

Christian Petersen

# Stahlbau

Grundlagen der Berechnung  
und baulichen Ausbildung von Stahlbauten

4., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

**4y Springer Vieweg**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Werkstoff Stahl — Werkstoffeigenschaften — Werkstoffprüfung</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Stahlerstellung</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Grundlagen der Metallkunde</b>	<b>3</b>
1.2.1	Kristalle, Mischkristalle, Phasen	4
1.2.2	Aufbau der Legierungen - Zustandsschaubilder	5
1.2.3	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild	9
1.2.4	Technologische Einstellung der Stahleigenschaften	11
1.2.4.1	Verhalten der Kristalle in Abhängigkeit vom Kristalltyp	11
1.2.4.2	Verhalten der Kristallite und des kristallinen Haufwerks	12
1.2.4.3	Begleit- und Legierungselemente	13
1.2.4.4	Desoxidation (Art der Beruhigung)	14
1.2.4.5	Legierung	15
1.2.4.6	Kaltverformung	16
1.2.4.7	Wärmebehandlung - Vergütung	17
<b>1.3</b>	<b>Werkstoffprüfung - Mechanische Eigenschaften</b>	<b>18</b>
1.3.1	Materialhärte	18
1.3.1.1	Messungen der Härte	18
1.3.1.2	Beispiel: Härteverlauf bei Stumpfnähten	19
1.3.2	Materialfestigkeit und -Zähigkeit	20
1.3.2.1	Elastizitätsmodul und Schubmodul	20
1.3.2.2	Messung der Festigkeit und Zähigkeit	22
1.3.2.3	Zur Deutung der Bruchform beim Zugversuch	24
1.3.2.4	Beispiel: Zugversuche an Flachproben	25
1.3.2.5	Beispiel: Zugversuche an Proben mit Stumpfnah	29
1.3.2.6	Beispiel: Druckversuche zur Bestimmung der Stauchgrenze	30
1.3.2.7	Beispiel: Druckversuche an Flachproben mit Schraubenlöchern	31
1.3.3	Bauteilfestigkeit und Bauteilzähigkeit	33
1.3.3.1	Begriff der Bauteilfestigkeit	33
1.3.3.2	Beispiel: Zugversuche an Proben mit Außenkerbe	34
1.3.3.3	Beispiel: Zugversuche an Lochstäben ohne und mit Passbolzen	36
1.3.3.4	Beispiel: Zugversuche an Flachproben mit versetzten Schraubenlöchern	36
1.3.4	Ermüdungsfestigkeit (Dauerfestigkeit)	40
1.3.4.1	Phänomenologie und Ursachen der Werkstoffermüdung	40
1.3.4.2	WÖHLER-Linie (Einstufungsversuch)	42
1.3.4.3	Dauerfestigkeitsschaubilder	45
1.3.4.4	Beispiel: Durchführung eines Dauerfestigkeitsversuches	47
1.3.4.5	Beispiel: Lochstäbe - Lochstäbe mit Passbolzen - Reibkorrosion	49
1.3.4.6	Beispiel: Lochstäbe mit unterschiedlichen Lochdurchmessern	50
1.3.4.7	Beispiel: Lohstäbe mit parallelen und versetzten Löchern	51
1.3.4.8	Beispiel: Lochstäbe mit Kreis- und Ellipsenloch	55
1.3.4.9	Beispiel: Stäbe mit Stahlbau-typischen Kerbfällen	56
<b>1.4</b>	<b>Kerbschlagzähigkeit</b>	<b>61</b>
<b>1.5</b>	<b>Stähle für den Stahlbau</b>	<b>63</b>
1.5.1	Allgemeines - Bezeichnungssystem	63
1.5.2	Bezeichnungssystem für Baustähle (Lieferbedingungen)	64
1.5.3	Baustähle - DIN EN 10025	66
1.5.3.1	Anforderungen	66

1.5.3.2	Unlegierte Baustähle-DIN 10025-2: 2005	67
1.5.3.3	Feinkornbaustähle-DENEN 10025-3/4:2005	68
1.5.3.4	Hochfeste Feinkornbaustähle - DIN 10025-6: 2005	70
1.5.3.5	Wettereste Baustähle - DIN 10025-5: 2005	71
1.5.4	Nichtrostende Stähle - DIN EN 10088	71
1.5.4.1	Einteilung der Nichtrostenden Stähle-DIN EN 10088-1	71
1.5.4.2	Korrosionsbeständige Stähle - DIN EN 10088-4/5	72
1.5.5	Druckbehälterstähle - DIN EN 10028	74
1.5.6	Weitere Stahlsorten	75
1.5.7	Stahlguss	76
1.5.8	Eisenguss (Gusseisen)	77
1.5.9	Stahlerzeugnisse - Lieferformen - Begriffe	78
<b>1.6</b>	<b>Korrosion - Korrosionsschutz</b>	<b>80</b>
1.6.1	Elektrochemische Korrosion in der Atmosphäre	80
1.6.2	Fertigungsbeschichtung (FB) - Walzstahlkonservierung	83
1.6.3	Korrosionsschutz durch Beschichtungen	83
1.6.3.1	Vorbereitung der Stahloberfläche	83
1.6.3.2	Wirkung und Zusammensetzung der Beschichtung	84
1.6.3.3	Applikation und Prüfung der Beschichtung	85
1.6.4	Korrosionsschutz durch metallische Überzüge	86
1.6.4.1	Vorbemerkung	86
1.6.4.2	Korrosionsschutz durch Zink	86
1.6.4.3	Verfahrenstechnik beim Stückverzinken	87
1.6.4.4	Korrosionsschutzwirkung	88
1.6.4.5	Einfluss der Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften	89
1.6.5	Spannungsrisskorrosion und Schwingungsrisskorrosion	89
	<b>Schrifttum</b>	<b>90</b>
<b>2</b>	<b>Elasto-statischer Festigkeitsnachweis</b>	<b>95</b>
<b>2.1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	<b>95</b>
<b>2.2</b>	<b>Normalspannungen infolge Zug/Druck und Biegung</b>	<b>98</b>
2.2.1	Berechnungsformel	98
2.2.2	Nachweis der Zug- und Druckspannungen	99
2.2.3	Beispiele	101
2.2.4	Nachweis der Biegespannung	105
2.2.5	Beispiele	107
2.2.6	Zur Berechnung der Trägheitsmomente	108
2.2.7	Aufteilung eines Biegemomentes auf die Teile eines Querschnittes	110
<b>2.3</b>	<b>Schubspannungen infolge Querkraft</b>	<b>111</b>
2.3.1	Berechnungsformel	111
2.3.2	Nachweis der Schubspannungen	114
<b>2.4</b>	<b>Herleitung einiger Berechnungsformeln - Beispiele/Ergänzungen</b>	<b>117</b>
<b>2.5</b>	<b>Mitwirkende Breite</b>	<b>125</b>
<b>2.6</b>	<b>Experimenteller Befund</b>	<b>128</b>
<b>2.7</b>	<b>Schubmittelpunkt</b>	<b>129</b>
2.7.1	Problemstellung - Biegung von [-Profilen	129
2.7.2	Beispiele	132
2.7.3	Alternative Berechnungsform	133
<b>2.8</b>	<b>Schubspannungen infolge Torsion</b>	<b>134</b>

2.8.1	Gegenüberstellung: Primärtorsion - Sekundärtorsion	134
2.8.2	Primärtorsion (ST-VENANTSche Torsion)	136
2.8.2.1	Stäbe mit offenem, dünnwandigen Querschnitt	137
2.8.2.2	Stäbe mit geschlossenem, dünnwandigen Querschnitt	140
2.8.2.3	Beispiel	141
2.8.3	Einführung in die Theorie der Sekundärtorsion	142
<b>2.9</b>	<b>Nachweis kombinierter Normal- und Schubspannungszustände</b>	<b>144</b>
2.9.1	Vergleichsspannung bei statischer Beanspruchung	144
2.9.2	Beispiele	147
2.9.3	Vergleichsspannung bei dynamischer Beanspruchung	152
<b>Schrifttum</b>		<b>153</b>
<b>3</b>	<b>Elasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b>	<b>155</b>
<b>3.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>155</b>
<b>3.2</b>	<b>Kräfte und Momente</b>	<b>158</b>
<b>3.3</b>	<b>Grad der statischen Bestimmtheit</b>	<b>159</b>
3.3.1	Ebene Stabtragwerke	159
3.3.2	Räumliche Stabtragwerke	164
<b>3.4</b>	<b>Berechnung der Stabtragwerke</b>	<b>164</b>
3.4.1	Statisch bestimmte Stabtragwerke	164
3.4.2	Statisch unbestimmte Stabtragwerke	164
3.4.3	Berechnung der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen)	166
3.4.3.1	Arbeitssatz	166
3.4.3.2	Integraltafeln	167
3.4.3.3	Einfluss von Anschlusszentritäten und Anschlussnachgiebigkeiten	169
3.4.3.4	Reduktionssatz	171
3.4.3.5	Grundaufgaben	171
3.4.3.6	Vertauschungssatz	172
3.4.4	Einflusslinien für Stütz-, Schnitt- und Verformungsgrößen	172
<b>3.5</b>	<b>Allgemeine Hinweise zu den Berechnungsverfahren der Stabstatik</b>	<b>175</b>
<b>Schrifttum</b>		<b>176</b>
<b>4</b>	<b>Plasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b>	<b>179</b>
<b>4.1</b>	<b>Querschnittstragfähigkeit eines Zugstabes</b>	<b>179</b>
4.1.1	Eigenspannungsfreier Querschnitt	179
4.1.2	Eigenspannungsbehafteter Querschnitt	179
4.1.3	Berücksichtigung der Verfestigung	181
<b>4.2</b>	<b>Fließzonentheorie</b>	<b>183</b>
4.2.1	Exemplarische Darstellung am Einfeldbalken mit Rechteckquerschnitt	183
4.2.2	Verallgemeinerung	189
<b>4.3</b>	<b>Fließgelenktheorie</b>	<b>189</b>
4.3.1	Querschnittstragfähigkeit eines Biegestabes	189
4.3.2	Fließgelenkhypothese	192
4.3.3	Be- und Entlastung	195
4.3.4	Einfeldträger-Durchlaufträger	197
4.3.4.1	Beidseitig eingespannter Träger	197
4.3.4.2	Einseitig eingespannter Träger	199
4.3.4.3	Träger mit veränderlicher Tragfähigkeit	201
4.3.4.4	Durchlaufträger	203

4.3.5	Tragkraftsätze	205
4.3.6	Rahmentragwerke	206
4.3.6.1	Elementarketten / Probiervverfahren - Kombinationsverfahren	206
4.3.6.2	Einfeldrahmen	207
4.3.6.3	Zweifeldrahmen	210
4.3.6.4	Pulldachrahmen / Giebelrahmen / Trapezrahmen - Verschiebungspläne	211
4.3.7	Normalkraft- und Querkraftinteraktion	215
4.3.7.1	Interaktionsbegriff	215
4.3.7.2	M/Q-Interaktion bei I-Querschnitten	216
4.3.7.3	M/N/Q-Interaktion bei I-Querschnitten	217
4.3.7.4	Beispiele	219
4.4	<b>Sicherheitsaspekte</b>	227
4.4.1	Zur Entwicklung der Fließgelenktheorie (Traglastverfahren)	227
4.4.2	Zur Materialfrage	230
4.4.3	Einrechnung der Verfestigung	231
4.4.4	Rotationskapazität	233
4.4.4.1	Rotationswinkel	233
4.4.4.2	Versuche an Einfeldträgern	235
4.4.4.3	Rotationskapazität als Grenzzustandsgröße	239
4.4.4.4	Beispiel	240
4.4.5	Zur Frage der Systemeignung	242
4.4.6	Sicherheit gegen lokale Instabilität	243
4.4.7	Sicherheit gegen globale Instabilität	244
4.5	<b>Regelwerke - Baupraktischer Tragsicherheitsnachweis</b>	245
4.5.1	DIN 18800-1 und -2: 2008-11	245
4.5.1.1	Sicherheitskonzept	245
4.5.1.2	Vereinfachte Berechnung	246
4.5.1.3	$an = 1,25$ -Regel	247
4.5.1.4	Verbindungsmittel in Fließgelenken	249
4.5.1.5	$(b/t)$ -Grenzwerte	250
4.5.1.6	Doppelte Biegung bei I-Querschnitten	251
4.5.2	Eurocode 3 (DINENV 1993-1-1:2005-07)	253
4.6	<b>Fließlinientheorie</b>	254
4.6.1	Hypothese der Fließlinientheorie	254
4.6.2	Dreieckplatte mit freiem Rand unter Gleichlast	257
4.6.3	Rechteckplatte unter Gleichlast	259
4.6.4	Kreisplatte unter Gleichlast	260
4.6.5.1	Allseits gelenkig gelagerte Rechteckplatte	260
4.6.5.2	Allseits eingespannte Rechteckplatte	261
4.6.5.3	Fließkegel in einer Platte	262
4.6.5.4	Rechteckplatte mit Fließkegelbereich	263
4.6.6	Anwendung der Fließlinientheorie auf Schraubenverbindungen	264
	<b>Schrifttum</b>	266
<b>5</b>	<b>Stabilitätsnachweise (Knicken - Kippen - Beulen)</b>	273
<b>5.1</b>	<b>Einführung in die Grundlagen der Stabilitätstheorie</b>	273
5.1.1	Statisches und energetisches Stabilitätskriterium	273
5.1.2	System A (Zweistabssystem mit Drehfeder)	275
5.1.2.1	Statische Herleitung	275

5.1.2.2	Energetische Herleitung	278
5.1.3	System B (Dreistabsystem mit Drehfedern)	279
5.1.3.1	Statische Herleitung	279
5.1.3.2	Energetische Herleitung	281
5.1.4	System C (Zweistabsystem mit Verschiebungsfeder)	283
5.1.4.1	Statische Herleitung	283
5.1.4.2	Energetische Herleitung	286
5.1.5	System D (Dreistabsystem mit Verschiebungsfedern)	286
5.1.5.1	Statische Herleitung	286
5.1.5.2	Energetische Herleitung	288
<b>5.2</b>	<b>Stabtragwerke-Theorie II. Ordnung</b>	289
5.2.1	Einführung: Theorie II. Ordnung - Verzweigungstheorie	289
5.2.2	Differentialgleichungsverfahren 1. Art	292
5.2.2.1	Grundlagen	292
5.2.2.2	Erstes Beispiel: EULER-Stab	293
5.2.2.3	Zweites Beispiel: Einhäufiger Rahmen	296
5.2.3	Differentialgleichungsverfahren 2. Art	300
5.2.3.1	Grundgleichung und Lösungssystem	300
5.2.3.2	Beispiele zur Knicktheorie	303
5.2.4	Verformungsgrößenverfahren Theorie II. Ordnung	305
5.2.4.1	Grundformeln	305
5.2.4.2	Einspannungsmomente	306
5.2.4.3	Gelenkfigur	308
5.2.4.4	Knoten- und Stockwerksgleichungen (Gleichgewichtsprinzip)	309
5.2.4.5	1. Beispiel: Rechteckrahmen	310
5.2.4.6	2. Beispiel: Einstieliger Rahmen mit Pendelstützen	311
5.2.4.7	3. Beispiel: Einhäufiger Rahmen mit Kragstiel	315
5.2.4.8	4. Beispiel: Knickstab mit sprunghaft veränderlicher Biegesteifigkeit und Stützfeder	315
5.2.4.9	Netzgleichungen (Prinzip der virtuellen Verrückung)	318
5.2.4.10	5. Beispiel: Giebelrahmen mit Zugband	319
<b>5.3</b>	<b>Tragsicherheitsnachweis der Stabwerke (Stützen und Träger)</b>	337
5.3.1	Anmerkungen zur Normensituation (2012)	337
5.3.2	Lokale und globale Instabilität	339
5.3.3	Zur normativen Festlegung der Sicherheitselemente	339
5.3.4	Europäische Knickspannungslinien	344
5.3.5	Rangordnung der Tragsicherheitsnachweise	350
5.3.5.1	Tragsicherheitsnachweis - Rang 1	350
5.3.5.2	Versagenspfad und Grenzzustände	354
5.3.5.3	Tragsicherheitsnachweise - Rang 2	360
5.3.5.4	Tragsicherheitsnachweise mittels Interaktionsformeln - Biegedrillkippen	364
5.3.6	Verzweigungslösungen für Stabwerke (Stäbe und Träger)	368
5.3.6.1	Vorbemerkungen	368
5.3.6.2	Verzweigungslösungen für den Biegeknicknachweis	369
5.3.6.3	Verzweigungslösungen für den Biegedrillknicknachweis	374
5.3.6.4	Verzweigungslösungen für den Biegedrillkippnachweis	379
5.3.7	Mehrteilige Druckstäbe	392
5.3.7.1	Rahmenstäbe - Gitterstäbe	392
5.3.7.2	Knickkraft und Knickschlankheit schubweicher Stäbe	394
5.3.7.3	Tragsicherheitsnachweis	398

5.3.7.4	Beispiele	401
<b>5.4</b>	<b>Tragsicherheitsnachweis der Platten und Plattentragwerke</b>	406
5.4.1	Allgemeine Sicherheitsfragen	406
5.4.2	Einfache Lösungen der linearen Beultheorie	409
5.4.3	Tragsicherheitsnachweis unausgesteifter Platten	414
5.4.4	Beispiele	419
5.4.5	Ausgesteifte Rechteckplatten	424
5.4.6	Grenzverhältnis $b/t$ dünnwandiger Teile von Druck- und Biegegliedern	425
5.4.7	Überkritische Tragfähigkeit	426
5.4.7.1	Wirksame Breite	426
<b>5.5</b>	<b>Tragsicherheitsnachweis der Schalen und Schalentragwerke</b>	431
5.5.1	Allgemeine Sicherheitsfragen-Nachweiskonzept	431
5.5.2	Ideale Beulspannung	434
	<b>Schrifttum</b>	434
<b>6</b>	<b>Verbindungstechnik I: Schweißverbindungen</b>	437
<b>6.1</b>	<b>Werkstoffe</b>	437
6.1.1	Stähle-Grundwerkstoffe	437
6.1.2	Zusatzwerkstoffe	438
6.1.3	Bauaufsichtliche Regelung	438
6.2	Schweißprozesse	438
6.2.1	Schmelzschweißen	439
6.2.1.1	Gasschweißen	439
6.2.1.2	Lichtbogenschweißen	443
<b>6.3</b>	<b>Konstruktive Ausbildung der Schweißnähte</b>	444
6.3.1	Brennschneiden	444
6.3.2	Nahtformen	445
<b>6.4</b>	<b>Tragsicherheitsnachweis der Schweißverbindungen</b>	446
6.4.1	Stumpfnähte	446
6.4.2	Kehlnähte	448
6.4.3	Kombination von Stumpf- und Kehlnähten	451
6.4.4	Zusammengesetzte (mehrachsige) Beanspruchung	451
6.4.5	Kennzeichnung und Sinnbilder der Schweißnähte	453
6.4.6	Berechnungsbeispiele	453
6.4.7	Zur Theorie der Kehlnähte	471
6.4.7.1	Verteilung der Schubkräfte in Kehlnähten	471
6.4.7.2	Experimenteller Befund	474
6.4.8	Zur Theorie, Berechnung und Ausbildung von Schweißverbindungen	476
6.5	<b>Sicherheitsaspekte</b>	477
6.5.1	Eigenspannungen (Schrumpfspannungen)	477
6.5.2	Wärmeeinflusszone - Gefügeumwandlung	487
6.5.3	Grobkornbildung	480
6.5.4	Seigerung - Bruch durch Dopplung	481
6.5.5	Terrassenbildung - Terrassenbruch	481
6.5.6	Alterung - Reckalterung	483
6.5.7	Rissarten beim Abkühlen der Schweißnaht	483
6.5.8	Sprödbruch	484
6.5.8.1	Vorbemerkung: Riss- und Bruchformen	484
6.5.8.2	Historische Anmerkung	485

6.5.8.3	Ursachen des Sprödbruchs	486
6.5.8.4	Regelsetzung	488
<b>6.6</b>	<b>Allgemeine Anhalte zur Konstruktion und Fertigung</b>	490
<b>6.7</b>	<b>Qualifikationsnachweis</b>	491
	<b>Schrifttum</b>	493
<b>7</b>	<b>Verbindungstechnik III: Schrauben- und Nietverbindungen</b>	<b>497</b>
<b>7.1</b>	<b>SL- und GV-Verbindungen - Grundsätzliche Unterschiede (BUd 2)</b>	497
<b>7.2</b>	<b>Werkstoffe-Normung</b>	499
7.2.1	Niete	499
7.2.2	Schrauben	499
<b>7.3</b>	<b>SL- und SLP-Verbindungen</b>	504
7.3.1	Fertigung der Nietverbindungen	504
7.3.2	Fertigung der SL- und SLP-Schraubenverbindungen	505
7.3.3	Durchmesser und Anordnung der Niete und Schrauben	508
7.3.4	Tragverhalten bei Scher-, Lochleibungs- und Zugbeanspruchung	510
7.3.5	Tragsicherheitsnachweise der SL- und SLP-Verbindungen	513
7.3.5.1	Nachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	513
7.3.5.2	Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	517
7.3.5.3	Beispiele zum Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800-1:2008	517
7.3.5.4	Ergänzende Anmerkungen zum Tragsicherheitsnachweis	529
<b>7.4</b>	<b>GV- und GVP-Verbindungen</b>	533
7.4.1	Fertigung der GV- und GVP-Verbindungen	533
7.4.2	Tragverhalten und Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung	538
7.4.3	Tragverhalten und Versagensformen bei Zugbeanspruchung	539
7.4.4	Tragsicherheitsnachweis der GV- und GVP-Verbindungen	541
7.4.4.1	Nachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	541
7.4.4.2	Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	543
7.4.4.3	Beispiele zum Tragsicherheitsnachweis	544
<b>7.5</b>	<b>Versuche zum Tragverhalten von Schraubenverbindungen</b>	547
7.5.1	Vorbemerkungen	547
7.5.2	Projekt 1: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil I	547
7.5.3	Projekt 2: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil II	548
7.5.4	Projekt 3: Tragversuche an SL- und VSL-Verbindungen	549
7.5.5	Projekt 4: Vergleichende Tragversuche an SL-, SLP-, GV- und GVP-Verbindungen	553
7.5.6	Projekt 5: Abschertragfähigkeit mehrerer hintereinander liegender Schrauben [52]	558
7.5.7	Schraubenverbindung als diskontinuierliche Scherverbindung	560
7.5.7.1	Elasto-statische Theorie	560
7.5.7.2	Experimenteller Befund	561
<b>7.6</b>	<b>Vorgespannte Schraubenverbindungen bei zentrischem und exzentrischem Zug</b>	562
7.6.1	Vorbemerkung	562
7.6.2	Verspannungsdreieck	563
7.6.3	Federmodell bei vorgespannten Stoß- und Verankerungskonstruktionen	566
7.6.4	Stimplatten- und Flanschverbindungen	567
7.6.4.1	Allgemeines	567
7.6.4.2	Elasto-statische Theorie des L-Modells	568
7.6.4.3	Plasto-statische Theorie des L-Modells	571
7.6.4.5	Anmerkungen und Ergänzungen zum exzentrischen Flanschstoß (L-Modell)	575
<b>7.7</b>	<b>Ermüdungsfestigkeit auf Zug und Biegung beanspruchter Schraubenverbindungen</b>	581

7.7.1	Ermüdungsfestigkeit axial zugbeanspruchter Schrauben	581
7.7.2	Beispiel: Kopfplattenstoß in einem Kranbahnträger	585
7.7.3	Ermüdungsfestigkeit von auf Zug und Biegung beanspruchter Schraubenverbindungen	587
	<b>Schrifttum</b>	593
<b>8</b>	<b>Verbindungstechnik III: Bolzenverbindungen mit Augenlaschen</b>	<b>599</b>
<b>8.1</b>	<b>Einsatzbereiche - Allgemeine Hinweise</b>	599
<b>8.2</b>	<b>Statische Grenztragfähigkeit von Augenstab und Bolzen</b>	601
8.2.1	Vorbemerkungen	601
8.2.2	Ehemalige Bemessungsansätze für Augenbleche	603
8.2.3	Bemessungsansatz für Bolzen	603
8.2.4	Statische Tragversuche - Bezug zum ehemaligen Nachweisformat	604
8.2.5	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800-1:2008	606
8.2.6	Beispiel zum Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800-1:2008	608
8.2.7	Statische Tragversuche an Laschen mit DIN - Auge	609
8.2.8	Ergänzende Hinweise zur konstruktiven und rechnerischen Auslegung	611
8.2.9	Augenstabformen im Stahlwasserbau	613
<b>83</b>	<b>Ermüdungsfestigkeitsnachweis</b>	614
8.3.1	Kerbfaktoren für Augenstäbe	614
8.3.2	Ermüdungsversuche an Laschen mit DIN-Auge	616
8.3.3	Nachweisformat	617
	<b>Schrifttum</b>	618
<b>9</b>	<b>Verbindungstechnik IV: Sondertechniken</b>	<b>621</b>
<b>9.1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	621
<b>9.2</b>	<b>Punktschweißen</b>	621
<b>9.3</b>	<b>Bolzenschweißen</b>	623
<b>9.4</b>	<b>Schweißen von Kranschienensößen</b>	625
<b>9.5</b>	<b>Schließringbolzen</b>	626
<b>9.6</b>	<b>Blindniete</b>	626
<b>9.7</b>	<b>Blechschraben - Setzbolzen</b>	627
<b>9.8</b>	<b>Dübel / Anker</b>	627
<b>9.9</b>	<b>Trägerklemmen</b>	629
<b>9.10</b>	<b>Metallkleben</b>	629
9.10.1	Klebeteknik	629
9.10.2	Einführung in die Theorie der Klebeverbindung	631
	<b>Schrifttum</b>	636
<b>10</b>	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlhochbau</b>	<b>641</b>
<b>10.1</b>	<b>Toleranz-und Modulordnung - Bewegungsfugen</b>	641
10.1.1	Toleranzordnung im Maschinenbau	641
10.1.2	Toleranzordnung im Stahlbau - Ausführung	643
10.1.3	Toleranzordnung im Hochbau - Ausführung	643
10.1.4	Maß-und Modulordnung	644
10.1.5	Bewegungsfugen	646
<b>10.2</b>	<b>Dauerhaftigkeit - Korrosionsschutz</b>	647
<b>10.3</b>	<b>Baulicher Brandschutz</b>	647
10.3.1	Allgemeine Hinweise	647
10.3.2	Brandverlauf und Brandbelastung	649

10.3.3	Verhalten ungeschützter und geschützter Bauteile und Systeme bei Brandeinwirkung	650
10.3.4	DIN 4102-Bauordnungen	655
10.3.5	Baulicher Brandschutz durch klassifizierte Maßnahmen	656
<b>10.4</b>	<b>Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit</b>	<b>659</b>
10.4.1	Nachweis der Tragfähigkeit	659
10.4.2	Imperfektionen	661
10.4.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	661
<b>10.5</b>	<b>Vorspannung</b>	<b>665</b>
<b>10.6</b>	<b>Stützen</b>	<b>668</b>
10.6.1	Stützenarten - Querschnittsformen	668
10.6.2	Stützenstöße	670
10.6.3	Stützenfußkonstruktionen	672
10.6.3.1	Konstruktive Ausbildung	672
10.6.3.2	Druckpressung - Druck- und Ankerkräfte	677
10.6.3.3	Fußplatten - Rippen/Steifen	680
10.6.3.4	Beispiele: Zentrisch belastete Fußplatten	686
10.6.3.5	Montageanker	690
10.6.3.6	Zuganker-Beispiel	692
10.6.3.7	Verankerung ohne und mit Vorspannung - Beispiele	697
10.6.4	Köcherfundamente	705
10.6.4.1	Konstruktive Ausbildung	705
10.6.4.2	Berechnungsansatz: Kontinuierliche Pressung	706
10.6.4.3	Berechnungsansatz: Elastische Bettung	710
10.6.4.4	Tragversuche und Folgerungen	712
<b>10.7</b>	<b>Vollwandträger</b>	<b>717</b>
10.7.1	Konstruktive Ausbildung	717
10.7.2	Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit	723
10.7.3	Trägerstöße	726
10.7.3.1	Allgemeines	726
10.7.3.2	Geschweißte Trägerstöße	727
10.7.3.3	Geschraubte Trägerstöße - Beispiel	730
<b>10.8</b>	<b>Querkraftbeanspruchte ('gelenkige') Trägeranschlüsse</b>	<b>738</b>
10.8.1	Allgemeine Konstruktionshinweise	738
10.8.2	Beispiele - Ergänzungen	746
<b>10.9</b>	<b>Querkraft- und momentenbeanspruchte Trägeranschlüsse - Rahmenecken</b>	<b>750</b>
10.9.1	Allgemeine Konstruktionshinweise	750
10.9.2	Beispiel - Ergänzungen	758
10.9.3	Biegesteife Stirnplattenanschlüsse mit vorgespannten hochfesten Schrauben	764
10.9.4	Berechnungsanweisung - Beispiel	765
<b>Schrifttum</b>		<b>769</b>
<b>11</b>	<b>Stahlleichtbau</b>	<b>773</b>
<b>11.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>773</b>
<b>11.2</b>	<b>Zum Tragverhalten dünnwandiger Bauteile im überkritischen Bereich</b>	<b>773</b>
<b>11.3</b>	<b>Herstellung der Trapezbleche - Profiltypen</b>	<b>777</b>
<b>11.4</b>	<b>Statische Funktion der Stahltrapezprofile</b>	<b>782</b>
<b>11.5</b>	<b>Verwendung der Trapezprofile als lastabtragende Biegeglieder</b>	<b>783</b>
11.5.1	Optimierung der Profilform	783
11.5.2	Bestimmung der zulässigen Tragfähigkeiten mittels Versuchen	784

11.5.2.1	Tragsicherheits- und Gebrauchtauglichkeitsnachweis unter Verwendung zulässiger Stütz- und Schnittgrößen	784
11.5.2.2	Ergänzende Angaben zum Tragsicherheitsnachweis mit zulässigen Auflagerkräften und zulässigen Biegemomenten sowie zur baulichen Ausbildung	786
11.5.2.3	Durchbiegnachweis	788
11.5.3	Tragsicherheits- und Gebrauchtauglichkeitsnachweis nach dem neuen Sicherheitskonzept	790
<b>11.6</b>	<b>Verwendung der Trapezprofile als Schubfelder</b>	791
11.6.1	Tragwirkung und konstruktive Ausbildung der Schubfelder	791
11.6.2	Einführung in die Schubfeldtheorie	792
11.6.3	Anwendung der Schubfeldtheorie auf Stahltrapezprofile	796
11.6.4	Beispiele	798
<b>11.7</b>	<b>Kaltprofile</b>	806
<b>Schrifttum</b>		808
12	Seile und Seilwerke	813
<b>12.1</b>	<b>Seile, Bündel und Kabel</b>	813
12.1.1	Seildraht	813
12.1.2	Seilarten	814
12.1.3	Seilendverbindungen	815
12.1.4	Korrosionsschutz	818
12.1.5	Querschnittsfläche, Gewicht und Tragkraft von Seilen	818
12.1.6	Tragsicherheitsnachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	820
12.1.7	Tragsicherheitsnachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	821
12.1.7.1	Allgemeine Hinweise	821
12.1.7.2	Versuchsbefund	821
12.1.7.3	Nachweisform nach DIN 1073 / DIN 18809	822
12.1.8	Dehnverhalten der Seile - Verformungsmodul	824
<b>12.2</b>	<b>Stangen als Zuglieder</b>	826
<b>12.3</b>	<b>Seilstatik</b>	827
12.3.1	Herleitung der Seilgleichung	827
12.3.2	Parabel	829
12.3.2.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	829
12.3.2.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	829
12.3.2.3	Ungleichhohe Aufhängepunkte	831
12.3.3	Katenoide (Kettenlinie)	835
12.3.3.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	835
12.3.3.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	836
12.3.3.3	Zur Annäherung der Katenoide durch eine Parabel	838
12.3.3.4	Ungleichhohe Aufhängepunkte	839
12.3.4	Beispiele und Ergänzungen	841
12.3.4.1	Polygonalseile unter Einzellasten	842
12.3.4.2	Flach gespannte Seile unter symmetrischer Belastung	845
12.3.4.3	Flach gespannte Seile unter unsymmetrischer Belastung	848
12.3.4.4	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit gleich hohen Aufhängepunkten	849
12.3.4.5	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit ungleich hohen Aufhängepunkten	851
12.3.4.6	Hinweise zur Berechnung von Freileitungen	852
12.3.4.7	Hinweise zur Berechnung von Fahrleitungen	855
12.3.4.8	Halte- und Abspannseile von Kranen (Fördertechnik)	855
12.3.4.9	Schrägseile mit Einzellasten	856

12.3.4.10	Hinweise zur Berechnung von Seilbahnen	858
	<b>Schrifttum</b>	866
13	<b>Türme und Masten</b>	871
<b>13.1</b>	<b>Einsatzgebiete der Türme und Mäste - Begriffe</b>	871
13.1.1	Allgemeines -	871
13.1.2	Turmartige Bauwerke für funktechnische Zwecke (Antennenträger)	874
13.1.3	Turmartige Bauwerke für andere wie funktechnische Zwecke	876
<b>13.2</b>	<b>Lastannahmen für Antennentragwerke</b>	881
13.2.1	Allgemeine Hinweise	881
13.2.2	Ungleichförmigkeit des Staudrucks	882
13.2.3	Aerodynamischer Beiwert für Fachwerktürme und-mäste	883
13.2.4	Aerodynamischer Beiwert für Einbauten und Antennenausrüstungen	885
13.2.5	Aerodynamischer Beiwert für Antennen	886
13.2.6	Windbelastung bei Montagezuständen	887
13.2.7	Lastannahmen bei Vereisung	888
<b>13.3</b>	<b>Turm- und Mastausfachung</b>	889
<b>13.4</b>	<b>Statische Berechnung der Türme und Mäste</b>	891
13.4.1	Allgemeine Berechnungshinweise	891
13.4.2	Zur Frage der kinematischen Stabilität der Turmfachwerke	897
13.4.3	Ergänzende Hinweise	900
<b>13.5</b>	<b>Berechnung abgespannter Mäste</b>	900
13.5.1	Vorbemerkungen	900
13.5.2	Unmittelbare Belastung der Seile	904
13.5.3	Seilgleichung	905
13.5.4	Federcharakteristik des dreiseiligen Abspannbündels	906
13.5.5	Hinweise zur Mastberechnung	910
13.5.6	Federcharakteristik von Abspannungen geringer Höhe	911
<b>13.6</b>	<b>Dynamische Auslegung</b>	914
13.6.1	Vorbemerkungen	914
13.6.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung einfacher Mast- und Turmstrukturen	914
13.6.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen des Einzelseiles	919
13.6.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen abgespannter Mäste	922
13.6.5	Böenreaktionsfaktor bei abgespannten Masten	924
<b>13.7</b>	<b>Berechnungsansätze nach EN 1993-3-1 (Eurocode für Türme und Mäste)</b>	926
<b>13.8</b>	<b>Zur konstruktiven Ausbildung</b>	927
<b>13.9</b>	<b>Windenergieanlagen</b>	930
13.9.1	Bauarten - Betriebsformen	930
13.9.2	Zur physikalisch-technischen Auslegung von Windkraftanlagen	933
<b>13.10</b>	<b>Blitzschutz</b>	937
	<b>Schrifttum</b>	940
14	<b>Stahlschornsteine</b>	947
<b>14.1</b>	<b>Allgemeine Hinweise zur konstruktiven Auslegung</b>	947
14.1.1	Tragrohr und Rauchrohr	947
14.1.2	Immissions- und rauchgastechische Auslegung	949
14.1.3	Korrosionsschutz	950
14.1.4	Ergänzende Hinweise	951
<b>14.2</b>	<b>Statische Auslegung</b>	951

14.2.1	Allgemeines	951
14.2.2	Windlastannahmen	952
14.2.3	Aerodynamische Beiwerte	952
14.2.4	Verformungseinfluss Theorie II. Ordnung	955
14.2.5	Nachweis des Mantelrohres	959
14.2.5.1	Nennspannungsnachweis	959
14.2.5.2	Zylindrisch-konischer Übergangsbereich (Bild 17a)	960
14.2.5.3	Fuchs- und Einstiegsöffnungen	961
14.2.5.4	Zum Beulnachweis des Mantelrohres	964
14.2.6	Ringsteifen - Einflusslinien	964
14.2.7	Mantel- und Ringsteifenbeanspruchung infolge örtlichen Winddrucks	967
14.2.8	Beispiele und Ergänzungen	971
14.2.9	Montagestöße	973
14.2.9.1	Laschenstöße-Flanschstöße	973
14.2.9.2	Beispiel: Montagestoß	975
14.2.10	Schornstein - Verankerung	981
14.2.10.1	Konstruktionsformen	981
14.2.10.2	Ankerkräfte	982
14.2.10.3	Nicht vorgespannte Verankerung	983
14.2.10.4	Vorgespannte Verankerung	990
<b>14.3</b>	<b>Dynamische Auslegung</b>	<b>994</b>
14.3.1	Vorbemerkungen	994
14.3.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung	994
14.3.3	Böeninduzierte Schwingungen	999
14.3.3.1	Windböigkeit	999
14.3.3.2	Modell nach RAUSCH	1000
14.3.3.3	Modell nach SCHLAICH	1001
14.3.3.4	Modell nach PETERSEN	1001
14.3.4	Modell nach DA VENPORT	1002
14.3.4	Wirbelinduzierte Schwingungen	1004
14.3.4.1	Strömungsphänomen	1004
14.3.4.2	Querschwingungsnachweis - Näherungsverfahren	1006
14.3.4.3	Querschwingungsnachweis - Strenges Verfahren	1007
14.3.4.4	Beispiele	1008
14.3.4.5	Zum Problem der Selbststeuerung der Wirbelstraße	1012
14.3.4.6	Querschwingungsnachweis nach RUSCHEWEYH - DIN 1055-4:2005	1014
14.3.4.7	Ergänzende Hinweise zum Querschwingungsnachweis	1017
14.3.4.8	Aerodynamische Störmaßnahmen	1019
14.3.4.9	Schwingungsdämpfer	1020
<b>Schrifttum</b>		<b>1029</b>
<b>15</b>	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlbrückenbau</b>	<b>1033</b>
<b>15.1</b>	<b>Bauformen</b>	<b>1033</b>
15.1.1	Gliederung - Systeme - Grundanforderungen	1033
15.1.2	Eisenbahnbrücken	1036
15.1.2.1	Fahrbahn	1036
15.1.2.2	Vollwandträgerbrücken	1041
15.1.2.3	Fachwerkträgerbrücken	1042
15.1.2.4	Neuzeitlicher Eisenbahnbrückenbau	1046

15.1.3	Straßenbrücken	1055
15.1.3.1	Fahrbahn	1055
15.1.3.2	Vollwandträgerbrücken-Balkenbrücken	1056
15.1.3.3	Großbrückenbau	1060
15.1.4	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken)	1064
<b>15.2</b>	<b>Nachweis der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit</b>	1068
15.2.1	Eisenbahnbrücken	1068
15.2.2	Straßenbrücken	1071
15.2.3	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken)	1073
15.2.4	Weitere Berechnungs- und Bemessungsansätze	1074
<b>15.3</b>	<b>Ausgewählte Nachweise</b>	1074
15.3.1	Ergänzende Hinweise	1074
15.3.2	Scheinbarer Elastizitätsmodul von Schrägseilen	1078
15.3.2.1	Problemstellung	1078
15.3.2.2	Herleitung des 'scheinbaren' Elastizitätsmoduls	1079
15.3.3	Verbände	1082
15.3.4	Nebenspannungen in Fachwerkbrücken	1083
15.3.5	Hängestangen von Stabbogenbrücken	1086
15.3.6	Hängebrücken - Grundlagen der Berechnung	1090
15.3.6.1	Vorbemerkungen	1090
15.3.6.2	Berechnungsmethode	1091
15.3.6.3	Berechnungsbeispiel: Hängebrücke mittlerer Spannweite	1094
15.3.6.4	Ergänzende Hinweise	1097
15.3.7	Dynamische Einflüsse beim Brückenbetrieb	1099
15.3.7.1	Stoßwirkungen	1099
15.3.7.2	Beanspruchung bei Ausfall eines Traggliedes	1101
15.3.7.3	Schwingfaktoren	1102
15.3.7.4	Weitere dynamische Einwirkungen	1104
15.3.8	Aeroelastische Einwirkung auf Brücken	1104
15.3.8.1	Einleitung	1104
15.3.8.2	Galopping-Biegeschwingungen	1105
15.3.8.3	Flatterschwingungen	1109
15.3.9	Personeninduzierte Schwingungen von Fußgängerbrücken	1113
15.3.9.1	Ursache und Art der Schwingungsanregung	1113
15.3.9.2	Schwingungstechnische Auslegung	1117
15.3.9.3	Beispiel	1119
<b>15.4</b>	<b>Brückenlager</b>	1123
15.4.1	Vorbemerkungen	1123
15.4.2	Lageranordnung	1126
15.4.3	HERTZsche Pressung	1128
15.4.4	Pressungsverteilung gegen Anschlagflächen	1132
15.4.5	Abwälzkinematik	1134
15.4.6	Behelfe für die Berechnung von Kreisplatten	1136
15.4.7	Berechnungsbeispiel	1140
15.4.8	Lagerplatten auf elastischem Halbraum	1045
15.4.9	Lagerformen	1151
15.4.9.1	Stählerne Punktkipplager	1151
15.4.9.2	Stählerne Linienkipplager	1152
15.4.9.3	Stählerne Rollenlager	1152

15.4.9.4	PTFE (Polytetrafluoräthylen) als Gleitwerkstoff	1154
15.4.9.5	Elastomer als Lagerwerkstoff	1155
15.4.9.6	Topflager	1155
15.4.9.7	Kalottenlager	1157
15.4.9.8	Elastomer-Verformungslager	1157
15.4.9.9	Lagerung der Lager	1157
	<b>Schrifttum</b>	1158
16	Elasto-statische Biegetheorie dünnwandiger Stäbe	1165
<b>16.1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	1165
<b>16.2</b>	<b>Flächenmomente</b>	1165
<b>16.3</b>	<b>Stäbe mit dünnwandigem offenen Querschnitt</b>	1166
16.3.1	Berechnung der Biege- und Schubspannungen ohne Kenntnis der Hauptachsen	1166
16.3.2	Berechnung der Biege- und Schubspannungen bei Kenntnis der Hauptachsen	1170
16.3.2.1	Rechnerische Ermittlung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1171
16.3.2.2	Zeichnerische Bestimmung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1172
16.3.3	Schubmittelpunkt	1173
16.3.4	Beispiel	1175
<b>16.4</b>	<b>Stäbe mit dünnwandigem geschlossenem Querschnitt</b>	1180
16.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1181
16.4.2	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1183
16.4.3	Beispiele	1184
16.4.3.1	Erstes Beispiel: Symmetrischer, gemischt offen-geschlossener Querschnitt	1184
16.4.3.2	Zweites Beispiel: Unsymmetr., gemischt offen-geschlossener, zweizeiliger Querschnitt	1190
<b>16.5</b>	<b>Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung</b>	1196
<b>16.6</b>	<b>Zur numerischen Berechnung der Flächenmomente</b>	1197
<b>16.7</b>	<b>Vollwandige Träger veränderlicher Höhe</b>	1208
<b>16.8</b>	<b>Berücksichtigung der Schubverzerrung bei der Stabbiegung</b>	1211
16.8.1	Schubsteifigkeit $\kappa = G \cdot \kappa_G$ - Schubkorrekturfaktor	1211
16.8.2	Trägerdurchbiegung infolge Querkraft	1215
16.8.3	Beispiele und Ergänzungen	1216
16.8.4	Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung einschließlich Schubverzerrung	1218
<b>16.9</b>	<b>Stäbe mit starker Krümmung bei einachsiger Biegung und Normalkraft</b>	1218
16.9.1	Biegespannungen	1218
16.9.2	Radialspannungen	1221
16.9.3	Formänderungen	1222
16.9.4	Beispiele und Ergänzungen	1223
16.9.5	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften I-Querschnitten	1227
16.9.6	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften Kastenquerschnitten	1229
16.9.7	Experimenteller Befund	1230
16.9.8	Hinweise zur praktischen Ausführung	1233
16.9.9	Rohrkrümmer	1233
<b>16.10</b>	<b>Berechnung der Randspannungen mit Hilfe des Querschnittskerns</b>	1233
16.10.1	Bestimmung des Querschnittskerns	1233
16.10.2	Beispiele und Ergänzungen	1236
16.10.3	Maßgebende Wirkungsrichtung bei umlaufender Belastung	1238
<b>16.11.</b>	<b>Berechnung der Spannungen bei versagender Zugzone</b>	1239
16.11.1	Bestimmung der klaffenden Fuge	1239
16.11.2	Beispiele	1241

<b>16.12</b>	<b>Zugbiegung Theorie n. Ordnung</b>	1245
<b>16.13</b>	<b>Nichtlineare Zugbiegung schlanker Stäbe mit größerem Durchhang</b>	1248
16.13.1	Einführung	1248
16.13.2	Dehnsteife Hängestäbe (Bild 118)	1248
16.13.3	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Näherungslösungen	1251
16.13.4	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für $\nu = \text{konst.}$	1252
16.13.5	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für beliebige Belastung $p(x)$	1253
16.13.6	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Vereinfachte Lösung für $\nu = \text{konst.}$	1257
<b>Schrifttum</b>		1260
17	Elasto-statische Torsionstheorie dünnwandiger Stäbe	1265
<b>17.1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	1265
<b>17.2</b>	<b>Torsion gerader Stäbe mit dickwandigem Querschnitt</b>	1265
17.2.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (ST-VENANTSche Torsion)	1265
17.2.1.1	Torsionsmoment	1265
17.2. .2	Gleichgewichtsgleichungen - Spannungsfunktion $\langle P$	1266
17.2. .3	Formänderungsgleichungen	1267
17.2. .4	Grundgleichung für $\langle P$ - Randbedingungen	1269
17.2. .5	Torsionsträgheitsmoment $I_T$ dickwandiger Querschnitte	1270
17.2. .6	Anmerkung zur Lösung der Grundgleichung	1274
17.2. .7	Schubspannungslinien	1275
17.2. .8	Seifenhautgleichnis	1276
17.2. .9	Lösungen für verschiedene Querschnittsformen	1277
17.2. .10	Beispiele und Ergänzungen	1289
17.2. .11	Grundgleichung der ST-VENANTSchen Torsion und Lösungssystem	1295
17.2.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung	1299
<b>17.3</b>	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, offenen Querschnitt</b>	1300
17.3.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (Primärtorsion)	1300
17.3.1.1	Primäre Schubspannungen	1300
17.3.1.2	Verdrehung, Verdrillung (Verwindung) und Verwölbung - Einheitsverwölbung	1300
17.3.1.3	Transformation der Einheitsverwölbung bei Verlagerung der Drehachse	1303
17.3.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung (Wölbkrafttorsion)	1305
17.3.2.1	Grundgleichung der Wölbkrafttorsion	1305
17.3.2.2	Lösungssystem - Rand- und Übergangsbedingungen	1308
17.3.2.3	Wölbkrafttorsion bei Stäben mit I-Querschnitt	1311
17.3.2.4	Schubmittelpunkt	1312
17.3.2.5	Beispiele	1317
17.3.2.6	Ergänzende Hinweise	1322
<b>17.4</b>	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt</b>	1323
17.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1323
17.4.2	Beispiel: Einzelliger Kastenquerschnitt	1325
17.4.3	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1327
17.4.4	Stäbe mit gemischt offen-geschlossenem Querschnitt	1329
17.4.5	Beispiele und Ergänzungen	1331
17.4.5.1	Kreisrohrquerschnitt (dünn- und dickwandig)	1331
17.4.5.2	Unsymmetrischer zweizeiliger Querschnitt	1332
<b>17.5</b>	<b>Rechenbehelfe</b>	1336
<b>17.6</b>	<b>Gebundene Biegung - Gebundene Torsion</b>	1337
<b>17.7</b>	<b>Ergänzende Hinweise</b>	1343

<b>17.8</b>	<b>Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen</b>	1344
17.8.1	Allgemeine Hinweise	1344
17.8.2	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte ohne Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen	1345
17.8.3	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte mit Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen	1349
	<b>Schrifttum</b>	1350
<b>18</b>	<b>Anstrengungs- und Bruchtheorie</b>	<b>1357</b>
<b>18.1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	1357
<b>18.2</b>	<b>Ebener Spannungszustand</b>	1358
18.2.1	Hauptspannungen	1358
18.2.2	Beispiele und Ergänzungen	1362
18.2.3	Verzerrungen des ebenen Spannungszustandes	1364
18.2.4	Vergleichsspannungen bei vorwiegend ruhender (statischer) Einwirkung	1365
18.2.5	Vergleichsspannungen bei nicht vorwiegend ruhender (zyklischer) Einwirkung	1368
<b>18.3</b>	<b>Räumlicher Spannungszustand</b>	1369
18.3.1	Formale Vereinbarungen	1369
18.3.2	Verschiebungstensor	1369
18.3.3	Verzerrungstensor	1370
18.3.4	Spannungstensor	1373
18.3.5	HOOKEsches Gesetz	1375
18.3.6	Kugeltensor und Deviator	1376
18.3.7	Beispiele und Ergänzungen	1377
18.3.8	Festigkeitshypothese von HUBER-MISES-HENCKY für zähe Metalle	13 80
18.3.8.1	Vorbemerkungen	1380
18.3.8.2	Invariantentheorie nach v. MISES	1380
18.3.8.3	Oktaederschubspannung	1381
18.3.8.4	Hypothese der konstanten Gestaltänderungsarbeit	1382
18.3.8.5	Ergänzungen	1384
<b>18.4</b>	<b>Experimente zur Problematik des Streckgrenzenansatzes</b>	1385
18.4.1	'Statische' Streckgrenze	1385
18.4.2	Elastisch-plastische Hysterese - BAUSCHINGER-Effekt	1388
18.4.3	Bruchbilder statischer Zugversuche	1389
<b>18.5</b>	<b>Bruchmechanik (Einführung)</b>	1390
18.5.1	Vorbemerkungen	1390
18.5.2	Rissöffnungen - Spannungsintensitätsfaktor $K_{Xc}$	1391
18.5.2.1	Elasto-statische Theorie des Spannungsfeldes vor einer Rissspitze	1391
18.5.2.2	Beispiele und Ergänzungen	1393
18.5.3	Risstheorie bei statischer Beanspruchung - Vorwiegend ruhende Beanspruchung	1396
18.5.3.1	GRIFFITH-Riss(1921)-G-Konzept	1396
18.5.3.2	IRWIN-Riss(1952)- $X_{Ic}$ -Konzept	1399
18.5.3.4	Konzepte der Fleißbruchmechanik	1401
18.5.4	Spannungsrissskorrosion	1402
18.5.5	Risstheorie bei zyklischer Beanspruchung - Vorwiegend nicht ruhende Beanspruchung	1403
18.5.5.1	Grundlagen	1403
18.5.5.2	Beispiele und Ergänzungen	1404
	<b>Schrifttum</b>	1409
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	1413