

# Inhaltsverzeichnis

---

1	<b>Werkstoff Stahl – Werkstoffeigenschaften – Werkstoffprüfung</b> .....	1
	<i>Markus Feldmann</i>	
1.1	<b>Stahlherstellung</b> .....	3
1.2	<b>Grundlagen der Metallkunde</b> .....	8
1.2.1	Kristalle, Mischkristalle, Phasen .....	9
1.2.2	Aufbau der Legierungen – Zustandsschaubilder .....	11
1.2.3	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild .....	16
1.2.4	Technologische Einstellung der Stahleigenschaften .....	18
1.3	<b>Werkstoffprüfung – Mechanische Eigenschaften</b> .....	29
1.3.1	Materialhärte .....	30
1.3.2	Materialfestigkeit und -zähigkeit .....	32
1.3.3	Bauteilfestigkeit und Bauteilzähigkeit (Bauteilduktilität) .....	47
1.3.4	Ermüdungsfestigkeit (Dauerfestigkeit) .....	60
1.3.5	Kerbschlagzähigkeit .....	90
1.4	<b>Stähle für den Stahlbau</b> .....	92
1.4.1	Allgemeines – Bezeichnungssystem .....	92
1.4.2	Bezeichnungssystem für Baustähle (Lieferbedingungen) .....	94
1.4.3	Baustähle – DIN EN 10025 .....	96
1.4.4	Nichtrostende Stähle – DIN EN 10088 .....	102
1.4.5	Druckbehälterstähle – DIN EN 10028 .....	105
1.4.6	Weitere Stahlsorten .....	107
1.4.7	Stahlguss .....	108
1.4.8	Eisenguss (Gusseisen) .....	108
1.4.9	Stahlerzeugnisse– Lieferformen – Begriffe .....	110
1.5	<b>Korrosion – Korrosionsschutz</b> .....	113
1.5.1	Elektrochemische Korrosion in der Atmosphäre .....	113
1.5.2	Fertigungsbeschichtungen (FB) – Walzstahlkonservierung .....	116
1.5.3	Korrosionsschutz durch Beschichtungen .....	117
1.5.4	Korrosionsschutz durch metallische Überzüge .....	120
1.5.5	Spannungsrissskorrosion und Schwingungsrissskorrosion .....	125
	<b>Literatur</b> .....	126
2	<b>Elasto-statischer Festigkeitsnachweis</b> .....	129
	<i>Jörg Laumann</i>	
2.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	131
2.2	<b>Tragsicherheitsnachweise nach Eurocode 3</b> .....	140
2.3	<b>Normalspannungen infolge Zug/Druck und Biegung</b> .....	143
2.3.1	Berechnungsformel .....	143
2.3.2	Nachweis der Zug- und Druckspannungen .....	144
2.3.3	Grenzzugkräfte einseitiger Winkelanschlüsse .....	148
2.3.4	Beispiele .....	148
2.3.5	Nachweis der Biegespannungen .....	154

2.3.6	Beispiel .....	157
2.3.7	Zur Berechnung der Trägheitsmomente .....	160
2.3.8	Aufteilung eines Biegemomentes auf die Teile eines Querschnittes .....	162
2.4	<b>Schubspannungen infolge Querkraft</b> .....	164
2.4.1	Berechnungsformel .....	164
2.4.2	Nachweis der Schubspannungen .....	169
2.5	<b>Herleitung einiger Berechnungsformeln – Beispiele/Ergänzungen</b> .....	173
2.6	<b>Mittragende (effektive) Breite</b> .....	185
2.6.1	Allgemeines .....	185
2.6.2	Berücksichtigung von Schubverzerrungen nach DIN EN 1993-1-5 .....	188
2.7	<b>Experimenteller Befund</b> .....	191
2.8	<b>Schubmittelpunkt</b> .....	192
2.8.1	Problemstellung – Biegung von [-Profilen .....	192
2.8.2	Beispiele .....	196
2.8.3	Alternative Berechnungsform .....	198
2.9	<b>Schubspannungen infolge Torsion</b> .....	200
2.9.1	Gegenüberstellung: Primärtorsion – Sekundärtorsion .....	200
2.9.2	Primärtorsion (ST-VENANT'sche Torsion) .....	202
2.9.3	Einführung in die Theorie der Sekundärtorsion .....	210
2.10	<b>Nachweis kombinierter Normal- und Schubspannungszustände</b> .....	214
2.10.1	Vergleichsspannung bei statischer Beanspruchung .....	214
2.10.2	Beispiele .....	218
2.10.3	Vergleichsspannung bei dynamischer Beanspruchung .....	226
	<b>Literatur</b> .....	227
3	<b>Elasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b> .....	229
	<i>Manuel Krahwinkel</i>	
3.1	<b>Einführung</b> .....	230
3.2	<b>Kräfte und Momente</b> .....	234
3.3	<b>Grad der statischen Bestimmtheit</b> .....	235
3.3.1	Ebene Stabtragwerke .....	235
3.3.2	Räumliche Stabtragwerke .....	242
3.4	<b>Berechnung der Stabtragwerke</b> .....	242
3.4.1	Statisch bestimmte Stabtragwerke .....	242
3.4.2	Statisch unbestimmte Stabtragwerke .....	243
3.4.3	Berechnung der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen) .....	244
3.4.4	Einflusslinien für Stütz-, Schnitt- und Verformungsgrößen .....	253
3.5	<b>Allgemeine Hinweise zu den Berechnungsverfahren der Stabstatik</b> .....	256
	<b>Literatur</b> .....	257
4	<b>Plasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b> .....	259
	<i>Matthias Kraus</i>	
4.1	<b>Querschnittstragfähigkeit eines Zugstabes</b> .....	261
4.1.1	Eigenspannungsfreier Querschnitt .....	261
4.1.2	Eigenspannungsbehafteter Querschnitt .....	261
4.1.3	Berücksichtigung der Verfestigung .....	264
4.2	<b>Fließzonentheorie</b> .....	267

4.2.1	Exemplarische Darstellung am Einfeldbalken mit Rechteckquerschnitt .....	267
4.2.2	Verallgemeinerung .....	276
4.3	<b>Fließgelenktheorie</b> .....	276
4.3.1	Querschnittstragfähigkeit eines Biegestabes .....	276
4.3.2	Fließgelenkhypothese .....	281
4.3.3	Be- und Entlastung .....	285
4.3.4	Einfeldträger – Durchlaufträger .....	289
4.3.5	Tragkraftsätze .....	302
4.3.6	Rahmentragwerke .....	304
4.3.7	Normalkraft- und Querkraftinteraktion .....	317
4.4	<b>Sicherheitsaspekte</b> .....	335
4.4.1	Zur Entwicklung der Fließgelenktheorie ('Traglastverfahren') .....	335
4.4.2	Zur Materialfrage .....	338
4.4.3	Einrechnung der Verfestigung .....	339
4.4.4	Rotationskapazität .....	341
4.4.5	Zur Frage der Systemeignung .....	355
4.4.6	Sicherheit gegen lokale Instabilität .....	357
4.4.7	Sicherheit gegen globale Instabilität .....	358
4.5	<b>Regelwerke – Baupraktischer Tragsicherheitsnachweis</b> .....	359
4.5.1	Rückblick auf DIN 18800-1 und -2: 2008-11 .....	359
4.5.2	EUROCODE 3 (DIN EN 1993-1-1:2010-12 und NA) .....	371
4.6	<b>Fließlinientheorie</b> .....	377
4.6.1	Hypothese der Fließlinientheorie .....	377
4.6.2	Dreieckplatte mit freiem Rand unter Gleichlast .....	379
4.6.3	Rechteckplatte unter Gleichlast .....	383
4.6.4	Kreisplatte unter Gleichlast .....	384
4.6.5	Rechteckplatte unter mittlerer Einzellast .....	385
4.6.6	Anwendung der Fließlinientheorie auf Schraubenverbindungen .....	390
	<b>Literatur</b> .....	394
5	<b>Stabilitätsnachweise (Knicken – Kippen – Beulen)</b> .....	399
	<i>Markus Feldmann</i>	
5.1	<b>Einführung in die Grundlagen der Stabilitätstheorie</b> .....	401
5.1.1	Statisches und energetisches Stabilitätskriterium .....	402
5.1.2	System A (Zweistabsystem mit Drehfeder, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	404
5.1.3	System B (Dreistabsystem mit Drehfedern, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	409
5.1.4	System C (Zweistabsystem mit Verschiebungsfeder, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	414
5.1.5	System D (Dreistabsystem mit Verschiebungsfedern, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	418
5.2	<b>Stabtragwerke – Theorie II. Ordnung</b> .....	421
5.2.1	Einführung: Theorie II. Ordnung – Verzweigungstheorie .....	421
5.2.2	Differenzialgleichungsverfahren 1. Art. ....	425
5.2.3	Differenzialgleichungsverfahren 2. Art. ....	438
5.2.4	Verformungsgrößenverfahren Theorie II. Ordnung .....	444
5.3	<b>Tragsicherheitsnachweis der Stabwerke (Stützen und Träger)</b> .....	481
5.3.1	Anmerkungen zur Normensituation .....	481
5.3.2	Lokale und globale Instabilität .....	483
5.3.3	Zur normativen Festlegung der Sicherheitselemente .....	483

5.3.4	Europäische Knickspannungslinien . . . . .	489
5.3.5	Rangordnung der Tragsicherheitsnachweise . . . . .	496
5.3.6	Verzweigungslösungen für Stabwerke (Stäbe und Träger) . . . . .	516
5.3.7	Mehrteilige Druckstäbe . . . . .	543
5.4	<b>Tragsicherheitsnachweis der Platten und Plattentragwerke</b> . . . . .	558
5.4.1	Allgemeine Sicherheitsfragen . . . . .	558
5.4.2	Einfache Lösungen der linearen Beultheorie . . . . .	562
5.4.3	Tragsicherheitsnachweis unausgesteifter Platten . . . . .	568
5.4.4	Beispiele . . . . .	574
5.4.5	Ausgesteifte Rechteckplatten . . . . .	576
5.4.6	Grenzverhältnis $b/t$ dünnwandiger Teile von Druck- und Biegegliedern . . . . .	577
5.4.7	Überkritische Tragfähigkeit . . . . .	578
5.5	<b>Tragsicherheitsnachweis der Schalen und Schalenträgerwerke</b> . . . . .	584
5.5.1	Allgemeine Sicherheitsfragen – Nachweiskonzept . . . . .	584
5.5.2	Ideale Beulspannung . . . . .	587
	<b>Literatur</b> . . . . .	588
6	<b>Verbindungstechnik I: Schweißverbindungen</b> . . . . .	589
	<i>Thomas Ummenhofer</i>	
6.1	<b>Werkstoffe</b> . . . . .	591
6.1.1	Stähle – Grundwerkstoffe . . . . .	591
6.1.2	Zusatzwerkstoffe . . . . .	592
6.1.3	Bauaufsichtliche Regelungen . . . . .	592
6.2	<b>Schweißprozesse</b> . . . . .	595
6.2.1	Schmelzschweißen . . . . .	595
6.3	<b>Konstruktive Ausbildung von Schweißnähten</b> . . . . .	603
6.3.1	Brennschneiden . . . . .	603
6.3.2	Plasmaschneiden . . . . .	604
6.3.3	Nahtformen . . . . .	605
6.4	<b>Tragsicherheitsnachweis von Schweißverbindungen</b> . . . . .	607
6.4.1	Stumpfnähte . . . . .	608
6.4.2	Kehlnähte . . . . .	609
6.4.3	Kennzeichnung und Sinnbilder der Schweißnähte . . . . .	614
6.4.4	Bemessungsbeispiele . . . . .	614
6.4.5	Theorie der Kehlnähte . . . . .	634
6.4.6	Zur Theorie, Berechnung und Ausbildung von Schweißverbindungen . . . . .	642
6.5	<b>Sicherheitsaspekte</b> . . . . .	642
6.5.1	Eigenspannungen (Schrumpfspannungen) . . . . .	642
6.5.2	Wärmeeinflusszone – Gefügemwandlung . . . . .	644
6.5.3	Grobkornbildung . . . . .	646
6.5.4	Seigerung – Bruch durch Dopplung . . . . .	647
6.5.5	Terrassenbildung – Terrassenbruch . . . . .	648
6.5.6	Alterung – Reckalterung . . . . .	649
6.5.7	Rissarten beim Abkühlen der Schweißnaht . . . . .	650
6.5.8	Sprödbruch . . . . .	651
6.6	<b>Allgemeine Anhalte zur Konstruktion und Fertigung</b> . . . . .	656

6.7	<b>Qualifikationsnachweis</b> .....	658
6.7.1	Ausführungsklassen (Execution Classes) .....	658
6.7.2	Werkseigene Produktionskontrolle (WPK) .....	659
	<b>Literatur</b> .....	660
7	<b>Verbindungstechnik II: Schrauben- und Nietverbindungen</b> .....	665
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
7.1	<b>SL- und GV-Verbindungen – Grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale (■ Abb. 7.2)</b> .....	667
7.2	<b>Werkstoffe – Normung</b> .....	669
7.2.1	Niete .....	669
7.2.2	Schrauben .....	670
7.3	<b>SL- und SLP-Verbindungen, vgl. auch DIN 18800-7:2008 bzw. DIN EN 1993-1-8: Kategorie A</b> .....	679
7.3.1	Fertigung der Nietverbindungen .....	679
7.3.2	Fertigung der SL- und SLP-Schraubenverbindungen .....	681
7.3.3	Durchmesser und Anordnung der Niete und Schrauben .....	686
7.3.4	Tragverhalten bei Scher-, Lochleibungs- und Zugbeanspruchung .....	689
7.3.5	Tragsicherheitsnachweise der SL- und SLP-Verbindungen .....	693
7.4	<b>GV- und GVP-Verbindungen (DIN EN 1993-1-8: Kategorie B/C)</b> .....	724
7.4.1	Fertigung der GV- und GVP-Verbindungen .....	724
7.4.2	Tragverhalten und Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung .....	731
7.4.3	Tragverhalten und Versagensform bei Zugbeanspruchung .....	733
7.4.4	Tragsicherheitsnachweis der GV- und GVP-Verbindungen .....	736
7.5	<b>Versuche zum Tragverhalten von Schraubenverbindungen</b> .....	743
7.5.1	Vorbemerkungen .....	743
7.5.2	Projekt 1: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil I .....	743
7.5.3	Projekt 2: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil II .....	745
7.5.4	Projekt 3: Tragversuche an SL- und VSL-Verbindungen .....	746
7.5.5	Projekt 4: Vergleichende Tragversuche an SL-, SLP-, GV- und GVP-Verbindungen (■ Abb. 7.77) .....	751
7.5.6	Projekt 5: Abschertragfähigkeit mehrerer hintereinander liegender Schrauben .....	758
7.5.7	Schraubenverbindung als diskontinuierliche Scherverbindung .....	762
7.6	<b>Vorgespannte Schraubenverbindungen bei zentrischer und exzentrischer Zugbeanspruchung</b> .....	766
7.6.1	Vorbemerkung .....	766
7.6.2	Verspannungsdreieck .....	766
7.6.3	Federmodell bei vorgespannten Stoß- und Verankerungskonstruktionen .....	770
7.6.4	Stirnplatten- und Flanschverbindungen .....	772
7.7	<b>Ermüdungsfestigkeit auf Zug und Biegung beanspruchter Schraubenverbindungen</b> .....	791
7.7.1	Ermüdungsfestigkeit axial zugbeanspruchter Schrauben .....	791
7.7.2	Beispiel: Kopfplattenstoß in einem Kranbahnträger .....	796
7.7.3	Ermüdungsfestigkeit von auf Zug und Biegung beanspruchten Schraubenverbindungen .....	799
	<b>Literatur</b> .....	807

8	<b>Verbindungstechnik III: Bolzenverbindungen mit Augenlaschen</b> .....	815
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
8.1	<b>Einsatzbereiche – Allgemeine Hinweise</b> .....	816
8.2	<b>Statische Grenztragfähigkeit von Augenstab und Bolzen</b> .....	819
8.2.1	Vorbemerkungen .....	819
8.2.2	Ehemalige Bemessungsansätze für Augenbleche .....	821
8.2.3	Bemessungsansatz für Bolzen .....	822
8.2.4	Statische Tragversuche – Bezug zum ehemaligen Nachweisformat .....	824
8.2.5	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18 800–1:2008 .....	827
8.2.6	Tragsicherheitsnachweis nach DIN EN 1993–1-8 .....	829
8.2.7	Beispiel zum Tragsicherheitsnachweis .....	830
8.2.8	Statische Tragversuche an Laschen mit DIN-Auge .....	833
8.2.9	Ergänzende Hinweise zur konstruktiven und rechnerischen Auslegung .....	835
8.2.10	Augenstabformen im Stahlwasserbau .....	838
8.3	<b>Ermüdungsfestigkeitsnachweis</b> .....	839
8.3.1	Kerbfaktoren für Augenstäbe .....	839
8.3.2	Ermüdungsversuche an Laschen mit DIN-Auge .....	842
8.3.3	Nachweisformat .....	843
	<b>Literatur</b> .....	845
9	<b>Verbindungstechnik IV: Sondertechniken</b> .....	847
	<i>Markus Feldmann</i>	
9.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	848
9.2	<b>Punktschweißen</b> .....	848
9.3	<b>Bolzenschweißen</b> .....	851
9.4	<b>Schweißen von Kranschiemenstößen</b> .....	853
9.5	<b>Schließringbolzen</b> .....	855
9.6	<b>Blindniete</b> .....	855
9.7	<b>Blechschräuben – Setzbolzen</b> .....	856
9.8	<b>Dübel/Anker</b> .....	857
9.9	<b>Trägerklemmen</b> .....	859
9.10	<b>Metallkleben</b> .....	860
9.10.1	Klebtechnik .....	860
9.10.2	Herleitung der Schubspannungsverteilung in einer Klebverbindung nach Volkersen/Klein .....	864
	<b>Literatur</b> .....	870
10	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlhochbau</b> .....	875
	<i>Manuel Krahwinkel, Christian Petersen und Thomas Ummenhofer</i>	
10.1	<b>Toleranz- und Modulordnung – Bewegungsfugen</b> .....	877
10.1.1	Toleranzordnung im Maschinenbau .....	877
10.1.2	Toleranzordnung im Stahlbau – Ausführung .....	879
10.1.3	Toleranzordnung im Hochbau – Ausführung .....	879
10.1.4	Maß- und Modulordnung .....	881
10.1.5	Bewegungsfugen .....	883
10.2	<b>Dauerhaftigkeit – Korrosionsschutz</b> .....	884
10.3	<b>Baulicher Brandschutz</b> .....	885
10.3.1	Allgemeine Hinweise .....	885

10.3.2	Brandverlauf und Brandbelastung .....	886
10.3.3	Verhalten ungeschützter und geschützter Bauteile und Systeme bei Brandeinwirkung .....	888
10.3.4	DIN 4102 – Bauordnungen.....	893
10.3.5	Baulicher Brandschutz durch klassifizierte Maßnahmen.....	895
10.4	<b>Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit</b> .....	899
10.4.1	Nachweis der Tragfähigkeit .....	899
10.4.2	Imperfektionen .....	901
10.4.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	901
10.5	<b>Vorspannung</b> .....	907
10.6	<b>Stützen</b> .....	910
10.6.1	Stützenarten – Querschnittsformen.....	910
10.6.2	Stützenstöße .....	913
10.6.3	Stützenfußkonstruktionen.....	916
10.6.4	Köcherfundamente.....	961
10.7	<b>Vollwandträger</b> .....	977
10.7.1	Konstruktive Ausbildung .....	977
10.7.2	Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit .....	984
10.7.3	Trägerstöße .....	989
10.8	<b>Querkraftbeanspruchte ('gelenkige') Trägeranschlüsse</b> .....	1004
10.8.1	Allgemeine Konstruktionshinweise .....	1004
10.8.2	Beispiele – Ergänzungen.....	1015
10.9	<b>Querkraft- und momentenbeanspruchte ('biegesteife')</b> <b>Trägeranschlüsse – Rahmenecken</b> .....	1020
10.9.1	Allgemeine Konstruktionshinweise .....	1020
	<b>Literatur</b> .....	1039
11	<b>Stahlleichtbau</b> .....	1041
	<i>Jörg Laumann</i>	
11.1	<b>Einführung</b> .....	1043
11.2	<b>Zum Tragverhalten dünnwandiger Bauteile im überkritischen Bereich</b> .....	1043
11.3	<b>Herstellung der Trapezbleche – Profiltypen</b> .....	1049
11.4	<b>Statische Funktion der Stahltrapezprofile</b> .....	1057
11.5	<b>Verwendung der Trapezprofile als lastabtragende Biegeglieder</b> .....	1058
11.5.1	Zur Optimierung der Profilform.....	1058
11.5.2	Bestimmung der zulässigen Tragfähigkeiten mittels Versuchen.....	1059
11.5.3	Tragsicherheits- und Gebrauchtauglichkeitsnachweis nach dem neuen Sicherheitskonzept .....	1067
11.6	<b>Verwendung der Trapezprofile als Schubfelder</b> .....	1069
11.6.1	Tragwirkung und konstruktive Ausbildung der Schubfelder .....	1069
11.6.2	Einführung in die Schubfeldtheorie.....	1071
11.6.3	Anwendung der Schubfeldtheorie auf Stahltrapezprofile .....	1077
11.6.4	Beispiele.....	1080
11.7	<b>Kaltprofile</b> .....	1091
11.7.1	Allgemeine Angaben .....	1091
11.7.2	Ausbildung von kaltgeformten Z-Pfetten .....	1093
11.8	<b>Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit</b> .....	1098
11.8.1	Versagensmechanismen.....	1098

11.8.2	Wirksame Querschnitte .....	1099
11.8.3	Nachweise .....	1100
11.9	<b>Drehbehinderung aus Koppelfetten mit dünnwandigen kaltgeformten Z-Profilen</b> .....	1100
11.9.1	Anteile der Drehbehinderung .....	1104
11.9.2	Experimentelle Untersuchungen zur Drehfedersteifigkeit $C_{\vartheta A,k}$ aus der Anschlussverformung .....	1107
11.9.3	Analytische Nachbildung der Steifigkeit $C_{\vartheta A,k}$ .....	1110
	<b>Literatur</b> .....	1114
12	<b>Seile und Seilwerke</b> .....	1119
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
12.1	<b>Seile, Bündel und Kabel</b> .....	1120
12.1.1	Seildraht .....	1120
12.1.2	Seilarten .....	1120
12.1.3	Seilendverbindungen .....	1122
12.1.4	Korrosionsschutz .....	1127
12.1.5	Querschnittsfläche, Gewicht und Tragkraft von Seilen .....	1128
12.1.6	Tragsicherheitsnachweis bei vorwiegend ruhender Belastung .....	1129
12.1.7	Tragsicherheitsnachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung .....	1130
12.1.8	Dehnverhalten der Seile – Verformungsmodul .....	1135
12.2	<b>Stangen als Zugglieder</b> .....	1137
12.3	<b>Seilstatik *</b> .....	1139
12.3.1	Herleitung der Seilgleichung .....	1139
12.3.2	Parabel .....	1141
12.3.3	Katenoide (Kettenlinie) .....	1149
12.3.4	Beispiele und Ergänzungen .....	1158
	<b>Literatur</b> .....	1193
13	<b>Türme und Maste</b> .....	1197
	<i>Markus Feldmann</i>	
13.1	<b>Einsatzgebiete der Türme und Maste* – Begriffe</b> .....	1199
13.1.1	Allgemeines (■ Abb. 13.1) .....	1199
13.1.2	Turmartige Bauwerke für funktechnische Zwecke (Antennenträger) .....	1203
13.1.3	Türme für Windgeneratoren .....	1205
13.1.4	Turmartige Bauwerke für andere Zwecke .....	1208
13.2	<b>Lastannahmen für Antennentragwerke</b> .....	1214
13.2.1	Allgemeine Hinweise .....	1214
13.2.2	Ungleichförmigkeit des Staudrucks .....	1215
13.2.3	Aerodynamischer Beiwert für Fachwerktürme und -maste .....	1216
13.2.4	Aerodynamischer Beiwert für Einbauten und Antennenausrüstungen .....	1221
13.2.5	Aerodynamischer Beiwert für Antennen .....	1222
13.2.6	Windbelastung bei Montagezuständen .....	1224
13.2.7	Lastannahmen bei Vereisung .....	1224
13.3	<b>Turm- und Mastausfachung</b> .....	1226
13.4	<b>Statische Berechnung der Türme und Maste</b> .....	1229
13.4.1	Allgemeine Berechnungshinweise .....	1229
13.4.2	Zur Frage der kinematischen Stabilität der Turmfachwerke .....	1234

13.4.3	Ergänzende Hinweise.....	1240
13.5	<b>Berechnung abgespannter Maste</b> .....	1241
13.5.1	Vorbemerkungen.....	1241
13.5.2	Unmittelbare Belastung der Seile .....	1245
13.5.3	Seilgleichung.....	1247
13.5.4	Federcharakteristik des dreiseiligen Abspannbündels .....	1248
13.5.5	Hinweise zur Mastberechnung.....	1253
13.5.6	Federcharakteristik von Abspannungen geringer Höhe.....	1254
13.6	<b>Dynamische Auslegung</b> .....	1258
13.6.1	Vorbemerkungen.....	1258
13.6.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung einfacher Mast- und Turmstrukturen.....	1258
13.6.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen des Einzelseiles.....	1266
13.6.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen abgespannter Maste .....	1269
13.6.5	Böenreaktionsfaktor bei abgespannten Masten.....	1272
13.7	<b>Berechnungsansätze nach EN 1993-3-1 (Eurocode für Türme und Masten)</b> .....	1274
13.8	<b>Zur konstruktiven Ausbildung</b> .....	1275
13.9	<b>Windenergieanlagen</b> .....	1279
13.9.1	Bauarten – Betriebsformen .....	1279
13.9.2	Zur physikalisch-technischen Auslegung von Windkraftanlagen.....	1283
13.9.3	Zur normativen Lastmodellierung .....	1287
13.10	<b>Blitzschutz</b> .....	1289
	<b>Literatur</b> .....	1293
14	<b>Stahlschornsteine</b> .....	1299
	<i>Markus Feldmann</i>	
14.1	<b>Allgemeine Hinweise zur konstruktiven Auslegung</b> .....	1300
14.1.1	Tragrohr und Rauchrohr .....	1300
14.1.2	Immissions- und rauchgastechische Auslegung .....	1302
14.1.3	Korrosionsschutz .....	1304
14.1.4	Regelungen für die bauliche Ausbildung und Standsicherheitsberechnung .....	1305
14.2	<b>Statische Auslegung</b> .....	1305
14.2.1	Allgemeines .....	1305
14.2.2	Windlastannahmen.....	1307
14.2.3	Aerodynamische Beiwerte.....	1307
14.2.4	Verformungseinfluss Theorie II. Ordnung .....	1311
14.2.5	Nachweis des Mantelrohres .....	1316
14.2.6	Ringsteifen – Einflusslinien .....	1322
14.2.7	Mantel- und Ringsteifenbeanspruchung infolge örtlichen Winddrucks .....	1325
14.2.8	Beispiele und Ergänzungen.....	1329
14.2.9	Montagestöße.....	1333
14.2.10	Schornstein-Verankerung.....	1343
14.2.11	Kräfte im Ankerpunkt infolge M:.....	1357
14.3	<b>Dynamische Auslegung</b> .....	1360
14.3.1	Vorbemerkungen.....	1360
14.3.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung.....	1361
14.3.3	Böeninduzierte Schwingungen .....	1368
14.3.4	Wirbelinduzierte Schwingungen.....	1377
	<b>Literatur</b> .....	1411

15	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlbrückenbau</b> .....	1415
	<i>Jörg Frickel</i>	
15.1	<b>Bauformen</b> .....	1417
15.1.1	Gliederung – Systeme – Grundanforderungen .....	1417
15.1.2	Eisenbahnbrücken .....	1421
15.1.3	Straßenbrücken .....	1442
15.1.4	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken) .....	1455
15.2	<b>Nachweis der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit</b> .....	1460
15.2.1	Eisenbahnbrücken .....	1460
15.2.2	Straßenbrücken .....	1464
15.2.3	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken) .....	1468
15.2.4	Weitere Berechnungs- und Bemessungsansätze .....	1468
15.3	<b>Ausgewählte Nachweise</b> .....	1469
15.3.1	Ergänzende Hinweise .....	1469
15.3.2	Scheinbarer Elastizitätsmodul von Schrägseilen .....	1472
15.3.3	Verbände .....	1478
15.3.4	Nebenspannungen in Fachwerkbrücken .....	1479
15.3.5	Hängestangen von Stabbogenbrücken .....	1483
15.3.6	Hängebrücken – Grundlagen der Berechnung .....	1488
15.3.7	Dynamische Einflüsse beim Brückenbetrieb .....	1499
15.3.8	Aeroelastische Einwirkungen auf Brücken .....	1505
15.3.9	Personeninduzierte Schwingungen von Fußgängerbrücken .....	1517
15.4	<b>Brückenlager</b> .....	1529
15.4.1	Vorbemerkungen .....	1529
15.4.2	Lageranordnung .....	1531
15.4.3	HERTZsche Pressung .....	1536
15.4.4	Pressungsverteilung gegen Anschlagflächen .....	1541
15.4.5	Abwälzkinematik .....	1544
15.4.6	Behelfe für die Berechnung von Kreisplatten .....	1547
15.4.7	Berechnungsbeispiel .....	1551
15.4.8	Lagerplatten auf elastischem Halbraum .....	1558
15.4.9	Lagerformen .....	1564
	<b>Literatur</b> .....	1575
16	<b>Elasto-statische Biegetheorie, insbesondere für dünnwandige Stäbe</b> .....	1579
	<i>Matthias Kraus</i>	
16.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1582
16.2	<b>Flächenmomente</b> .....	1582
16.3	<b>Stäbe mit dünnwandigem offenen Querschnitt</b> .....	1585
16.3.1	Berechnung der Biege- und Schubspannungen ohne Kenntnis der Hauptachsen .....	1585
16.3.2	Berechnung der Biege- und Schubspannungen bei Kenntnis der Hauptachsen .....	1590
16.3.3	Schubmittelpunkt .....	1594
16.3.4	Beispiel .....	1597
16.4	<b>Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt</b> .....	1604
16.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt .....	1605

16.4.2	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt .....	1608
16.4.3	Beispiele .....	1610
16.5	<b>Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung</b> .....	1626
16.6	<b>Zur numerischen Berechnung der Flächenmomente</b> .....	1627
16.7	<b>Vollwandige Träger veränderlicher Höhe</b> .....	1640
16.8	<b>Berücksichtigung der Schubverzerrung bei der Stabbiegung</b> .....	1644
16.8.1	Schubsteifigkeit $S = GA_G$ – Schubkorrekturfaktor .....	1644
16.8.2	Trägerdurchbiegung infolge Querkraft .....	1648
16.8.3	Beispiele und Ergänzungen .....	1650
16.8.4	Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung einschließlich Schubverzerrung .....	1652
16.9	<b>Stäbe mit starker Krümmung bei einachsiger Biegung und Normalkraft</b> .....	1653
16.9.1	Biegespannungen .....	1653
16.9.2	Radialspannungen .....	1657
16.9.3	Formänderungen .....	1658
16.9.4	Beispiele und Ergänzungen .....	1659
16.9.5	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften I-Querschnitten .....	1664
16.9.6	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften Kastenquerschnitten .....	1667
16.9.7	Experimenteller Befund .....	1669
16.9.8	Hinweise zur praktischen Ausführung .....	1673
16.9.9	Rohrkrümmer .....	1673
16.10	<b>Berechnung der Randspannungen mit Hilfe des Querschnittskerns</b> .....	1674
16.10.1	Bestimmung des Querschnittskerns .....	1674
16.10.2	Beispiele und Ergänzungen .....	1677
16.10.3	Maßgebende Wirkungsrichtung bei umlaufender Belastung .....	1681
16.11	<b>Berechnung der Spannungen bei versagender Zugzone</b> .....	1683
16.11.1	Bestimmung der klaffenden Fuge .....	1683
16.11.2	Beispiele .....	1684
16.12	<b>Zugbiegung Theorie II. Ordnung</b> .....	1691
16.13	<b>Nichtlineare Zugbiegung schlanker Stäbe mit größerem Durchhang</b> .....	1695
16.13.1	Einführung .....	1695
16.13.2	Dehnsteife Hängestäbe (■ Abb. 16.118) .....	1695
16.13.3	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Näherungslösungen .....	1699
16.13.4	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für $p = \text{konst.}$ .....	1701
16.13.5	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für beliebige Belastung $p(x)$ .....	1702
16.13.6	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Vereinfachte Lösung für $p = \text{konst.}$ .....	1707
	<b>Literatur</b> .....	1710
17	<b>Elasto-statische Torsionstheorie, insbesondere für dünnwandige Stäbe</b> .....	1715
	<i>Matthias Kraus</i>	
17.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1717
17.2	<b>Torsion gerader Stäbe mit dickwandigem Querschnitt</b> .....	1718
17.2.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (primäre, reine oder ST-VENANTsche Torsion) .....	1718

17.2.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung .....	1765
17.3	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, offenen Querschnitt</b> .....	1766
17.3.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (Primärtorsion) .....	1766
17.3.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung (Wölbkrafttorsion = Sekundärtorsion) .....	1773
17.4	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenen Querschnitt</b> .....	1795
17.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt .....	1795
17.4.2	Beispiel: Einzelliger Kastenquerschnitt. ....	1799
17.4.3	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt .....	1801
17.4.4	Stäbe mit gemischt offen-geschlossenem Querschnitt .....	1804
17.4.5	Beispiele und Ergänzungen .....	1806
17.5	<b>Rechenbehelfe</b> .....	1812
17.6	<b>Gebundene Biegung – Gebundene Torsion</b> .....	1813
17.7	<b>Ergänzende Hinweise</b> .....	1824
17.8	<b>Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen</b> .....	1824
17.8.1	Allgemeine Hinweise .....	1824
17.8.2	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte ohne Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen .....	1826
17.8.3	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte mit Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen .....	1830
	<b>Literatur</b> .....	1831
18	<b>Anstrengungs- und Bruchtheorie</b> .....	1837
	<i>Markus Feldmann</i>	
18.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1839
18.2	<b>Ebener Spannungszustand</b> .....	1840
18.2.1	Hauptspannungen .....	1840
18.2.2	Beispiele und Ergänzungen .....	1846
18.2.3	Verzerrungen des ebenen Spannungszustandes .....	1849
18.2.4	Vergleichsspannungen bei vorwiegend ruhender (statischer) Einwirkung .....	1850
18.2.5	Vergleichsspannungen bei nicht vorwiegend ruhender (zyklischer, dynamischer) Einwirkung .....	1854
18.3	<b>Räumlicher Spannungszustand</b> .....	1855
18.3.1	Formale Vereinbarungen .....	1855
18.3.2	Verschiebungstensor .....	1855
18.3.3	Verzerrungstensor .....	1856
18.3.4	Spannungstensor .....	1860
18.3.5	HOOKESches Gesetz .....	1863
18.3.6	Kugeltensor und Deviator .....	1864
18.3.7	Beispiele und Ergänzungen .....	1866
18.3.8	Festigkeitshypothese von HUBER-MISES-HENCKY für zähe Metalle .....	1870
18.4	<b>Experimente zur Problematik des Streckgrenzenansatzes</b> .....	1876
18.4.1	'Statische' Streckgrenze .....	1876
18.4.2	Elastisch-plastische Hysterese – BAUSCHINGER-Effekt .....	1880
18.4.3	Bruchbilder statischer Zugversuche .....	1882

## Inhaltsverzeichnis

18.5	<b>Bruchmechanik (Einführung)</b> .....	1882
18.5.1	Vorbemerkungen .....	1882
18.5.2	Rissöffnungsarten – Spannungintensitätsfaktor $K_{Ic}$ .....	1884
18.5.3	Risstheorie bei statischer Beanspruchung – Vorwiegend ruhende Beanspruchung .....	1891
18.5.4	Spannungsrisskorrosion .....	1899
18.5.5	Risstheorie bei dynamischer (zyklischer) Beanspruchung – Vorwiegend nicht ruhende Beanspruchung .....	1899
	<b>Literatur</b> .....	1907
	 <b>Serviceteil</b>	
	Stichwortverzeichnis .....	1913