

STAHLBAU

Grundlagen
der Berechnung und baulichen Ausbildung
von Stahlbauten

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Dr.-Ing. Christian Petersen
Professor an der
Universität der Bundeswehr München



Inhaltsverzeichnis

1	ALLGEMEINE TECHNISCHE, WIRTSCHAFTLICHE UND HISTORISCHE ASPEKTE	1
1.1	Stahlbau als Industriezweig	1
1.2	Produktbereiche	3
1.3	Geschichtlicher Abriss	6
1.3.1	Oberblick	6
1.3.2	Praxis und Theorie	12
1.3.3	Rückschläge	14
1.4	Forschung und Entwicklung	14
1.4.1	Schwerpunkte	14
1.4.2	EDV-Einsatz	15
1.4.2.1	Computertechnologie	15
1.4.2.2	Entwurfsberechnung	16
1.4.2.3	CAD / CAM	17
1.4.3	Betrieb und Montage	18
2	STAHLHERSTELLUNG - ERZEUGNISSE AUS STAHL	19
2.1	Geschichtlicher Abriss des Eisenhüttenwesens	19
2.2	Eisenerz	22
2.3	Verhüttung	22
2.3.1	Aufbereitung	22
2.3.2	Hochofenprozeß	23
2.3.3	Direktreduktionsprozeß	24
2.4	Erschmelzung und Vergießung	24
2.4.1	Zur technologischen Entwicklung der Erschmelzungsverfahren	24
2.4.2	Verfahren der Erschmelzung	25
2.4.3	Verfahren der Vergießung	27
2.4.4	Legierung	28
2.5	Fertigerzeugnisse	28
2.5.1	Warmwalzung	28
2.5.2	Warmwalzerzeugnisse	31
2.5.3	Stahlguß	32
2.5.4	Strangpreßezeugnisse	32
2.5.5	Seile	32
2.5.6	Kaltprofile	32
2.6	Grundlagen der Metallkunde	33
2.6.1	Kristalle, Mischkristalle, Phasen	33
2.6.2	Aufbau der Legierungen - Zustandsschaubilder	35
2.6.3	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild	38
2.6.4	Technologische Einstellung der Stahleigenschaften	40
2.6.4.1	Verhalten der Kristalle in Abhängigkeit vom Kristalltyp	40
2.6.4.2	Verhalten der Kristalle und des kristallinen Haufwerks	41
2.6.4.3	Begleit- und Legierungselemente	42
2.6.4.4	Beruhigung	43
2.6.4.5	Legierung	44
2.6.4.6	Kaltverformung	45
2.6.4.7	Wärmebehandlung - Vergütung	46
2.6.5	Werkstoffprüfung	46
2.6.5.1	Härte	47
2.6.5.2	Festigkeit und Zähigkeit	47
2.6.5.3	Zugversuch - Druckversuch - Biegeversuch	49
2.6.5.4	Kerbschlagversuch	50
2.6.5.5	Experimente und Ergänzungen	52
2.6.5.5.1	Härtemessungen	52
2.6.5.5.2	Zugversuche an Flachproben	54
2.6.5.5.3	Zugversuche an Proben mit Stumpfnah	57
2.6.5.5.4	Zugversuche an Proben mit Außenkerben	58
2.6.5.5.5	Zugversuche an Lochstäben ohne und mit Paßbolzen	59
2.6.5.5.6	Zugversuche an Flachproben mit versetzten Schraubenlöchern	60
2.6.5.5.7	Druckversuche zur Bestimmung der Stauchgrenze	63
2.6.5.5.8	Druckversuche an Flachproben mit Schraubenlöchern	64
2.6.5.6	Ermüdungsfestigkeit (Dauerfestigkeit)	65
2.6.5.6.1	Phänomenologie und Ursachen der Werkstoffermüdung	65
2.6.5.6.2	WÖHLER-Linie (Einstufenversuche)	67
2.6.5.6.3	Dauerfestigkeitsschaubilder	70
2.6.5.6.4	Beispiel: Durchführung eines Dauerfestigkeitsversuches	71
2.6.5.6.5	Kurzzeitfestigkeits-Versuche an Kerbstäben der Stahlgüte St37-2	73
2.7	Stähle für den Stahlbau	78
2.7.1	Allgemeines - Bezeichnungssystem	78
2.7.2	Allgemeine Baustähle	79
2.7.3	Hochfeste Feinkornbaustähle	80
2.7.4	Wetterfeste Baustähle	81
2.7.5	Nichtrostende Stähle	81

2.7.6	Stähle für geschweißte und nahtlose Röhre (Hohlprofile)	82
2.7.7	Warmfeste Stähle	82
2.7.8	Kaltzähle Stähle	83
2.7.9	Vergütungsstähle	83
2.7.10	Einsatzstähle	83
2.7.11	Stahlguß	83
2.7.12	Stähle für Schweißwerkstoffe, Schrauben und Nieten	84
2.7.13	Gusseisen	84
3	NACHWEIS DER TRAGSICHERHEIT UND GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT	85
3.1	Aspekte des Bauordnungsrechts	85
3.2	Bautechnische Regelwerke - Normung	86
3.3	"Allgemein anerkannte Regeln der Baukunst"	88
3.4	Regelwerke des Stahlbaues	90
3.4.1	Zur geschichtlichen Entwicklung der Sicherheitsfrage im Stahlbau	90
3.4.2	Derzeitige Entwicklung	92
3.4.3	Elementare sicherheitstheoretische Aspekte	93
3.5	Einführung in die Sicherheitstheorie	95
3.5.1	Vorbemerkungen	95
3.5.2	Eindimensionale Zufallsgrößen	96
3.5.2.1	Häufigkeitsverteilung	96
3.5.2.2	Parameter empirischer Verteilungen	97
3.5.2.3	Beispiel	99
3.5.2.4	Dichtefunktion und Verteilungsfunktion	99
3.5.2.5	Normal-Verteilung	101
3.5.2.6	Lognormal-Verteilung (zweiparametrig)	102
3.5.2.7	Beispiele	104
3.5.2.8	Wiederkehrperiode seltener (extremer) Ereignisse	107
3.5.2.9	Extremwertverteilung (Typ I)	109
3.5.2.10	Beispiele	111
3.5.2.11	Extremwertverteilung für den Wiederkehrzeitraum $\bar{N} \cdot T$ (Typ I)	112
3.5.3	Zweidimensionale Zufallsgrößen	115
3.5.3.1	Häufigkeitsverteilung - Parameter	115
3.5.3.2	Dichte- und Verteilungsfunktion	117
3.5.4	Elementare Grundlagen der Sicherheitstheorie	118
3.5.4.1	Bauteilfestigkeit - Beanspruchbarkeit R	118
3.5.4.2	Lasten (Einwirkungen) - Beanspruchung S	119
3.5.4.3	Sicherheitszone - Sicherheitsfaktor	121
3.5.4.4	Wiederholung und Folge äußerer Einwirkungen	122
3.5.4.5	Versagenswahrscheinlichkeit P_V - R-S-Problem	123
3.5.4.6	Konzept von BASLER	124
3.5.5	Verallgemeinerung der "Methode der zweiten Momente" durch HASOFER und LIND	127
3.5.5.1	Versagensbereich und Bemessungspunkt - Lineare R-S-Probleme	127
3.5.5.2	Beispiel	130
3.5.5.3	Erweiterung auf nichtlineare und mehrdimensionale R-S-Probleme	132
3.5.5.4	Beispiele	133
3.5.5.5	Beispiele für Grenzzustandsfunktionen	135
3.5.5.6	Erweiterungen und Ergänzungen	138
3.5.6	Einwirkungen	140
3.5.6.1	Einwirkungsarten	140
3.5.6.2	Stoßfaktor	144
3.5.7	Imperfektionen	144
3.5.8	Mechanische Eigenschaften	146
3.6	Grenzzustand der Tragfähigkeit bei vorwiegend statischer Einwirkung	148
3.6.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	148
3.6.2	Grenzzustand des Stabilitätsverlustes durch Knicken, Kippen, Beulen	149
3.6.3	Grenzzustand des Stabilitätsverlustes durch Gleiten, Abheben oder Umkippen	149
3.6.4	Vorspannung	149
3.7	Grenzzustand der Tragfähigkeit bei vorwiegend dynamischer Einwirkung	151
3.7.1	Einführung	151
3.7.2	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Konzept der Gestaltfestigkeit (Maschinenbau)	153
3.7.2.1	Nachweisform	153
3.7.2.2	Einflußfaktoren	155
3.7.3	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Konzept der kerbfallabhängigen zulässigen Spannungen (Stahlbau)	158
3.7.3.1	Zulässige Dauerfestigkeitsspannungen	158
3.7.3.2	Ertragbare Dauerfestigkeitsspannungen	161
3.7.4	Klassiermethoden	164
3.7.4.1	Allgemeines	164
3.7.4.2	Klassierung der Überschreitungen	166
3.7.4.3	Klassierung der Spitzen	167
3.7.4.4	Klassierung der Breiten (Spannen)	167
3.7.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	169
3.7.5.1	Beanspruchungskollektiv	169
3.7.5.2	Lebensdauerlinie aus Mehrstufenversuchen	171
3.7.5.3	Lineare Schädigungshypothese von PALMGREN-MINER	172
3.7.5.4	Beispiele zur linearen Schädigungshypothese	174
3.7.5.5	Modifizierung der linearen Schädigungshypothese	176

3.7.5.6	Betriebsfestigkeitsnachweis im Regelwerk des Stahlbaues	177
3.7.5.7	Beispiele und Ergänzungen	180
3.8	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	183
3.8.1	Einführung	183
3.8.2	Verformungskriterien	184
3.8.3	Schwingungskriterien	186
4	ELASTO-STATISCHE FESTIGKEITSNACHWEISE	189
4.1	Vorbemerkungen	189
4.2	Normalspannungen infolge Zug/Druck und Biegung	190
4.2.1	Berechnungsformel	190
4.2.2	Nachweis der Zug- und Druckspannungen	191
4.2.3	Beispiele	193
4.2.4	Nachweis der Biegespannungen	195
4.2.5	Beispiele	197
4.2.6	Zur Berechnung der Trägheitsmomente	198
4.2.7	Aufteilung eines Biegemomentes auf die Teile eines Querschnittes	199
4.3	Schubspannungen infolge Querkraft	200
4.3.1	Berechnungsformel	200
4.3.2	Nachweis der Schubspannungen	203
4.4	Herleitung einiger Berechnungsformeln - Beispiele/Ergänzungen	205
4.5	Mitwirkende Breite	211
4.6	Experimenteller Befund	213
4.7	Schubmittelpunkt	214
4.7.1	Problemstellung - Biegung von [-Profilen	214
4.7.2	Beispiele	216
4.7.3	Alternative Berechnungsform	217
4.8	Schubspannungen infolge Torsion	218
4.8.1	Gegenüberstellung: Primärtorsion - Sekundärtorsion	218
4.8.2	Primärtorsion (ST-VENANTSche Torsion)	219
4.8.2.1	Stäbe mit offenem, dünnwandigen Querschnitt	219
4.8.2.2	Stäbe mit geschlossenem, dünnwandigen Querschnitt	222
4.8.3	Einführung in die Sekundärtorsion	224
4.9	Nachweis kombinierter Normal- und Schubspannungszustände	226
4.9.1	Vergleichsspannung bei statischer Beanspruchung	226
4.9.2	Beispiele	227
4.9.3	Vergleichsspannung bei dynamischer Beanspruchung	231
5	ELASTO-STATISCHE BERECHNUNG DER STABTRAGWERKE (GRUNDZUGE)	233
5.1	Einführung	233
5.2	Kräfte und Momente	236
5.3	Grad der statischen Bestimmtheit	236
5.3.1	Ebene Stabtragwerke	236
5.3.2	Räumliche Stabtragwerke	240
5.4	Berechnung der Stabtragwerke	240
5.4.1	Statisch bestimmte Stabtragwerke	240
5.4.2	Statisch unbestimmte Stabtragwerke	241
5.4.3	Berechnung der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen)	242
5.4.3.1	Arbeitssatz	242
5.4.3.2	Integraltafeln	243
5.4.3.3	Einfluß von Anschlußexzentrizitäten und Anschlußnachgiebigkeiten	245
5.4.3.4	Reduktionssatz	246
5.4.3.5	Grundaufgaben	246
5.4.3.6	Vertauschungssatz	247
5.4.4	Einflußlinien für Stütz-, Schnitt- und Verformungsgrößen	248
5.5	Allgemeine Hinweise zu den Berechnungsverfahren der Stabstatik	250
6	PLASTO-STATISCHE BERECHNUNG DER STABTRAGWERKE	253
6.1	Querschnittstragfähigkeit eines Zug- und Druckstabes	253
6.1.1	Eigenspannungsfreier Querschnitt	253
6.1.2	Eigenspannungsbehafteter Querschnitt	253
6.1.3	Berücksichtigung der Verfestigung	254
6.2	Fließzonentheorie	257
6.2.1	Exemplarische Darstellung am Einfeldbalken mit Rechteckquerschnitt	257
6.2.2	Verallgemeinerung	261
6.3	Fließgelenktheorie	261
6.3.1	Querschnittstragfähigkeit eines Biegestabes	261
6.3.2	Fließgelenkhypothese	264
6.3.3	Be- und Entlastung	266
6.3.4	Einfeldträger - Durchlaufträger	268
6.3.4.1	Beidseitig eingespannte Träger	268
6.3.4.2	Einseitig eingespannte Träger	269
6.3.4.3	Träger mit veränderlicher Tragfähigkeit	271
6.3.4.4	Durchlaufträger	273
6.3.5	Tragkraftsätze	274
6.3.6	Rahmentragwerk	275
6.3.6.1	Elementarketten / Probiervverfahren - Kombinationsverfahren	275
6.3.6.2	Einfeldrahmen	276
6.3.6.3	Pulldachrahmen/Giebelrahmen/Trapezrahmen-Zweifeldrahmen	278
6.3.6.4	Verschiebungspläne	280
6.3.7	Normalkraft- und Querkraftinteraktion	283

6.3.7.1	Interaktionsbegriff	283
6.3.7.2	M/N-Interaktion bei I-Querschnitten	284
6.3.7.3	M/N/Q-Interaktion bei I-Querschnitten	284
6.3.7.4	Beispiel	286
6.3.8	Doppelte Biegung	287
6.3.8.1	Doppelte Biegung bei I-Querschnitten	287
6.4	Sicherheitsaspekte	289
6.4.1	Zur Entwicklung der Fließgelenktheorie (Traglastverfahren)	289
6.4.2	Zur Frage des nominellen Sicherheitsfaktors	290
6.4.3	DIN 18800 T1 u. T2 (11.90)	291
6.4.3.1	Sicherheitskonzept	291
6.4.3.2	Beispiele	293
6.4.4	Zur Materialfrage	294
6.4.5	Einrechnung der Verfestigung	295
6.4.6	Rotationskapazität	297
6.4.7	Grenzwerte $\text{grenz}(b/t)$	302
6.4.8	Zur Kippstabilität biegebeanspruchter Träger in Fließgelenken	302
6.4.9	Verformungseinfluß Theorie II. Ordnung	302
6.4.10	Zur Frage der Systemeignung	303
6.4.11	Nachweis der Verbindungsmittel	304
6.4.12	Proportionale und nichtproportionale Belastung - Zyklische Belastung	304
7	STABILITÄTSNACHWEISE (KNICKEN - KIPPEN - BEULEN)	307
7.1	Einführung in die Grundlagen der Stabilitätstheorie	307
7.1.1	Statisches und energetisches Stabilitätskriterium	307
7.1.2	System A (Zweistabsystem mit Drehfeder)	309
7.1.2.1	Statische Herleitung	309
7.1.2.2	Energetische Herleitung	311
7.1.3	System B (Dreistabsystem mit Drehfedern)	311
7.1.3.1	Statische Herleitung	311
7.1.3.2	Energetische Herleitung	313
7.1.4	System C (Zweistabsystem mit Verschiebungsfeder)	314
7.1.4.1	Statische Herleitung	314
7.1.4.2	Energetische Herleitung	315
7.1.5	System D (Dreistabsystem mit Verschiebungsfedern)	316
7.1.5.1	Statische Herleitung	316
7.1.5.2	Energetische Herleitung	317
7.2	Tragsicherheitsnachweis gedrückter Stäbe und Stabwerke (Stabilitätsnachweis)	318
7.2.1	Gegenüberstellung: Biegetheorie II. Ordnung - Verzweigungstheorie	318
7.2.2	Knickkräfte und Knicklängen der EULER-Fälle I bis VI	320
7.2.3	Planmäßig mittig gedrückte Stäbe	320
7.2.3.1	Knickspannung nach EULER und ENGESSER/KÄRMÄN	320
7.2.3.2	Tragsicherheitsnachweis planmäßig mittig gedrückter Stäbe nach DIN 4114	322
7.2.3.3	Tragsicherheitsnachweis planmäßig mittig gedrückter Stäbe nach DIN 18800 T2	323
7.2.3.4	Beispiel	324
7.2.4	Planmäßig außermittig gedrückte Stäbe, - Druck und Biegung	325
7.2.4.1	Gegenüberstellung: Planmäßig mittig und planmäßig außermittig gedrückte Stäbe	325
7.2.4.2	Tragsicherheitsnachweis planmäßig außermittig gedrückter Stäbe nach DIN 4114	326
7.2.4.3	Tragsicherheitsnachweis planmäßig außermittig gedrückter Stäbe nach DIN 18800 T2	328
7.2.4.4	Zur Abschätzung des Verformungseinflusses bei elasto-statischen Berechnungen nach Theorie II. Ordnung	330
7.2.4.5	Exemplarische Einführung in die plasto-statische Berechnung nach Theorie II. Ordnung	333
7.2.4.6	Grenzzustände	336
7.2.4.7	Absicherung gegen den Grenzzustand: Lokales Beulen dünnwandiger Querschnittsteile	338
7.3	Stabbiegetheorie II. Ordnung - Verzweigungstheorie (Knicktheorie)	339
7.3.1	Differentialgleichungsverfahren 1. Art	339
7.3.1.1	Grundlagen	339
7.3.1.2	Erstes Beispiel: EULER-Stab I	339
7.3.1.3	Zweites Beispiel: Einhüftiger Rahmen mit eingespanntem Stiel	342
7.3.2	Differentialgleichungsverfahren 2. Art	345
7.3.2.1	Grundgleichung und Lösungssystem	345
7.3.2.2	Beispiel zur Knicktheorie	346
7.3.2.3	Ergänzende Hinweise	348
7.3.3	Verformungsgrößenverfahren Theorie II. Ordnung	350
7.3.3.1	Grundformeln	350
7.3.3.2	Einspannungsmomente	351
7.3.3.3	Gelenkfigur	353
7.3.3.4	Bestimmungsgleichungen auf der Grundlage des Gleichgewichtsprinzips	353
7.3.3.4.1	Knoten- und Stockwerksgleichungen	353
7.3.3.4.2	Beispiel: Rechteckrahmen	354
7.3.3.4.3	Beispiel: Einstieliger Rahmen mit Pendelstützen	355
7.3.3.4.4	Beispiel: Einhüftiger Rahmen mit Kragstiel	358
7.3.3.4.5	Beispiel: Knickstab mit sprunghaft veränderlicher Biegesteifigkeit und mittiger Stützfeder	358
7.3.3.6	Giebelrahmen mit Zugband als exemplarisches Beispiel	361

7.3.3.6.1	Kinematische Verschiebungsgleichungen	361
7.3.3.6.2	Knoten- und Netzgleichungen	363
7.3.3.6.3	Knicklösung ohne Berücksichtigung der Riegeldruckkraft	366
7.3.3.6.4	Knicklösung mit Berücksichtigung der Riegeldruckkraft	367
7.3.3.6.5	Numerisches Beispiel: Lastfälle: Eigengewicht, Schnee und Wind	370
7.3.3.6.6	Abschätzung des Verformungseinflusses Theorie II. Ordnung	372
7.3.3.6.7	Fortsetzung des numerischen Beispiels: Vorverformungen (Imperfektionen)	374
7.3.3.6.8	"Symmetrieknicken"	375
7.4	Mehrteilige Druckstäbe	376
7.4.1	Ausführungsformen - Rahmenstäbe / Gitterstäbe	376
7.4.2	Knickkraft, Knicklänge und ideelle Schlankheit des schubweichen Stabes	378
7.4.3	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	380
7.4.3.1	Nachweisform	380
7.4.3.2	Beispiele	382
7.4.4	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T2	385
7.4.4.1	Nachweisform	385
7.4.4.2	Beispiel: Rahmenstütze	387
7.5	Tragsicherheitsnachweis gegen Biegedrillknicken	389
7.5.1	Einführung	389
7.5.2	Grundgleichungen des Biegedrillknickproblems außer mittig gedrückter Stäbe mit doppelt-symmetrischem Querschnitt	389
7.5.3	Elasto-statische Lösungen des Biegedrillknickproblems	391
7.5.4	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	394
7.5.4.1	Nachweisform	394
7.5.4.2	Beispiele	395
7.5.5	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T2	397
7.6	Tragsicherheitsnachweis biegebeanspruchter Stäbe (Träger) gegen Kippen	398
7.6.1	Einführung - Näherungsnachweis	398
7.6.2	Elasto-statische Lösung des Kipproblems	399
7.6.3	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	401
7.6.4	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T2	402
7.6.5	Beispiele und Ergänzungen	403
7.6.6	Elastische Drehbettung	407
7.6.6.1	Problemstellung	407
7.6.6.2	Beispiel	409
7.8	Beulung und Beulbiegung Theorie II. Ordnung ebener Rechteckplatten	410
7.8.1	Lineare Beultheorie	410
7.8.1.1	Statische Herleitung der Grundgleichungen	410
7.8.1.1.1	Definitionen - Schnittgrößen	410
7.8.1.1.2	Gleichgewichtsgleichungen	411
7.8.1.1.3	Elastizitätsgesetz	412
7.8.1.1.4	Grundgleichung Theorie II. Ordnung und Randbedingungen	413
7.8.1.1.5	Scheibenspannungszustand	415
7.8.1.2	Energetische Herleitung der Grundgleichungen	416
7.8.1.2.1	Energiekriterium	416
7.8.1.2.2	Potential der inneren Kräfte	416
7.8.1.2.3	Potential der äußeren Kräfte	417
7.8.1.2.4	Gesamtpotential - Variation $\delta\Pi=0$	418
7.8.1.2.5	Randbedingungen	419
7.8.2	Lösungen der linearen Beultheorie	419
7.8.2.1	Lösungen auf der Grundlage der Beulgleichung für Rechteckplatten mit gegengleichen konstanten Randdruckkräften	419
7.8.2.1.1	Einzelfeld mit freien Längsrändern	419
7.8.2.1.2	Einzelfeld mit frei drehbaren, unverschieblichen Längsrändern	420
7.8.2.1.3	Einzelfeld mit eingespannten Längsrändern	421
7.8.2.2	Lösungen auf der Grundlage des Energiepotentials für Rechteckplatten mit NAVIERSchen Randbedingungen (RAYLEIGH/RITZ-Verfahren)	423
7.8.3	Baupraktische Nachweisformen auf der Basis der linearen Beultheorie	425
7.8.3.1	Allgemeine Hinweise	425
7.8.3.2	Beulnachweis unausgesteifter Platten nach DIN 4114 (1952)	427
7.8.3.3	Beulnachweis unausgesteifter Platten nach DASt-Ri 012 (1978)	428
7.8.3.4	Beulnachweis unausgesteifter Platten nach DIN 18800 T3 (1990)	428
7.8.3.5	Ausgesteifte Rechteckplatten	430
7.8.3.6	Grenzverhältnis b/t dünnwandiger Teile von Druck- und Biegegliedern	431
7.8.4	Nichtlineare Beultheorie	432
7.8.4.1	Grundgleichungen für große Verformungen	432
7.8.4.2	Quadratplatte unter konstanten Randdruckspannungen	432
7.8.4.3	Konzept der wirksamen Breite	435
7.8.4.4	Beispiel: Kastenträger	437
8	VERBINDUNGSTECHNIK I: SCHWEISSVERBINDUNGEN	441
8.1	Großer und kleiner Eignungsnachweis	441
8.2	Schweißverfahren	442
8.2.1	Schmelzschweißen	443
8.2.1.1	Gasschweißen (Autogenschweißen)	443
8.2.1.2	Lichtbogenschweißen	443
8.2.2	Preßschweißen	447
8.3	Konstruktive Ausbildung der Schweißnähte	447
8.3.1	Brennschneiden	447
8.3.2	Nahtformen	448

8.3.3	Schweißbeigenspannungen (Schrumpfspannungen)	449
8.4	Sicherheit geschweißter Bauteile	450
8.4.1	Sicherheitsaspekte	450
8.4.2	Wärmeeinflußzone (WEZ)	450
8.4.3	Das Sprödbruchproblem	450
8.4.4	Werkstoffabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	451
8.4.4.1	Rißarten beim Abkühlen der Schweißnaht	451
8.4.4.2	Zähigkeit schweißgeeigneter Stähle	452
8.4.4.3	Desoxidations- und Vergießungsart (Seigerungen)	452
8.4.4.4	Terrassenbruch	453
8.4.4.5	Abschreckhärtung (Aufhärtung)	453
8.4.4.6	Alterung - Reckalterung	459
8.4.4.7	Grobkornbildung	460
8.4.5	Beanspruchungsabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	460
8.4.6	Konstruktions- und herstellungsabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	462
8.5	Schweißbeignung der Stähle	463
8.5.1	Allgemeine Hinweise	463
8.5.2	Wahl der Stahlgütegruppe	464
8.6	Prüfung der Schweißnähte	465
8.7	Tragsicherheitsnachweis der Schweißverbindungen	466
8.7.1	Real- und Nennbeanspruchung - Rechnerischer Nachweis	466
8.7.1.1	Stumpfnähte	466
8.7.1.2	Kehlnähte	467
8.7.1.3	Kombination von Stumpf- und Kehlnähten	469
8.7.1.4	Zusammengesetzte (mehrachsige) Beanspruchung	470
8.7.1.5	Kennzeichnung und Sinnbilder	471
8.7.1.6	Berechnungsbeispiele	471
8.8	Zur Theorie der Kehlnähte	483
8.8.1	Verteilung der Schubkraft in Kehlnähten	483
8.8.2	Experimenteller Befund	485
9	VERBINDUNGSTECHNIK II: SCHRAUB- UND NIETVERBINDUNGEN	489
9.1	SL- und GV-Verbindungen - Grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale	489
9.2	Werkstoffe - Normung	490
9.2.1	Niete	490
9.2.2	Schrauben	490
9.3	SL- und SLP-Verbindungen	493
9.3.1	Fertigung der Nietverbindungen	493
9.3.2	Fertigung der SL- und SLP-Schraubenverbindungen	494
9.3.3	Durchmesser und Anordnung der Niete und Schrauben	497
9.3.4	Tragverhalten bei Scher- und Lochleibungs- und Zugbeanspruchung	499
9.3.5	Tragsicherheitsnachweis der SL- und SLP-Verbindungen	501
9.3.5.1	Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung	501
9.3.5.2	Nachweisform bei vorwiegend ruhender Belastung	504
9.3.5.3	Beispiele zum Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T1 (11.90)	504
9.4	GV- und GVP-Verbindungen	513
9.4.1	Fertigung der GV- und GVP-Verbindungen	513
9.4.2	Tragverhalten und Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung	516
9.4.3	Tragverhalten und Versagensform bei Zugbeanspruchung	517
9.4.4	Tragsicherheitsnachweis der GV- und GVP-Verbindungen	519
9.4.4.1	Nachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	519
9.4.4.2	Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	521
9.4.4.3	Beispiele zum Tragsicherheitsnachweis	521
9.5	Versuche zum Tragverhalten von Schraubenverbindungen	523
9.5.1	Vorbemerkungen	523
9.5.2	Projekt 1: Zug- und Scherversuche am Schraubenbolzen. Teil I	524
9.5.3	Projekt 2: Zug- und Scherversuche am Schraubenbolzen. Teil II	525
9.5.4	Projekt 3: Tragversuche an SL- und VSL-Verbindungen	526
9.5.5	Projekt 4: Vergleichende Tragversuche an SL-, SLP, GV- und GVP-Verbindungen	529
9.5.6	Projekt 5: Abschertragfähigkeit mehrerer hintereinander liegender Schrauben	533
9.5.7	Schraubenverbindungen als diskontinuierliche Scherverbindung	535
9.5.7.1	Elasto-statische Theorie	535
9.5.7.2	Experimenteller Befund	536
9.6	Vorgespannte Schraubenverbindungen bei zentrischer und exzentrischer Zugbeanspruchung	537
9.6.1	Vorbemerkung	537
9.6.2	Vorspannungsdreieck	537
9.6.3	Federmodell bei vorgespannten Stoß- und Verankerungskonstruktionen	540
9.6.4	Stirnplatten- und Flanschverbindung	541
9.6.4.1	Allgemeines	541
9.6.4.2	Elasto-statische Theorie des L-Modells	541
9.6.4.3	Plasto-statische Theorie des L-Modells	543
9.6.4.4	Beispiele	544
9.6.4.5	Experimenteller Befund	546
9.6.4.6	Ergänzende Anmerkungen	549
9.7	Ermüdungsfestigkeit axial beanspruchter Schrauben	550
10	VERBINDUNGSTECHNIK III: BOLZENVERBINDUNGEN MIT AUGENLASCHEN	555
10.1	Einsatzbereiche - Allgemeine Hinweise	555
10.2	Grenztragfähigkeit von Augenstab und Bolzen	557

10.2.1	Vorbemerkungen	557
10.2.2	Ehemalige Bemessungsansätze für Augenbleche	557
10.2.3	Bemessungsansatz für Bolzen	558
10.2.4	Statische Tragversuche	559
10.2.5	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T1 (11.90)	561
10.2.6	Beispiel zum Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18800 T1 (11.90)	562
10.2.7	Ergänzende Hinweise zur konstruktiven und rechnerischen Auslegung	563
10.3	Ermüdungsfestigkeitsnachweis	564
10.3.1	Experimentelle Ermittlung der Kerbfaktoren	564
10.3.2	Analytische Ermittlung der Kerbfaktoren	566
10.3.3	Nachweisformat	567
11	VERBINDUNGSTECHNIK IV: Sondertechniken	569
11.1	Vorbemerkungen	569
11.2	Punktschweißen	569
11.3	Bolzenschweißen	570
11.4	Schweißen von Kranschieneinstößen	571
11.5	Schweißringbolzen	571
11.6	Blindniete	572
11.7	Selbstschneidende Blechschrauben	572
11.8	Dübel	573
11.9	Trägerklemmen	574
11.10	Metallkleben	574
12	STÜTZEN	577
12.1	Einführung	577
12.2	Querschnittsformen	577
12.3	Stützenstöße	578
12.4	Stützenfußkonstruktionen	580
12.4.1	Konstruktive Ausbildung	580
12.4.2	Berechnung der Fußkonstruktion	584
12.4.2.1	Pressung - Druck- und Ankerkräfte	584
12.4.2.2	Fußplatten	587
12.4.2.3	Aussteifungen - Rippen	590
12.4.2.4	Beispiele und Ergänzungen	590
12.4.2.5	Montageanker	596
12.4.2.6	Zuganker	597
12.4.2.7	Beispiel	599
12.4.3	Stützenverankerungen ohne und mit Vorspannung der Anker	602
12.4.3.1	Nicht vorgespannte Verankerungen	602
12.4.3.2	Vorgespannte Verankerungen	604
12.4.3.3	Beispiele und Ergänzungen	605
12.4.4	Köcherfundamente	609
12.4.4.1	Allgemeines	609
12.4.4.2	Berechnungshinweise	609
12.4.4.3	Beispiel	612
12.4.4.4	Berechnungsmodell: Elastisch gebetteter Balken	613
12.4.4.5	Tragversuche und Folgerungen	615
13	VOLLWANDTRÄGER	619
13.1	Walzträger	619
13.2	Geschweißte Vollwandträger (Querschnittsformen - Steifen)	621
13.3	Auslegung und Berechnung von Vollwandträgern	624
13.3.1	Nachweis der Tragsicherheit - Bemessung	624
13.3.2	Formänderungsnachweis	627
13.3.2.1	Beschränkung der Durchbiegung	627
13.3.2.2	Verfahren der W-Gewichte	627
13.3.2.3	Träger mit konstanter Biegesteifigkeit	629
13.3.2.4	Träger mit variabler Biegesteifigkeit	632
13.4	Trägerstöße	634
13.4.1	Allgemeines	634
13.4.2	Geschweißte Trägerstöße	634
13.4.3	Geschraubte Trägerstöße	638
13.4.3.1	Gurtplattenstöße	638
13.4.3.2	Stegblechstöße	639
13.4.3.3	Beispiel: Geschraubter Vollstoß eines Hochbauträgers	641
13.5	Geschraubte (genietete) Vollwandträger	643
13.6	Sonderfragen	645
13.6.1	Steifenlose Walzträger	645
13.6.2	Träger mit dünnen Stegen	645
13.6.3	Träger mit Stegdurchbrüchen	646
13.6.4	Wabenträger	647
13.6.5	Rahmenträger	648
13.6.6	Näherungsweise Abschätzung der VIERENDEEL-Rahmentragwirkung	648
13.6.7	Tragversuche an Trägern mit Stegausehnehmungen und Berechnungsvorschlag	651
13.6.7.1	Experimenteller Befund	651
13.6.7.2	Berechnungsanweisung und Beispiel	652

14	GELENKIGE UND BIEGESTEIFE ANSCHLUSSKONSTRUKTIONEN	657
14.1	Allgemeine Konstruktionshinweise	657
14.2	Querkraftbeanspruchte Trägeranschlüsse	661
14.2.1	Anschluß mittels Doppelwinkel	661
14.2.2	Anschluß mittels Stirnplatte	662
14.2.3	Ausklinkungen	663
14.2.4	Beispiele und Ergänzungen	664
14.3	Biegesteife Anschlüsse und Rahmenecken	665
14.3.1	Konstruktive Ausbildung von Rahmenecken - Geschweißte Ausführung	665
14.3.2	Aussteifungsrippen	668
14.3.3	Anschlußschnittgrößen	670
14.3.4	Geschraubter Stirnplattenanschluß mit Zuglasche	670
14.3.5	Geschraubter Stirnplattenanschluß ohne Zuglasche	671
14.3.5.1	Vorgabe des Druckpunktes	671
14.3.5.2	Bestimmung des Druckzentrums nach dem Verfahren von SCHINEIS	672
14.3.5.3	Beispiele	674
14.3.5.4	Anmerkungen zu den Nachweisverfahren	676
14.3.6	Spannungs- und Beulnachweis der Rahmeneckbleche	679
14.3.7	Biegesteife Stirnplattenanschlüsse mit vorgespannten hochfesten Schrauben	682
14.3.7.1	Regelausführungen nach dem DStV-DAST-Typenkatalog	682
14.3.7.2	Beanspruchung und Ausbildung der Stützenflansche der Rahmenstiele	683
14.3.7.3	Berechnungsanweisungen	685
14.3.7.4	Beispiele	687
14.4	Steifenlose Auflager- und Anschlußkonstruktionen	690
15	FACHWERKTRÄGER	693
15.1	Allgemeine Gestaltungs- und Berechnungsgrundsätze	693
15.2	Geschweißte Fachwerke des Stahlhochbaues	697
15.2.1	Querschnittsformen	697
15.2.2	Fachwerke aus Rundrohren	700
15.2.3	Fachwerke aus Rechteckrohren	703
15.3	Geschraubte (genietete) Fachwerke - Geschraubte Anschlüsse	705
15.3.1	Querschnittsformen	705
15.3.2	Knotenbleche und Anschlüsse	705
15.4	Ergänzungen und Beispiele	708
15.4.1	Fachwerke mit Kopfplattenanschluß der Füllstäbe	708
15.4.2	Spannungen im Anschlußbereich geschraubter JL-Stäbe	708
15.4.3	Zusatzmomente bei JL-Füllstäben in Fachwerken	709
15.4.4	Ausmittigkeitsbeanspruchung bei exzentrisch liegenden Zugstreben	710
16	SEILE UND SEILWERKE	713
16.1	Seile, Bündel und Kabel	713
16.1.1	Seildraht	713
16.1.2	Seilarten - Seilendausbildung	713
16.1.3	Querschnittsfläche, Gewicht und Bruchkraft von Seilen	717
16.1.4	Tragsicherheitsnachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	718
16.1.5	Tragsicherheitsnachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	718
16.1.5.1	Allgemeine Hinweise	718
16.1.5.2	Versuchsbefund	719
16.1.5.3	Nachweisform nach DIN 1073/DIN 18809	720
16.1.6	Dehnverhalten der Seile - Verformungsmodul	721
16.2	Stangen (Spannstahlstangen als Zugglieder)	723
16.2.1	Allgemeines	723
16.2.2	Vorwiegend ruhende Beanspruchung	723
16.2.3	Nicht vorwiegend ruhende Beanspruchung	724
16.3	Seilstatik	725
16.3.1	Herleitung der Seilgleichung für das ebene Seil	725
16.3.2	Parabel	727
16.3.2.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	727
16.3.2.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	727
16.3.2.3	Ungleichhohe Aufhängepunkte	728
16.3.3	Katenoide (Kettenlinie)	731
16.3.3.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	731
16.3.3.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	732
16.3.3.3	Zur Annäherung der Katenoide durch eine Parabel	734
16.3.3.4	Ungleichhohe Aufhängepunkte	735
16.3.4	Beispiele und Ergänzungen	737
16.3.4.1	Polygonalseile unter Einzellasten	737
16.3.4.2	Flach gespannte Seile unter symmetrischer Belastung	740
16.3.4.3	Flach gespannte Seile unter unsymmetrischer Belastung	743
16.3.4.4	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit gleichhohen Aufhängepunkten	743
16.3.4.5	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit ungleichhohen Aufhängepunkten	745
16.3.4.6	Hinweise zur Berechnung von Freileitungen	745
16.3.4.7	Hinweise zur Berechnung von Fahrleitungen	748
16.3.4.8	Halte- und Abspannseile von Kranen (Fördertechnik)	749
16.3.4.9	Schrägseile mit Einzellasten	750
16.3.4.10	Hinweise zur Berechnung von Seilbahnen	751

17	TRAPEZPROFIL-BAUWEISE	759
17.1	Einführung	759
17.2	Zum Tragverhalten dünnwandiger Bauteile im überkritischen Bereich	759
17.3	Herstellung der Trapezbleche - Profiltypen	762
17.4	Statische Funktion der Stahltrapezprofile	766
17.5	Verwendung der Trapezprofile als lastabtragende Biegeglieder	766
17.5.1	Zur Optimierung der Profilform	766
17.5.2	Bestimmung der Tragfähigkeit mittels Versuchen	767
17.5.3	Ergänzende Angaben zum Tragsicherheitsnachweis und zur baulichen Ausbildung	768
17.5.4	Durchbiegungsnachweis	770
17.5.5	Beispiel: Hallenflachdach als Warmdach	770
17.6	Verwendung der Trapezprofile als Schubfelder	772
17.6.1	Tragwirkung und konstruktive Ausbildung der Schubfelder	772
17.6.2	Einführung in die Schubfeldtheorie	773
17.6.3	Anwendung der Schubfeldtheorie auf Stahltrapezprofile	776
17.6.4	Beispiele	778
17.7	Kaltprofile	785
18	STAHLVERBUNDBAUWEISE	787
18.1	Allgemeine Hinweise	787
18.2	Elasto-statische Berechnung (Nachweis der Gebrauchsfähigkeit)	791
18.2.1	Berechnungsgrundlagen	791
18.2.2	Verteilungsgrößen (ohne Einfluß aus Kriechen und Schwinden)	791
18.2.2.1	Außerlich statisch bestimmte Systeme	791
18.2.2.2	Außerlich statisch unbestimmte Systeme	793
18.2.3	Kriechen und Schwinden des Betons	794
18.2.3.1	Einführung	794
18.2.3.2	Neuere Kriech- und Schwindansätze	795
18.2.4	Umlagerungsgrößen infolge Kriechens und Schwindens	797
18.2.4.1	Außerlich statisch bestimmte Systeme	797
18.2.4.2	Außerlich statisch-unbestimmte Systeme	800
18.2.5	Berechnungsbeispiele	802
18.2.5.1	Ansatz der mitwirkenden Breite	802
18.2.5.2	Statisch-bestimmt gelagerter Einfeldträger	802
18.2.5.3	Statisch-unbestimmt gelagerter Zweifeldträger	805
18.2.6	Schlaffe Bewehrung und Vorspannung der Betonplatte durch Spannglieder	809
18.3	Plasto-statische Berechnung (Nachweis der Tragsicherheit)	810
18.3.1	Sicherheitsfragen	810
18.3.2	Berechnungsgrundlagen für den Nachweis der plastischen Grenztragfähigkeit	813
18.3.3	Plastisches Tragmoment M_{p1}	813
18.3.4	Plastisches Tragmoment doppelt-symmetrischer Walzprofile	816
18.3.5	M/Q-Interaktion	817
18.3.6	Beispiele	818
18.3.7	Verbundsicherung	819
18.3.7.1	Erforderliche Anzahl der Verbundmittel	819
18.3.7.2	Kopfbolzendübel	820
18.3.7.3	Blockdübel und Dübel aus, ausgesteiften Profilstählen	820
18.3.7.4	Hakenanker	821
18.3.7.5	Ergänzungen	821
18.3.8	Schubbewehrung im Betongurt	822
18.4	Stahlverbunddecken	822
18.4.1	Konstruktive Ausbildung	822
18.4.2	Bemessung	823
18.4.3	Beispiel	823
18.5	Stahlverbundstützen	824
18.5.1	Konstruktive Ausbildung	824
18.5.2	Berechnungsgrundlagen (DIN 18806 T1)	826
18.5.3	Berechnung der Tragfähigkeit nach strengen Verfahren (mittels EDV)	827
18.5.4	Berechnung der Tragfähigkeit nach einem vereinfachten Verfahren	827
18.5.4.1	Planmäßig mittiger Druck	828
18.5.4.2	Beispiel: Mittig gedrückte Hohlprofilstütze	829
18.5.4.3	Planmäßig außermittiger Druck	829
18.5.4.4	Beispiel: Außermittig gedrückte Stütze mit einbetoniertem Walzprofil	830
18.5.4.5	Querkraftschub	833
18.5.4.6	Krafteinleitungsbereiche	833
19	KORROSIONSSCHUTZ - BRANDSCHUTZ	835
19.1	Vorbemerkungen	835
19.2	Korrosionsschutz	836
19.2.1	Korrosion	836
19.2.1.1	Flächenkorrosion, insbesondere in der Atmosphäre	836
19.2.1.2	Kontaktkorrosion	838
19.2.2	Fertigungsbeschichtungen (FB) - Walzstahlkonservierung	838
19.2.3	Korrosionsschutz durch Beschichtungen	839
19.2.3.1	Vorbereitung der Stahloberfläche	839
19.2.3.2	Wirkung und Zusammensetzung der Beschichtung	840
19.2.3.3	Applikation und Prüfung der Beschichtung	840

19.2.4	Korrosionsschutz durch Überzüge - Stückverzinkung	841
19.2.4.1	Verfahrenstechnik beim Stückverzinken (Feuerverzinken)	841
19.2.4.2	Korrosionsschutzwirkung	842
19.2.4.3	Der Einfluß der Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften	842
19.2.4.4	Überschweißen von Zinküberzügen	843
19.2.4.5	Feuerverzinkte Schrauben	843
19.2.5	Korrosionsschutz von Seilen	843
19.2.6	Weitere Korrosionsschutzmaßnahmen	844
19.2.7	Spannungsrißkorrosion (SRK) und Schwingungsrißkorrosion (SWRK)	845
19.3	Brandschutz	845
19.3.1	Allgemeine Hinweise	845
19.3.2	Brandverlauf und Brandbelastung - DIN 18230	847
19.3.3	Verhalten ungeschützter und geschützter Bauteile und Systeme bei Brandeinwirkung	849
19.3.4	DIN 4102	852
19.3.5	Bauaufsichtliche Brandschutzforderungen	854
19.3.6	Maßnahmen des baulichen Brandschutzes	855
19.3.6.1	Schutzmaßnahmen (Übersicht)	855
19.3.6.2	Stahlverbundbauweise mit brandschutztechnischer Auslegung	857
20	STAHLHOCHBAU	861
20.1	Toleranz- und Modulordnung	861
20.1.1	Toleranzordnung im Maschinenbau	861
20.1.2	Toleranzordnung im Hochbau	862
20.1.3	Modulordnung	863
20.2	Bewegungsfugen	864
20.3	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	864
20.3.1	Allgemeines	864
20.3.2	Windbelastung	865
20.3.2.1	Orkanwind	865
20.3.2.2	Atmosphärische Grenzschicht	866
20.3.2.3	Berechnungswind - Lastannahmen	867
20.3.2.4	Staudruck und Druckverteilung	867
20.3.2.5	Aerodynamische Druck- und Kraftbeiwerte	269
20.3.2.6	Beispiel: Windlast auf ein turmartiges Bauwerk	871
20.3.2.7	Beispiel: Windlast auf Satteldächer	873
20.4	Tragwerke des Stahlhochbaues (Grundformen)	874
20.4.1	Stabilisierung der Tragwerke	874
20.4.2	Grundformen des Hallenbaues	875
20.4.3	Grundformen des Geschoßbaues	879
20.4.4	Stabilisierungskräfte infolge Tragwerksimperfectionen	880
20.4.4.1	Stabilisierung eines Stützenstranges	880
20.4.4.2	Stabilisierung des Druckgurtes eines Fachwerkbinders	881
20.5	Ausbau	882
20.6	Treppen	882
20.6.1	Allgemeine Entwurfs- und Berechnungshinweise	882
20.6.2	Berechnung gewendelter Einholmtreppen	884
21	KRANBAHNEN	887
21.1	Kranhallen	887
21.1.1	Hallen für leichten Kranbetrieb	887
21.1.2	Hallen für schweren Kranbetrieb	888
21.2	Brückenkrane	892
21.3	Kranschienen	894
21.4	Kranbahnträger - Konstruktive Gestaltung	897
21.4.1	Kranbahnträger für leichten Betrieb	897
21.4.2	Kranbahnträger für schweren Betrieb	899
21.4.3	Auflagerung von Kranbahnträgern	900
21.5	Berechnungsgrundlagen für Kranbahnträger	901
21.5.1	Lotrechte Lasten	901
21.5.2	Waagerechte Lasten	902
21.5.2.1	Kraftschluß-Schlupf-Funktion	902
21.5.2.2	Zur Herkunft der waagerechten Kräfte	903
21.5.2.3	Massenkräfte aus Kranfahren	903
21.5.2.4	Führungskräfte aus Schräglauf	906
21.5.2.4.1	Berechnungsanweisung	906
21.5.2.4.2	Einführung in die Spurführungsmechanik	909
21.5.2.4.3	Beispiel	912
21.5.3	Betriebsfestigkeitsnachweis	913
21.5.3.1	Nachweisform	913
21.5.3.2	Betriebsfestigkeitsnachweis	915
21.5.3.2.1	Rückblick	915
21.5.3.2.2	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises nach DIN 15018/DIN 4132	915
21.5.3.3	Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 4132	917
21.5.4	Spezielle Berechnungsverfahren	919
21.5.4.1	Auswertung von Einflußlinien	919

21.5.4.2	Einfeldkranbahnen	920
21.5.4.3	Zwei- und Mehrfeldkranbahnen	924
21.5.4.4	Durchbiegungsberechnung	925
21.5.4.5	Beanspruchung der Kranbahnträger-Obergurte und -Stegbleche infolge örtlichen Raddrucks	929
21.5.4.5.1	Spannungen aus der Radlasteinleitung	930
21.5.4.5.2	Radlastverteilungsbiegung des Obergurtes	931
21.5.4.5.3	Torsionsbeanspruchung des Obergurtes und Querbiegung des angrenzenden Stegbleches infolge exzentrischer Radlaststellung	932
21.5.4.5.4	Beulsicherheitsnachweis des Stegbleches unter Radlasten	933
21.5.4.5.5	Beispiele	934
21.5.4.6	Pufferkräfte	940
21.5.4.6.1	Harte Auffahrt	940
21.5.4.6.2	Auffahrt auf Puffer	940
21.5.4.7	Trägerflanschbiegung bei Unterflanschlaufkatzen	943
21.5.4.7.1	Allgemeines	943
21.5.4.7.2	Berechnungsansätze	944
21.5.4.7.3	Beispiele	946
22	BEHALTERBAU	949
22.1	Einführung	949
22.2	Lager- und Fördergüter	951
22.3	Behälter - Tanke (Beispiele)	955
22.3.1	Wasserbehälter - Wassertürme	955
22.3.2	Abwasserbehälter	956
22.3.3	Oberirdische zylindrische Tankbauwerke (DIN 4119) - Tropfenbehälter	956
22.3.4	Niederdruckgasbehälter (DIN 3397)	957
22.3.5	Kugelgasbehälter	958
22.4	Silos	959
22.5	Dampfkessel- und Reaktoranlagen	960
22.6	Rohrleitungsbau	961
22.7	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	964
22.7.1	Allgemeine Hinweise	964
22.7.2	Anmerkungen zur Behälterschalentheorie	965
22.8	Ergänzende Hinweise zur Ausführung	970
23	STAHLSCORNSTEINE	971
23.1	Allgemeine Hinweise zur konstruktiven Auslegung	971
23.1.1	Tragrohr und Rauchrohr	971
23.1.2	Immissions- und rauchgastechnische Auslegung	972
23.1.3	Korrosionsschutz	973
23.1.4	Ergänzende Hinweise	974
23.2	Statische Auslegung	974
23.2.1	Allgemeines	974
23.2.2	Windlastannahmen	975
23.2.3	Aerodynamische Beiwerte	975
23.2.4	Verformungseinfluß Theorie II. Ordnung	977
23.2.5	Nachweis des Mantelrohres	981
23.2.5.1	Nennspannungsnachweis	981
23.2.5.2	Zylindrisch-konische Übergangsbereiche	981
23.2.5.3	Fuchs- und Einstiegöffnungen	982
23.2.5.4	Zum Beulnachweis des Mantelrohres	984
23.2.6	Ringsteifen - Einflußlinien	985
23.2.7	Mantel- und Ringsteifenbeanspruchung infolge örtlichen Winddrucks	986
23.2.8	Beispiele und Ergänzungen	991
23.2.9	Montagestöße	992
23.2.9.1	Laschenstöße - Flanschstöße	992
23.2.9.2	Beispiel: Montagestoß	994
23.2.10	Schornstein-Verankerung	996
23.2.10.1	Konstruktionsformen	996
23.2.10.2	Ankerkräfte	997
23.2.10.3	Nicht vorgespannte Verankerung	998
23.2.10.3.1	Allgemeine Hinweise	998
23.2.10.3.2	Berechnungsformeln	999
23.2.10.3.3	Beispiel	1002
23.2.10.4	Vorgespannte Verankerung	1003
23.2.10.4.1	Berechnungsmodell	1003
23.2.10.4.2	Beispiel	1004
23.3	Dynamische Auslegung	1006
23.3.1	Vorbemerkungen	1006
23.3.2	Hinweise zur Frequenzberechnung	1007
23.3.3	Böeninduzierte Schwingungen	1010
23.3.3.1	Windböigkeit	1010
23.3.3.2	Modell nach RAUSCH	1011
23.3.3.3	Modell nach SCHLAICH	1011
23.3.3.4	Modell nach PETERSEN	1012
23.3.3.5	Modell nach DAVENPORT	1012

23.3.4	Wirbelinduzierte Schwingungen	1014
23.3.4.1	Strömungsphänomen	1014
23.3.4.2	Querschwingungsnachweis - Näherungsverfahren	1016
23.3.4.3	Querschwingungsnachweis - Strenge Verfahren	1016
23.3.4.4	Beispiele	1017
23.3.4.5	Zum Problem der Selbststeuerung der Wirbelstraße	1021
23.3.4.6	Querschwingungsnachweis nach RUSCHEWEYH	1022
23.3.4.7	Ergänzende Hinweise zum Querschwingungsnachweis	1024
23.3.4.8	Aerodynamische Störmaßnahmen	1026
23.3.4.9	Schwingungsdämpfer	1026
23.3.4.9.1	Allgemeine Hinweise	1026
23.3.4.9.2	Kinetisch äquivalentes Ersatzsystem	1029
23.3.4.9.3	Stationäre Bewegung eines Systems mit viskosem Schwingungsdämpfer	1030
23.3.4.9.4	Optimierungskriterium nach DEN HARTOG	1032
23.3.4.9.5	Parametervariation	1032
24	TÜRME UND MASTE	1035
24.1	Einsatzgebiete der Türme und Maste - Begriffe	1035
24.1.1	Allgemeines	1035
24.1.2	Turmartige Bauwerke für funktechnische Zwecke (Antennenträger)	1038
24.1.3	Turmartige Bauwerke für andere als funktechnische Zwecke	1039
24.2	Lastannahmen für Antennentragwerke	1044
24.2.1	Allgemeine Hinweise	1044
24.2.2	Ungleichförmigkeit des Staudruckes	1044
24.2.3	Aerodynamischer Beiwert für Fachwerktürme und -maste	1045
24.2.4	Aerodynamischer Beiwert für Einbauten und Antennenausrüstungen	1047
24.2.5	Aerodynamischer Beiwert für Antennen	1048
24.2.6	Windbelastung bei Montagezuständen	1049
24.2.7	Lastannahmen bei Vereisung	1050
24.3	Turm- und Mastausfachung	1051
24.4	Statische Berechnung der Türme und Maste	1052
24.4.1	Allgemeine Berechnungshinweise	1052
24.4.2	Zur Frage der kinematischen Stabilität der Turmfachwerke	1056
24.4.3	Ergänzende Hinweise	1058
24.5	Berechnung abgespannter Maste	1058
24.5.1	Vorbemerkungen	1058
24.5.2	Unmittelbare Belastung der Seile	1061
24.5.3	Seilgleichung	1062
24.5.4	Federcharakteristik des dreiseiligen Abspannbündels	1063
24.5.5	Hinweise zur Mastberechnung	1065
24.5.6	Federcharakteristik von Abspannungen geringer Höhe	1068
24.6	Dynamische Auslegung	1070
24.6.1	Vorbemerkungen	1070
24.6.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung einfacher Mast- und Turmstrukturen	1074
24.6.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen abgespannter Maste	1074
24.6.4	Böenreaktionsfaktor bei abgespannten Masten	1076
24.7	Zur konstruktiven Ausbildung	1079
24.8	Blitzschutz	1079
25	BROCKENBAU	1083
25.1	Vorbemerkungen	1083
25.2	Eisenbahnbrücken	1085
25.2.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1085
25.2.2	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	1088
25.2.3	Lastbild UIC71	1091
25.2.4	Mitwirkender Gurtquerschnitt	1093
25.2.4.1	Berechnungsansätze	1093
25.2.4.2	Beispiel	1096
25.2.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	1099
25.2.5.1	Nachweisform (DS804)	1099
25.2.5.2	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises	1101
25.2.5.2.1	Rückblick	1101
25.2.5.2.2	Betriebsfestigkeitsnachweis der DS804	1103
25.2.6	Entwicklung des Eisenbahnbrückenbaues in den zurückliegenden Jahrzehnten	1110
25.2.6.1	Vorbemerkungen	1110
25.2.6.2	Fahrbahn	1110
25.2.6.3	Vollwandbrücken	1113
25.2.6.4	Fachwerkbrücken	1114
25.2.7	Neuzeitlicher Eisenbahnbrückenbau	1117
25.3	Straßenbrücken	1126
25.3.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1126
25.3.2	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	1128
25.3.3	Fahrbahn und Fahrbahnbelag	1131
25.3.4	Deckbrücken in Vollwandbauweise	1133
25.3.5	Großbrückenbau	1136

25.4	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken)	1141
25.4.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1141
25.4.2	Tragsicherheitsnachweis	1143
25.4.3	Schwingungsnachweis	1144
25.5	Ausgewählte Kapitel aus dem Brückenbau	1147
25.5.1	Allgemeine Hinweise zum Tragsicherheitsnachweis	1147
25.5.2	Verfahren der Übertragungsmatrizen	1148
25.5.2.1	Vorbemerkungen	1148
25.5.2.2	Der gerade Stab unter Zug/Druck- und Biegebeanspruchung	1148
25.5.2.2.1	Definition der Verformungs- und Schnittgrößen	1148
25.5.2.2.2	Elastizitätsgesetz für die Verschiebung u in Stablängsrichtung	1149
25.5.2.2.3	Elastizitätsgesetz für die Durchbiegung w in Stabquerrichtung	1149
25.5.2.2.4	Gleichgewichtsgleichungen	1150
25.5.2.2.5	Grundgleichungen (Th.I.Ordnung) für u und w	1150
25.5.2.2.6	Temperatureinwirkung	1150
25.5.2.2.7	Senk- und drehfederelastische Bettung	1151
25.5.2.2.8	Massenkräfte (Balkenschwingungen)	1151
25.5.2.2.9	Anmerkungen zur Lösung der Grundgleichungen	1151
25.5.2.2.10	Übertragungsmatrix für den zug- und drucksteifen Stab	1152
25.5.2.2.11	Übertragungsmatrix für den biegesteifen Stab	1152
25.5.2.2.12	Übertragungsmatrix für den biegesteifen Stab auf elastischer Bettung	1154
25.5.2.3	Der gerade Stab unter Torsion (Primärtorsion)	1154
25.5.2.3.1	Grundgleichung und Lösungssystem	1154
25.5.2.3.2	Erweiterung auf drehelastische Bettung	1154
25.5.2.4	Der im Grundriß kreisförmig gekrümmte Stab	1155
25.5.2.4.1	Gekoppelte Formänderungsbeziehungen	1155
25.5.2.4.2	Gleichgewichtsgleichungen	1156
25.5.2.4.3	Grundgleichung	1156
25.5.2.5	Hinweise zur Ableitung der Übertragungsmatrizen und zur Berechnungsmethodik	1158
25.5.2.6	Ergänzende Hinweise	1163
25.5.3	Mitwirkende Breite - Mitwirkender Gurtquerschnitt	1164
25.5.3.1	Vorbemerkungen	1164
25.5.3.2	Einführung in die elasto-statische Theorie der mitwirkenden Breite	1164
25.5.3.3	Beispiel	1166
25.5.4	Orthotrope Fahrbahnplatten	1168
25.5.4.1	Einleitung	1168
25.5.4.2	Grundzüge der Theorie der orthotropen Fahrbahnplatte	1169
25.5.4.3	Berechnung orthotroper Fahrbahnplatten nach PELIKAN/ESSLINGER	1172
25.5.4.3.1	Berechnungsprinzip	1172
25.5.4.3.2	Orthotrope Platte mit geschlossenen Rippen	1173
25.5.4.4	Ergänzungen	1176
25.5.5	Scheinbarer Elastizitätsmodul von Schrägseilen	1176
25.5.5.1	Problemstellung	1176
25.5.5.2	Herleitung des scheinbaren Elastizitätsmoduls für das unter Eigengewicht stehende Schrägseil	1176
25.5.5.3	Wind- und Vereisungseinfluß	1179
25.5.6	Grundlagen der Hängebrückenberechnung	1179
25.5.6.1	Vorbemerkungen	1179
25.5.6.2	Berechnungstheorie	1180
25.5.6.3	Berechnungsbeispiel: Hängebrücke mittlerer Spannweite	1182
25.5.6.2	Ergänzende Hinweise	1184
25.5.7	Bogenbrücken	1185
25.5.8	Verbände	1186
25.5.9	Nebenspannungen in Fachwerkbrücken	1186
25.6	Brückenlager	1189
25.6.1	Vorbemerkungen	1189
25.6.2	Lageranordnung	1190
25.6.3	HERTZsche Pressung	1192
25.6.4	Lagerformen	1193
25.6.4.1	Stählerne Punktkipplager	1193
25.6.4.2	Stählerne Linienkipplager	1195
25.6.4.3	Stählerne Rollenlager	1195
25.6.4.4	Kunststoffe für Brückenlager	1197
25.6.4.4.1	PTFE (Polytetrafluoräthylen)	1197
25.6.4.4.2	Elastomer	1198
25.6.4.5	Topflager	1199
25.6.4.6	Kalottenlager	1199
25.6.4.7	Elastomer-Lager	1200
25.6.5	Lagerung der Lager	1200
25.6.6	Berechnungsbeispiele und Ergänzungen	1201
25.6.6.1	Berechnungsansätze	1201
25.6.6.2	Behelfe für die Berechnung von Kreisplatten	1201
25.6.6.3	Beispiel: Punktkipplager	1205
25.6.6.4	Ergänzungen zum Beispiel: Punktkipplager	1208
25.6.6.5	Pressungsverteilung in Zapfen und Dollen	1208
25.6.6.6	Abwälzkinematik	1209
25.6.6.7	Gleitkinematik der Kalottenlager	1210

25.6.7 Lagerplatten auf elastischem Halbraum	1210
25.7 Brückenschwingungen	1213
25.7.1 Eigenfrequenzen und Eigenformen	1213
25.7.2 Brückenschwingungen unter rollendem Verkehr	1213
25.7.3 Brückenschwingungen infolge aeroelastischer Anregung	1213
25.7.3.1 Einleitung	1213
25.7.3.2 Galopping-Biegeschwingungen	1214
25.7.3.3 Flatterschwingungen	1217
25.7.3.3.1 Berechnung der kritischen Windgeschwindigkeit	1217
25.7.3.3.2 Beispiele	1219
26 ELASTO-STATISCHE BIEGETHEORIE, INSBESONDERE FÜR DONNWARDIGE STÄBE	1221
26.1 Vorbemerkungen	1221
26.2 Flächenmomente	1221
26.3 Stäbe mit dünnwandigem offenen Querschnitt	1222
26.3.1 Berechnung der Biege- und Schubspannungen ohne Kenntnis der Hauptachsen	1222
26.3.2 Berechnung der Biege- und Schubspannungen bei Kenntnis der Hauptachsen	1226
26.3.2.1 Rechnerische Ermittlung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1226
26.3.2.2 Zeichnerische Bestimmung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1227
26.3.3 Schubmittelpunkt	1228
26.3.4 Beispiel	1229
26.4 Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt	1234
26.4.1 Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1235
26.4.2 Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1236
26.4.3 Beispiele	1237
26.4.3.1 Erstes Beispiel: Symmetrischer, gemischt offen-geschlossener Querschnitt	1237
26.4.3.2 Zweites Beispiel: Unsymmetrischer, gemischt offen-geschlossener Querschnitt	1242
26.5 Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung	1247
26.6 Zur numerischen Berechnung der Flächenmomente	1248
26.7 Vollwandige Träger veränderlicher Höhe	1259
26.8 Berücksichtigung der Schubverzerrung bei der Stabbiegung	1261
26.8.1 Schubsteifigkeit $S = GA_s$ - Schubkorrekturfaktor	1262
26.8.2 Trägerdurchbiegung infolge Querkraft	1264
26.8.3 Beispiele und Ergänzungen	1266
26.8.4 Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung einschließlich Schubverzerrung	1267
26.9 Stäbe mit starker Krümmung bei einachsiger Biegung und Normalkraft	1267
26.9.1 Biegespannungen	1267
26.9.2 Radialspannungen	1270
26.9.3 Formänderungen	1271
26.9.4 Beispiele und Ergänzungen	1271
26.9.5 Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften I-Querschnitten	1274
26.9.6 Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften Kastenquerschnitten	1276
26.9.7 Experimenteller Befund	1277
26.9.8 Hinweise zur praktischen Ausführung	1279
26.9.9 Rohrkrümmer	1279
26.10 Berechnung der Randspannungen mit Hilfe des Querschnittskerns	1280
26.10.1 Bestimmung des Querschnittskerns	1280
26.10.2 Beispiele und Ergänzungen	1281
26.10.3 Maßgebende Wirkungsrichtung bei umlaufender Belastung	1283
26.11 Berechnung der Spannungen bei versagender Zugzone	1284
26.11.1 Bestimmung der klaffenden Fuge	1284
26.11.2 Beispiele	1285
26.12 Zugbiegung Theorie II. Ordnung	1289
26.13 Nichtlineare Zugbiegung schlanker Stäbe mit größerem Durchhang	1292
26.13.1 Einführung	1292
26.13.2 Dehnsteife Hängestäbe	1292
26.13.3 Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Näherungslösungen	1294
26.13.4 Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für $p = \text{konst}$	1295
26.13.5 Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für beliebige Belastung $p(x)$	1296
27 ELASTO-STATISCHE TORSIONSTHEORIE, INSBESONDERE FÜR DONNWARDIGE STÄBE	1301
27.1 Vorbemerkungen	1301
27.2 Torsion gerader Stäbe mit dickwandigem Querschnitt	1301
27.2.1 Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (ST-VENANTSche Torsion)	1301
27.2.1.1 Torsionsmoment	1301
27.2.1.2 Gleichgewichtsgleichungen - Spannungsfunktion ϕ	1302
27.2.1.3 Formänderungsgleichungen	1303
27.2.1.3.1 Verdrillung (Verwindung), Verwölbung	1303
27.2.1.3.2 Kinematische Beziehungen zwischen Verzerrungen und Verformungen	1304
27.2.1.3.3 HOOKEsches Gesetz	1304
27.2.1.3.4 Elasto-statische Beziehungen zwischen Spannungen und Verformungen	1305

27.2.1.4	Grundgleichung für ϕ - Randbedingungen	1305
27.2.1.5	Torsionsträgheitsmoment I_T dickwandiger Querschnitte	1306
27.2.1.6	Anmerkungen zur Lösung der Grundgleichung	1309
27.2.1.7	Schubspannungslinien	1310
27.2.1.8	Seifenhautgleichnis	1310
27.2.1.9	Lösungen für verschiedene Querschnittsformen	1311
27.2.1.9.1	Elliptischer Voll- und Hohlquerschnitt	1311
27.2.1.9.2	Kreis- und Kreisringquerschnitt	1313
27.2.1.9.3	Querschnitt in Form eines gleichseitigen Dreiecks	1313
27.2.1.9.4	Rechteck- und Trapezquerschnitt	1315
27.2.1.9.5	Dünnwandige offene Querschnitte (Stahlbau-Profile)	1317
27.2.1.9.6	Dünnwandige einzellige Querschnitte	1318
27.2.1.9.7	Geschweißte und geschraubte Lamellenquerschnitte	1319
27.2.1.9.8	Vergitterte Querschnittswandungen	1319
27.2.1.9.9	Stahlverbundquerschnitte	1321
27.2.1.10	Beispiele und Ergänzungen	1321
27.2.1.11	Grundgleichung der ST-VEANANTschen Torsion und Lösungssystem	1326
27.2.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung	1329
27.3	Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, offenen Querschnitt	1330
27.3.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (Primärtorsion)	1330
27.3.1.1	Primäre Schubspannungen	1330
27.3.1.2	Verdrehung, Verdrillung (Verwindung) und Verwölbung - Einheitsverwölbung	1330
27.3.1.3	Transformation der Einheitsverwölbung bei Verlagerung der Drehachse	1332
27.3.1.4	Berechnungsbeispiel	1333
27.3.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung (Sekundärtorsion)	1335
27.3.2.1	Grundgleichung der Wölbkrafttorsion	1335
27.3.2.2	Lösungssystem - Rand- und Übergangsbedingungen	1337
27.3.2.3	Wölbkrafttorsion bei Stäben mit I-Querschnitt	1339
27.3.2.4	Schubmittelpunkt	1341
27.3.2.5	Beispiele	1342
27.3.2.5.1	Zusammengesetzter offener Querschnitt; Berechnung des Schubmittelpunktes	1342
27.3.2.5.2	Kragträger mit C-Querschnitt: Wölbspannungsberechnung	1346
27.3.2.6	Ergänzende Hinweise	1349
27.4	Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt	1349
27.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1349
27.4.2	Beispiel: Einzelliger Kastenquerschnitt	1351
27.4.3	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1353
27.4.4	Stäbe mit gemischt offen-geschlossenem Querschnitt	1354
27.4.5	Beispiele und Ergänzungen	1356
27.4.5.1	Kreisrohrquerschnitt (dünn- und dickwandig)	1356
27.4.5.2	Unsymmetrischer, zweizelliger Querschnitt	1357
27.5	Gebundene Biegung - Gebundene Torsion	1360
27.6	Ergänzende Hinweise	1361
28	BRUCHTHEORIE	1363
28.1	Vorbemerkungen	1363
28.2	Ebener Spannungszustand	1364
28.2.1	Hauptspannungen	1364
28.2.2	Verzerrungen des ebenen Spannungszustandes	1367
28.2.3	Vergleichsspannungen bei statischer Beanspruchung	1368
28.2.4	Vergleichsspannungen bei dynamischer Beanspruchung	1370
28.3	Räumlicher Spannungszustand	1371
28.3.1	Formale Vereinbarungen	1371
28.3.2	Verschiebungstensor	1372
28.3.3	Verzerrungstensor	1375
28.3.4	Spannungstensor	1376
28.3.5	HOOKEsches Gesetz	1377
28.3.6	Kugeltensor und Deviator	1378
28.3.7	Festigkeitshypothese von HUBER-MISES-HENCKY für zähe Metalle	1378
28.3.7.1	Vorbemerkungen	1378
28.3.7.2	Invariantentheorie nach v.MISES	1379
28.3.7.3	Oktaederschubspannung	1380
28.3.7.4	Hypothese der konstanten Gestaltänderungsarbeit	1381
28.3.7.5	Ergänzungen	1382
28.3.8	Zahlenbeispiel	1383
28.4	Experimente zur Problematik des Streckgrenzenansatzes	1383
28.4.1	"Statische" Streckgrenze	1386
28.4.2	Elastisch-plastische Hysterese - BAUSCHINGER-Effekt	1387
28.4.3	Bruchbilder statischer Versuche	1388
28.5	Bruchmechanik (Einführung)	1388
28.5.1	Vorbemerkungen	1388
28.5.2	Rißöffnungsarten - Spannungsintensitätsfaktor K	1389
28.5.3	Rißtheorie bei statischer Beanspruchung	1390
28.5.3.1	GRIFFITH-Riß (1921)	1390
28.5.3.2	IRWIN-Riß (1952) - K-Konzept	1393

28.5.3.3 DUGDALE-Riß (1960) - COD-Konzept	1395
28.5.4 Spannungsrißkorrosion	1395
28.5.5 Rißtheorie bei dynamischer Beanspruchung	1396
Anhang	1399
Literaturverzeichnis	1407
Sachregister	1445