

# Mechanische Werkstoffprüfung

Grundlagen, Prüfmethoden, Anwendungen

Dr.rer. nat. Hermann Dietrich

Dipl.-Ing. Hermann Bloching  
Dipl.-Ing. Helmut Bretfeld  
Prof. Dr. mont. Hermann Müller  
Dr.-Ing. Ulrich Reichel  
Dipl.-Ing. Werner Schaffrath  
Dr.-Ing. Werner Schmidt

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 304 Bildern und 185 Literaturstellen



Kontakt & Studium  
Band 279

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz  
Technische Akademie Esslingen  
Weiterbildungszentrum  
DI Elmar Wippler  
expert verlag

experttyjl verleg

# Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort  
Autoren-Vorwort

<b>1</b>	<b>Mechanische Werkstoffprüfverfahren</b>	<b>1</b>
	H. Müller	
1.1	Einleitung	1
1.2	Zugversuch (DIN/EN 10 002, Teil 1)	1
1.2.1	Zugversuch an glatten Proben	1
1.2.2	Zugversuch an gekerbten Proben	6
1.3	Dauerschwingversuch (DIN 50100)	8
1.3.1	Dauerschwingversuch an glatten Proben	8
1.3.2	Dauerschwingversuch an gekerbten Proben	11
1.4	Zeitstandversuch <DIN 50118)	12
1.5	Ermittlung der Reißzähigkeit	13
1.6	Reißausbreitung bei schwingender Beanspruchung	16
1.7	Kerbschlagbiegeversuch (DIN/EN 10 045, Teil 1)	18
1.8	Technologische Prüfungen	21
<b>2</b>	<b>Beanspruchungsarten</b>	<b>22</b>
	W. Schmidt	
2.1	Einleitung	22
2.2	Einfluß des Spannungszustandes bzw. der Spannungs- verteilung in der Probe	22
2.2.1	Einfluß der Spannungsverteilung in einer Probe	23
2.2.2	Einfluß des Spannungszustandes	30
2.3	Einfluß der Beanspruchungsart	41
2.3.1	Einmalig schlagartige Beanspruchung	41
2.3.2	Periodisch veränderte Beanspruchung	47
2.3.3	Zusammengesetzte Beanspruchungen	50
2.3.3.1	Einfluß der Mittelspannung (Dauerfestigkeitsschau- bilder)	50

2.3.3.2	Dauerfestigkeit bei zusammengesetzter Beanspruchung	53
2.4	Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit	54
2.4.1	Versuche unter ruhender Beanspruchung	56
2.4.2	Der Zeitstand versuch	57
2.4.3	Der Entspannungsversuch	63
2.5	Einfluß der Frequenz (bei Versuchen mit periodisch veränderter Beanspruchung)	66
2.6	Einfluß der Temperatur	67
2.6.1	Streuung der Zeitstandfestigkeit	68
2.6.2	Zähigkeit	69
2.6.3	Zwischenentlastung	77
2.6.4	Verhalten bei schwingender Beanspruchung	79
2.7	Einfluß des umgebenden Mediums	84
2.7.1	Langzeitig periodisch veränderte Beanspruchung	84
2.7.2	Langzeitig ruhende Beanspruchung	88

## **Probenahme, Probenherstellung und Prüfmaschinen** **93**

U. Reichel, W. Schaffrath

3.1	Einleitung	93
3.2	Probenahme	94
3.3	Probenherstellung	97
3.4	Prüfmaschinen	104
3.4.1	Zu prüf masch i nen	104
3.4.1.1	Antrieb	106
3.4.1.2	Kraftmessung	106
3.4.1.3	Dehnungsmessung	110
3.4.2	Pendelschlagwerke	111
3.4.3	Härteprüfgeräte	114
3.4.3.1	Härteprüfgeräte mit optischer Eindruck-Meß-einrichtung	115
3.4.3.2	Härteprüfgeräte mit Eindringtiefen-Meßeinrichtung	115
3.4.3.3	Härteprüfgeräte für dynamische Härteprüfungen	116
3.4.4	Prüfmaschinen für Schwingungsuntersuchungen	116
3.4.4.1	Einrichtungen zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen	123
3.4.5	Zeitstandprüf gerate	124
3.4.6	Geräte zur Umformbarkeitsprüfung	132

	<b>Automatisierung der Werkstoffprüfung</b>	<b>139</b>
	Rechnergesteuerte Versuchsdurchführung	
	H. Bloching	
4.1	Voraussetzung für eine Automatisierung in der Materialprüfung	139
4.1.1	Lastrahmen und Antriebe	140
4.1.2	Kraftmessung	140
4.1.3	Verformungsmessung	141
4.1.4	Steuer- und Auswertemodule	142
4.1.4.1	Probenhaltersteuerung	144
4.2	Prüfablauf Zugversuch	145
4.2.1	Ermittlung der Bruchdehnung	146
4.2.2	Optimierung der Prüfgeschwindigkeiten	152
4.2.3	Dokumentation des Versuchsablaufes	158
4.3	Anschluß externer Rechner	159
4.4	Erweiterte Automatisierung	160
4.4.1	Probenzuführsystem	160
4.4.2	Universalhandlingsystem	163
4.4.2.1	Magazinausführungen	166
4.4.3	Begründung des Einsatzes von Handlingsystemen in Verbindung mit der Automatisierung der Werkstoffprüfung	167
4.5	Datentechnische Integration	169
4.5.1	Laborautomatisierung	171
4.5.2	Beispiel eines Datenverbundes	173
4.6	Zusammenfassung	178
<b>5</b>	<b>Prüfung von harten Werkstoffen</b>	<b>179</b>
	H. Bretfeld	
5.1	Einleitung	179
5.2	Mechanisch-technologische Untersuchungen	180
5.2.1	Werkzeugstahl	183
5.2.1.1	Biege- und Verdrehfestigkeit	183
5.2.1.2	Schlagbiege Zähigkeit	185
5.2.1.3	Bruchzähigkeit	187
5.2.2	Hartmetall und Keramik	192
5.2.2.1	Druckfestigkeit	192
5.2.2.2	Biegefestigkeit	196
5.2.2.3	Bruchzähigkeit	200
5.2.2.4	Unterkritisches Rißwachstum	207
5.2.3	Statistische Auswertung	209

<b>6</b>	<b>Metallkundliche und gefügebedingte Einflüsse</b>	<b>213</b>
	H. Dietrich	
6.1	Gefügeeinfluß	213
6.1.1	Einfluß der Korngröße	213
6.1.2	Einfluß der Gefügezusammensetzung	214
6.1.3	Einfluß von Ausscheidungen	217
6.2	Struktureinfluß (Textur)	220
6.2.1	Einfluß der Probenlage	221
6.3	Einfluß einer plastischen Vorverformung (Bauschinger-Effekt)	225
	<b>Werkstoffspezifische Einflüsse</b>	<b>230</b>
	H. Müller	
7.1	Einleitung	230
7.2	Festigkeitssteigernde Mechanismen bei metallischen Werkstoffen	231
7.2.1	Versetzungsverfestigung	231
7.2.2	Korngrenzenverfestigung	232
7.2.3	Mischkristallverfestigung	232
7.2.4	Teilchenverfestigung	234
7.3	Werkstoffbedingte Zugverfestigungskurven	235
7.4	Reckalterung	237
7.5	Unterschiedliches Verhalten der Werkstoffe bei Zug- und Druckverformung	239
7.6	Werkstoffzähigkeit und Bruchausbildung im Zugversuch	242
7.7	Werkstoffkennwerte verschiedener metallischer Werkstoffe	244
7.7.1	Rißzähigkeit	244
7.7.2	Werkstoffkennwerte bei höherer Temperatur	246
7.7.3	Schwingfestigkeit	247
7.7.4	Überprüfung der Spröbruchneigung	251
7.8	Prüfung von Polymerwerkstoffen	254
7.8.1	Zugversuch	254
7.8.2	Zeitstandversuch	256
7.8.3	Schlagversuch	256

<b>8</b>	<b>Wärmebehandlungsbedingte Einflüsse</b>	<b>258</b>
	H. Dietrich	
8.1	Warmumformungseinfluß	258
8.2	Walz- und Schmiedezustand	258
8.3	Wärmebehandelter Zustand	260
8.4	Einsatzgehärteter Zustand	261
8.4.1	Einfluß des Aufkohlungsverfahrens	267
8.4.2	Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit	267
8.4.3	Einfluß der Härtungsart	269
8.4.4	Einfluß einer Tiefkühlung	271
8.4.5	Einfluß des Randkohlenstoffgehaltes	272
8.4.6	Einfluß der Einsatzhärtungstiefe	274
8.4.7	Einfluß des Restaustenitgehaltes	274
<b>9</b>	<b>Umformbarkeitsprüfung</b>	<b>278</b>
	W. Schmidt	
9.1	Einleitung	278
9.2	Blechprüfung	278
9.2.1	Anisotropie $r$	279
9.2.2	Fließkurve und Verfestigungsexponent $n$	291
9.2.2.1	Beurteilung des Verfestigungsverhaltens mit Hilfe der Gleichmaßformänderung	294
9.2.2.2	Beurteilung des Verfestigungsverhaltens mit Hilfe der Erichsen-Tiefungsprobe	296
9.2.2.3	Übertragbarkeit der Meßergebnisse auf das Streckziehen verschiedener Werkstückformen	297
9.2.3	Verfahren zur Ermittlung der Gleichmaßdehnung bzw. des Verfestigungsexponenten	298
9.2.3.1	Ermittlung des Verfestigungsexponenten aus der Fließkurve	298
9.2.3.2	Messung der Gleichmaßdehnung	298
9.2.3.2.1	Direkte Messung	298
9.2.3.2.2	Errechnung aus der Bruchdehnung	298
9.2.3.2.3	Ermittlung der Gleichmaßdehnung aus dem Kraft-Verlängerungs-Schaubild	298
9.2.3.2.4	Genauigkeit und Probenzahl	299
9.2.3.3	Existenz einer Gleichmaßdehnung	301
9.2.3.4	Zeitlicher Ablauf der makroskopischen Dehnung	305
9.2.3.5	Ursache von Spannungssprüngen	308
9.3	Prüfung der Kaltmassivumformbarkeit	310

9.3.1	Fließkurve	311
9.3.2	Umformvermögen	311
9.3.3	Beziehung zwischen Werkstoffeigenschaften und Umformbarkeit	312
9.3.4	Kennzeichnung durch die Fließkurve	313
9.3.4.1	Zugversuch mit Auswertung nach Reihe	314
9.3.4.2	Zugversuch mit vorverfestigten Proben	314
9.3.4.3	Stauchversuch	315
9.3.4.4	Verdrehversuch	318
9.3.4.5	Ableitung von Fließkurven aus anderen Werkstoffkennwerten	319
9.3.5	Einfluß des Bestimmungsverfahrens auf den Verlauf der Fließkurve	319
9.3.6	Einfluß von Umformgeschwindigkeit und Eigenerwärmung	321
9.3.7	Einfluß des Werkstoffes	324
9.4	Warmumformbarkeitsprüfung	325
9.4.1	Umformbarkeit in der ersten Hitze	327
9.4.1.1	Einrichtung zur Durchführung von Heißzugversuchen	332
9.4.2	Kennzeichnung der Eignung zur weiteren Warmformgebung	334
9.4.2.1	Verdrehversuch	336
9.4.2.1.1	Versuchsergebnisse	340
9.4.2.2	Stauchversuch	341
9.4.2.2.1	Aufnahme von Fließkurven	348

## **10 Die Beurteilung des Bruchverhaltens von metallischen Werkstoffen höherer Festigkeit mit Hilfe der Bruchmechanik** **351**

W. Schmidt

10.1	Einleitung	351
10.2	Bruchmechanische Kennzeichnung des Werkstoff-Verhaltens	352
10.3	Instabiles und stabiles (unterkritisches) Rißwachstum	359
10.4	Praktische Bestimmung der Bruchzähigkeit $K_{Ic}$	361
10.5	Beziehungen zwischen $K_{Ic}$ und anderen Werkstoffeigenschaften	365

<b>11</b>	<b>Normen und Regelwerke - ISO, EURO, EN und DIN</b>	<b>368</b>
	W. Schmidt	
11.1	Einleitung	368
11.2	Bisherige Praxis	368
11.3	Heutiges Vorgehen	370
11.4	Konsequenzen für die nationale Normungsarbeit	373
11.5	Besonderheiten für den Bereich der mechanischen Prüfverfahren für metallische Werkstoffe	373
11.5.1	Derzeitiger Stand der Normung	374
11.5.1.1	Zugversuch	374
11.5.2	Kerb Schlagbiegeversuch	379
11.5.3	Härtemessungen	380
11.5.3.1	Härteprüfung nach Rockwell	381
11.5.3.2	Härteprüfung nach Brinell	382
11.5.3.3	Härteprüfung nach Vickers	383
11.5.3.4	Makro-Rockwellhärte	383
11.5.3.5	Universalhärte	383
<b>12</b>	<b>Anwendung der Regelwerke durch den Werkstoff- verbraucher</b>	<b>385</b>
	H. Müller	
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>392</b>
	<b>Sachregister</b>	<b>400</b>
	<b>Autorenverzeichnis</b>	<b>404</b>