenverwendungen für andere Größen sind im Text besonders vermerkt.

a	Gitterparameter .....	[nm]
a	Temperaturleitfähigkeit.....	[m <sup>2</sup> /s]
a	(chemische) Aktivität.....	[-]
(welche Größe mit a gemeint ist, ergibt sich aus dem Zusammenhang)		
A	Fläche, siehe S <sub>0</sub> .....	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>u</sub>	Zeitbruchdehnung .....	[-, %]
b	Betrag des Burgers-Vektors.....	[nm]
c <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck).....	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
d <sub>K</sub>	mittlerer Korndurchmesser .....	[μm]
d <sub>T</sub>	mittlerer Teilchendurchmesser.....	[μm]
D	Diffusionskoeffizient .....	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>0</sub>	Diffusions-Vorfaktor.....	[m <sup>2</sup> /s]
E	Elastizitätsmodul .....	[GPa]
f	Frequenz .....	[s <sup>-1</sup> = Hz]
f <sub>T</sub>	Teilchenvolumenanteil .....	[-, %]
F	Kraft, Last.....	[N]
G	Schubmodul .....	[GPa]
G	freie Enthalpie (Bezeichnung nach IUPAC: Gibbs-Energie) .....	[J, J/mol]
(welche Größe mit G gemeint ist, ergibt sich aus dem Zusammenhang)		
ΔG <sup>a</sup>	freie Aktivierungsenthalpie .....	[J, J/mol]
H	Enthalpie .....	[J, J/mol]
k <sub>B</sub>	Boltzmann-Konstante = 1,381·10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup> Atom <sup>-1</sup>	
L <sub>0</sub>	Ausgangslänge .....	[mm]
L <sub>i</sub>	momentane Länge .....	[mm]
N <sub>A</sub>	Avogadro-Konstante (Loschmidt-Konstante) = 6,022·10 <sup>23</sup> Atome/mol	
N <sub>B</sub>	Zyklenzahl bis zum Bruch .....	[-]
Q	Aktivierungsenergie.....	[J/Atom, J/mol]
Q <sub>c</sub>	Aktivierungsenergie des Kriechens.....	[J/Atom, J/mol]
R	Allgemeine Gaskonstante = 8,314 J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> (R = N <sub>A</sub> ·k <sub>B</sub> )	
R <sub>e</sub>	Streckgrenze („Elastizitätsgrenze“).....	[MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit.....	[MPa]
R <sub>p 0,2</sub>	0,2 %-Dehngrenze .....	[MPa]

$R_{m\ t/\vartheta}$	Zeitstandfestigkeit für die Zeit $t$ [h] bis zum Bruch bei der Temperatur $\vartheta$ [°C]..... [MPa]
$R_{p\ \varepsilon/t/\vartheta}$	Zeitdehngrenze für die plastische Gesamtdehnung $\varepsilon$ [%] nach der Zeit $t$ [h] bei der Temperatur $\vartheta$ [°C] ..... [MPa]
$S$	Entropie..... [J/K, J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]
$S_0$	Ausgangsquerschnitt..... [mm <sup>2</sup> ]
$S_i$	momentaner Querschnitt..... [mm <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit ..... [s, h]
$t_m$	Belastungsdauer bis zum Bruch ..... [h]
$T$	absolute Temperatur, siehe $\vartheta$ ..... [K]
$T_L$	Liquidustemperatur ..... [K]
$T_S$	absolute Schmelztemperatur (bei Legierungen mit einem Schmelzintervall ist die Solidustemperatur gemeint), siehe $\vartheta_S$ ..... [K]
$U$	innere Energie..... [J, J/mol]
$Z$	Einschnürung ..... [-, %]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient ..... [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{th}$	thermischer Längenausdehnungskoeffizient ..... [K <sup>-1</sup> ] (sofern nicht anders vermerkt, ist der mittlere Wert für das betrachtete Temperaturintervall gemeint: $\alpha_{th} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$ )
$\gamma_{KG}$	spezifische Korngrenzflächenenergie ..... [mJ/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{Ph}$	spezifische Phasengrenzflächenenergie ..... [mJ/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{SF}$	(spezifische) Stapelfehlerenergie..... [mJ/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	technische Dehnung = $\frac{L_i - L_0}{L_0} (\cdot 100 \%)$ ..... [-, %]
$\varepsilon_f$	Kriechdehnung ..... [-, %]
$\varepsilon_e$	elastische Dehnung..... [-, %]
$\varepsilon_{in}$	inelastische Dehnung..... [-, %]
$\varepsilon_p$	plastische Dehnung..... [-, %]
$\varepsilon_t$	Gesamtdehnung..... [-, %]
$\varepsilon_{th}$	thermische Dehnung ..... [-, %]
$\varepsilon_w$	wahre Dehnung = $\ln(L_i/L_0)$ ..... [-]
$\dot{\varepsilon}$	Dehn- oder Kriechgeschwindigkeit..... [s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varepsilon}_S$	sekundäre (stationäre) Kriechgeschwindigkeit ..... [s <sup>-1</sup> ]
$\eta$	Verformungsgrad (allgemein)..... [-, %]
$\vartheta$	Temperatur, siehe $T$ ..... [°C]
$\vartheta_S$	Schmelztemperatur, siehe Anmerkung bei $T_S$ ..... [°C]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit..... [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_T$	mittlerer Teilchenabstand..... [µm]
$\nu$	Poissonsche Zahl..... [-]

---

$\rho$	Dichte .....	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho$	Versetzungsdichte.....	[cm/cm <sup>3</sup> ]
(welche Größe mit $\rho$ gemeint ist, ergibt sich aus dem Zusammenhang)		
$\sigma$	mechanische (Normal-) Spannung .....	[MPa]
$\sigma_0$	Ausgangsspannung (Nennspannung) = $F/S_0$ .....	[MPa]
$\sigma_{dF}$	Quetschgrenze, Druckfließgrenze („d“: Druck; „F“: Fließen) .....	[MPa]
$\sigma_{th}$	thermisch induzierte Spannung, Wärmespannung .....	[MPa]
$\sigma_w$	wahre Spannung = $F/S_i$ .....	[MPa]
$\tau$	Schubspannung .....	[MPa]
$\Omega$	Atomvolumen .....	[nm <sup>3</sup> ]

Sofern nicht anders vermerkt, beziehen sich Prozentangaben bei Legierungselementen auf Masseanteile.

## Abkürzungen

APS	atmosphärisches Plasmaspritzen
CVD	chemische Gasabscheidung ( <i>Chemical vapour deposition</i> )
EB-PVD	physikalische Gasabscheidung mittels Elektronenstrahlverdampfung ( <i>Electron beam-physical vapour deposition</i> )
HCF	hochzyklische Ermüdung ( <i>High cycle fatigue</i> )
hdP	hexagonal dichteste Packung
HIP	heiß-isostatisches Pressen
IPS	Inertgasplasmaspritzen
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
LCF	niederzyklische Ermüdung ( <i>Low cycle fatigue</i> )
lg	Zehnerlogarithmus
ln	natürlicher Logarithmus ( $\lg x \approx 0,434 \ln x$ )
ODS	oxiddispersionsgehärtet ( <i>Oxide dispersion strengthened</i> )
PVD	physikalische Gasabscheidung ( <i>Physical vapour deposition</i> )
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur (20 °C)
TEM	Durchstrahlungselektronenmikroskop
TF	thermische Ermüdung ( <i>Thermal fatigue</i> )
VPS	Vakuumpasmaspritzen