

STAHLBAU

Grundlagen
der Berechnung und baulichen Ausbildung
von Stahlbauten

2., verbesserte Auflage

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



Friedr. Vieweg & Sohn

Braunschweig/Wiesbaden

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	Überblick	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	Warmwalzwerkezeugnisse	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 - Benennungssystem	78
2.7.2	Allgemeine Baustähle	79
2.7.3	Hochfeste Feinkornbaustähle	79
2.7.4	Wetterfeste Baustähle	80
2.7.5	Nichtrostende Stähle	80

2.7.6	Stähle für geschweißte und nahtlose Rohre (Hohlprofile)	81
2.7.7	Warmfeste Stähle	81
2.7.8	Kaltzähle Stähle	82
2.7.9	Vergütungsstähle	82
2.7.10	Einsatzstähle	82
2.7.11	Stahlguß	82
2.7.12	Stähle für Schweißwerkstoffe, Schrauben und Niete	83
2.7.13	Gusseisen	83
3	NACHWEIS DER TRAGSICHERHEIT UND GEBRAUCHSFÄHIGKEIT	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	Beispiel	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 Festigkeit	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 Gebrauchsfähigkeit	183
3.8.1 Einführung	183
3.8.2 Verformungskriterien	184
3.8.3 Schwingungskriterien	186
4 ELASTO-STATISCHE FESTIGKEITSNACHWEISE	189
4.1 Normalspannungen infolge Zug/Druck und Biegung	189
4.1.1 Berechnungsformel	189
4.1.2 Nachweis der Zug- und Druckspannungen	190
4.1.3 Beispiele	191
4.1.4 Nachweis der Biegespannungen	193
4.1.5 Zur Berechnung der Trägheitsmomente	194
4.1.6 Aufteilung eines Biegemomentes auf die Teile eines Querschnittes	195
4.2 Schubspannungen infolge Querkraft	197
4.2.1 Berechnungsformel	197
4.2.2 Nachweis der Schubspannungen	199
4.3 Herleitung einiger Berechnungsformeln	200
4.4 Beispiele und Ergänzungen	202
4.5 Mitwirkende Breite	206
4.6 Experimenteller Befund	208
4.7 Schubmittelpunkt	209
4.7.1 Problemstellung - Biegung von I-Profilen	209
4.7.2 Beispiele	212
4.8 Schubspannungen infolge Torsion	213
4.8.1 Gegenüberstellung: Primärtorsion - Sekundärtorsion	213
4.8.2 Primärtorsion (ST-VENANT'sche Torsion)	215
4.8.2.1 Stäbe mit offenem, dünnwandigen Querschnitt	215
4.8.2.2 Stäbe mit geschlossenem, dünnwandigen Querschnitt	219
4.8.3 Einführung in die Sekundärtorsion	220
4.9 Nachweis kombinierter Normal- und Schubspannungszustände	222
4.9.1 Vergleichsspannung bei statischer Beanspruchung	222
4.9.2 Vergleichsspannung bei dynamischer Beanspruchung	223
5 ELASTO-STATISCHE BERECHNUNG DER STABTRAGWERKE (GRUNDZÜGE)	225
5.1 Einführung	225
5.2 Kräfte und Momente	228
5.3 Grad der statischen Bestimmtheit	228
5.3.1 Ebene Stabtragwerke	228
5.3.2 Räumliche Stabtragwerke	232
5.4 Berechnung der Stabtragwerke	232
5.4.1 Statisch bestimmte Stabtragwerke	232
5.4.2 Statisch unbestimmte Stabtragwerke	233
5.4.3 Berechnung der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen)	234
5.4.3.1 Arbeitssatz	234
5.4.3.2 Integraltafeln	235
5.4.3.3 Einfluß von Anschlußzentritäten und Anschlußnachgiebigkeiten	237
5.4.3.4 Reduktionssatz	238
5.4.3.5 Grundaufgaben	238
5.4.3.6 Vertauschungssatz	239
5.4.4 Einflußlinien für Stütz-, Schnitt- und Verformungsgrößen	240
5.5 Allgemeine Hinweise zu den Berechnungsverfahren der Stabstatik	242
6 PLASTO-STATISCHE BERECHNUNG DER STABTRAGWERKE	245
6.1 Querschnittstragfähigkeit eines Zug- und Druckstabes	245
6.1.1 Eigenspannungsfreier Querschnitt	245
6.1.2 Eigenspannungsbehafteter Querschnitt	245
6.1.3 Berücksichtigung der Verfestigung	246
6.2 Fließzonentheorie	249
6.2.1 Exemplarische Darstellung am Einfeldbalken mit Rechteckquerschnitt	249
6.2.2 Verallgemeinerung	253
6.3 Fließgelenktheorie	253
6.3.1 Querschnittstragfähigkeit eines Biegestabes	253
6.3.2 Fließgelenkhypothese	256
6.3.3 Be- und Entlastung	258
6.3.4 Einführende Beispiele: Einfeldträger - Durchlaufträger	260
6.3.4.1 Beidseitig eingespannte Träger	260
6.3.4.2 Einseitig eingespannte Träger	261
6.3.4.3 Träger mit veränderlicher Tragfähigkeit	263
6.3.4.4 Durchlaufträger	265
6.3.5 Tragkraftsätze	267
6.3.6 Weiterführende Beispiele: Rahmen unter Einzellasten	268
6.3.6.1 Elementarketten / Probierversahren - Kombinationsverfahren	268
6.3.6.2 Kombinationsverfahren: Einfeldrahmen	269
6.3.6.3 Kombinationsverfahren: Zweifeldrahmen	271
6.3.6.4 Verschiebungspläne	272
6.3.7 Normalkraft- und Querkraftinteraktion	274
6.3.7.1 Interaktionsbegriff	274

6.3.7.2	M/N-Interaktion bei I-Querschnitten	274
6.3.7.3	M/N/Q-Interaktion bei I-Querschnitten	275
6.3.7.4	Beispiel	276
6.3.8	Doppelte Biegung	278
6.3.8.1	Doppelte Biegung bei I-Querschnitten	278
6.4	Sicherheitsaspekte	279
7	STABILITÄTSNACHWEISE (KNICKEN - KIPPEN - BEULEN)	289
7.1	Einführung in die Grundlagen der Stabilitätstheorie	289
7.1.1	Statisches und energetisches Stabilitätskriterium	189
7.1.2	System A (Zweistabsystem mit Drehfeder)	291
7.1.2.1	Statische Herleitung	291
7.1.2.2	Energetische Herleitung	293
7.1.3	System B (Dreistabsystem mit Drehfedern)	293
7.1.3.1	Statische Herleitung	293
7.1.3.2	Energetische Herleitung	295
7.1.4	System C (Zweistabsystem mit Verschiebungsfeder)	296
7.1.4.1	Statische Herleitung	296
7.1.4.2	Energetische Herleitung	297
7.1.5	System D (Dreistabsystem mit Verschiebungsfedern)	298
7.1.5.1	Statische Herleitung	298
7.1.5.2	Energetische Herleitung	299
7.2	Tragsicherheitsnachweis gedrückter Stäbe und Stabwerke (Stabilitätsnachweis)	300
7.2.1	Gegenüberstellung: Biegetheorie II. Ordnung - Verzweigungstheorie	300
7.2.2	Knickkräfte und Knicklängen der EULER-Fälle I bis VI	302
7.2.3	Planmäßig mittig gedrückte Stäbe	302
7.2.3.1	Knickspannung nach EULER und ENGRESSER/KÄRMÄN	302
7.2.3.2	Tragsicherheitsnachweis planmäßig mittig gedrückter Stäbe nach DIN 4114	304
7.2.3.3	Tragsicherheitsnachweis planmäßig mittig gedrückter Stäbe nach E DIN 18800 T2	305
7.2.3.4	Beispiel	306
7.2.4	Planmäßig außermittig gedrückte Stäbe - Druck und Biegung	307
7.2.4.1	Gegenüberstellung: Planmäßig mittig und planmäßig außermittig gedrückte Stäbe	307
7.2.4.2	Tragsicherheitsnachweis planmäßig außermittig gedrückter Stäbe nach DIN 4114	308
7.2.4.3	Tragsicherheitsnachweis planmäßig außermittig gedrückter Stäbe nach E DIN 18800 T2	310
7.2.4.4	Zur Abschätzung des Verformungseinflusses bei elasto-statischen Berechnungen nach Theorie II. Ordnung	311
7.2.4.5	Exemplarische Einführung in die plasto-statische Berechnung nach Theorie II. Ordnung	314
7.2.4.6	Grenzzustände	314
7.2.4.7	Absicherung gegen den Grenzzustand: Lokales Beulen dünnwandiger Teile	319
7.3	Stabiegetheorie II. Ordnung - Verzweigungstheorie (Knicktheorie)	320
7.3.1	Differentialgleichungsverfahren 1. Art	320
7.3.1.1	Grundlagen	320
7.3.1.2	Erstes Beispiel: EULER-Stab I	320
7.3.1.3	Zweites Beispiel: Einhäufiger Rahmen mit eingespanntem Stiel	323
7.3.2	Differentialgleichungsverfahren 2. Art	326
7.3.2.1	Grundgleichung und Lösungssystem	326
7.3.2.2	Beispiel zur Knicktheorie	327
7.3.2.3	Ergänzende Hinweise	329
7.3.3	Verformungsgrößenverfahren Theorie II. Ordnung	331
7.3.3.1	Grundformeln	331
7.3.3.2	Einspannungsmomente	332
7.3.3.3	Gelenkfigur	334
7.3.3.4	Bestimmungsgleichungen auf der Grundlage des Gleichgewichtsprinzips	334
7.3.3.4.1	Knoten- und Stockwerksgleichungen	334
7.3.3.4.2	Beispiel: Rechteckrahmen	335
7.3.3.4.3	Beispiel: Einstieliger Rahmen mit Pendelstützen	336
7.3.3.4.4	Beispiel: Einhäufiger Rahmen mit Kragstiel	339
7.3.3.4.5	Beispiel: Knickstab mit sprunghaft veränderlicher Biegesteifigkeit und mittiger Stützfeder	339
7.3.3.5	Bestimmungsgleichungen auf der Grundlage des Prinzips der virtuellen Verrückung (Knoten- und Netzgleichungen)	341
7.3.3.6	Giebelrahmen mit Zugband als exemplarisches Beispiel	342
7.3.3.6.1	Kinematische Verschiebungsgleichungen	342
7.3.3.6.2	Knoten- und Netzgleichungen	344
7.3.3.6.3	Knicklösung ohne Berücksichtigung der Riegeldruckkraft	347
7.3.3.6.4	Knicklösung mit Berücksichtigung der Riegeldruckkraft	348
7.3.3.6.5	Numerisches Beispiel: Lastfälle: Eigengewicht, Schnee und Wind	351
7.3.3.6.6	Abschätzung des Verformungseinflusses Theorie II. Ordnung	353
7.3.3.6.7	Fortsetzung des numerischen Beispiels: Vorverformungen (Imperfektionen)	355
7.3.3.6.8	"Symmetrieknicken"	356
7.4	Mehrteilige Druckstäbe	357
7.4.1	Ausführungsformen - Rahmenstäbe / Gitterstäbe	357

7.4.2	Knickkraft, Knicklänge und ideelle Schlankheit des schubweichen Stabes	359
7.4.3	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	361
7.4.3.1	Nachweisform	361
7.4.3.2	Beispiele	363
7.4.4	Tragsicherheitsnachweis nach E DIN 18800 T2	366
7.4.4.1	Nachweisform	366
7.4.4.2	Beispiel: Rahmenstütze	368
7.5	Tragsicherheitsnachweis gegen Biegedrillknicken	370
7.5.1	Einführung	370
7.5.2	Grundgleichungen des Biegedrillknickproblems außermittig gedrückter Stäbe mit doppelt-symmetrischem Querschnitt	370
7.5.3	Elasto-statische Lösungen des Biegedrillknickproblems	372
7.5.4	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	375
7.5.4.1	Nachweisform	375
7.5.4.2	Beispiele	376
7.5.5	Tragsicherheitsnachweis nach E DIN 18800 T2	378
7.6	Tragsicherheitsnachweis biegebeanspruchter Stäbe (Träger) gegen Kippen	379
7.6.1	Einführung - Näherungsnachweis	379
7.6.2	Elasto-statische Lösung des Kippproblems	380
7.6.3	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 4114	382
7.6.4	Tragsicherheitsnachweis nach E DIN 18800 T2	383
7.6.5	Beispiele und Ergänzungen	384
7.6.6	Elastische Drehbettung	388
7.6.6.1	Problemstellung	388
7.6.6.2	Beispiel	390
7.8	Beulung und Beulbiegung Theorie II. Ordnung ebener Rechteckplatten	391
7.8.1	Lineare Beultheorie	391
7.8.1.1	Statische Herleitung der Grundgleichungen	391
7.8.1.1.1	Definitionen - Schnittgrößen	391
7.8.1.1.2	Gleichgewichtsgleichungen	392
7.8.1.1.2	Elastizitätsgesetz	393
7.8.1.1.4	Grundgleichung Theorie II. Ordnung und Randbedingungen	394
7.8.1.1.5	Scheibenspannungszustand	396
7.8.1.2	Energetische Herleitung der Grundgleichungen	397
7.8.1.2.1	Energiekriterium	397
7.8.1.2.2	Potential der inneren Kräfte	397
7.8.1.2.3	Potential der äußeren Kräfte	398
7.8.1.2.4	Gesamtpotential - Variation $\delta\Pi=0$	399
7.8.1.2.5	Randbedingungen	400
7.8.2	Lösungen der linearen Beultheorie	400
7.8.2.1	Lösungen auf der Grundlage der Beulgleichung für Rechteckplatten mit gegengleichen konstanten Randdruckkräften	400
7.8.2.1.1	Einzelfeld mit freien Längsrändern	400
7.8.2.1.2	Einzelfeld mit frei drehbaren, unverschieblichen Längsrändern	401
7.8.2.1.3	Einzelfeld mit eingespannten Längsrändern	402
7.8.2.2	Lösungen auf der Grundlage des Energiepotentials für Rechteckplatten mit NAVIERschen Randbedingungen (RAYLEIGH/RITZ-Verfahren)	404
7.8.3	Baupraktische Nachweisformen auf der Basis der linearen Beultheorie	406
7.8.3.1	Allgemeine Hinweise	406
7.8.3.2	Beulnachweis unausgesteifter Platten nach DIN 4114 (1952)	409
7.8.3.3	Beulnachweis unausgesteifter Platten nach DASt-Ri 012 (1978)	409
7.8.3.4	Beispiel: Kastenträger	409
7.8.3.5	Ausgesteifte Rechteckplatten	410
7.8.3.6	Grenzverhältnis b/t dünnwandiger Teile von Druck- und Biegegliedern	411
7.8.4	Nichtlineare Beultheorie	413
7.8.4.1	Grundgleichungen für große Verformungen	413
7.8.4.2	Quadratplatte unter konstanten Randdruckspannungen	413
7.8.4.3	Konzept der wirksamen Breite	416
7.8.4.4	Beispiel: Kastenträger	418
8	VERBINDUNGSTECHNIK I: SCHWEISSVERBINDUNGEN	421
8.1	Großer und kleiner Eignungsnachweis	421
8.2	Schweißverfahren	422
8.2.1	Schmelzschweißen	423
8.2.1.1	Gasschweißen (Autogenschweißen)	423
8.2.1.2	Lichtbogenschweißen	423
8.2.2	Preßschweißen	427
8.3	Konstruktive Ausbildung der Schweißnähte	427
8.3.1	Brennschneiden	427
8.3.2	Nahtformen	428
8.3.3	Schweißeigenstressspannungen (Schrumpfspannungen)	429
8.4	Sicherheit geschweißter Bauteile	430
8.4.1	Sicherheitsaspekte	430
8.4.2	Wärmeeinflußzone (WEZ)	430
8.4.3	Das Sprödbruchproblem	430
8.4.4	Werkstoffabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	431
8.4.4.1	Rißarten beim Abkühlen der Schweißnaht	431
8.4.4.2	Zähigkeit schweißgeeigneter Stähle	432
8.4.4.3	Desoxidations- und Vergießungsart (Seigerungen)	432
8.4.4.4	Terrassenbruch	433

8.4.4.5	Abschreckhärtung (Aufhärtung)	433
8.4.4.6	Alterung - Reckalterung	439
8.4.4.7	Grobkornbildung	440
8.4.5	Beanspruchungsabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	440
8.4.6	Konstruktions- und herstellungsabhängige Einflüsse auf die Sicherheit geschweißter Bauteile	442
8.5	Schweißbeignung der Stähle	443
8.5.1	Allgemeine Hinweise	443
8.5.2	Wahl der Stahlgütegruppe	444
8.6	Prüfung der Schweißnähte	445
8.7	Tragsicherheitsnachweis der Schweißverbindungen	446
8.7.1	Real- und Nennbeanspruchung - Rechnerischer Nachweis	446
8.7.1.1	Stumpfnähte	446
8.7.1.2	Kehlnähte	447
8.7.1.3	Kombination von Stumpf- und Kehlnähten	449
8.7.1.4	Zusammengesetzte (mehrachsig) Beanspruchung	450
8.7.1.5	Kennzeichnung und Sinnbilder	451
8.7.1.6	Berechnungsbeispiele	451
8.8	Zur Theorie der Kehlnähte	460
8.8.1	Verteilung der Schubkraft in Kehlnähten	460
8.8.2	Experimenteller Befund	463
9	VERBINDUNGSTECHNIK II: SCHRAUB- UND NIETVERBINDUNGEN	465
9.1	SL- und GV-Verbindungen - Grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale	465
9.2	Werkstoffe - Normung	466
9.2.1	Niete	466
9.2.2	Schrauben	467
9.3	SL- und SLP-Verbindungen	470
9.3.1	Fertigung der Nietverbindungen	470
9.3.2	Fertigung der SL- und SLP-Schraubenverbindungen	471
9.3.3	Durchmesser und Anordnung der Niete und Schrauben	473
9.3.4	Tragsicherheitsnachweis der SL- und SLP-Verbindungen	475
9.3.4.1	Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung	475
9.3.4.2	Nachweisform bei vorwiegend ruhender Belastung	477
9.3.4.3	Nachweisform bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	479
9.3.5	Nachweisform bei achsialer Zugbeanspruchung (SLZ, SLPZ)	480
9.4	GV- und GVP-Verbindungen	481
9.4.1	Fertigung der GV- und GVP-Verbindungen	481
9.4.2	Tragsicherheitsnachweis der GV- und GVP-Verbindungen	484
9.4.2.1	Wirkungsweise und Tragverhalten	484
9.4.2.2	Nachweisform	485
9.4.3	Tragsicherheitsnachweis bei achsialer Zugbeanspruchung (GVZ, GVPZ)	486
9.4.3.1	Umlagerung der Kräfte in einer vorgespannten Schraubenverbindung	486
9.4.3.2	Reduzierte Tragkräfte pro Reibfläche	487
9.5	Beispiele und Ergänzungen	488
9.6	Zugversuche an geschraubten Prüfkörpern	490
9.6.1	Versuchsprogramm Nr. 1: Zweischraubenverbindungen	490
9.6.2	Versuchsprogramm Nr. 2: Mehrschraubenverbindungen	496
9.6.3	Schraubenverbindungen als diskontinuierliche Scherverbindung	498
9.6.3.1	Elasto-statische Theorie	498
9.6.3.2	Experimenteller Befund	499
9.6.4	Bewertung der Versuche	500
9.7	Vorgespannte Schraubenverbindungen bei zentrischer und exzentrischer Zugbeanspruchung	502
9.7.1	Vorbemerkung	502
9.7.2	Verspannungsdreieck	502
9.7.3	Federmodell bei vorgespannten Stoß- und Verankerungskonstruktionen	505
9.7.4	Stirnplatten- und Flanschverbindungen	506
9.7.4.1	Allgemeines	506
9.7.4.2	Elasto-statische Theorie des L-Modells	506
9.7.4.3	Plasto-statische Theorie des L-Modells	508
9.7.4.4	Beispiel	509
9.7.4.5	Experimenteller Befund	511
9.8	Ermüdungsfestigkeit achsial beanspruchter Schrauben	514
10	VERBINDUNGSTECHNIK III: BOLZENVERBINDUNGEN MIT AUGENLASCHEN	517
10.1	Einsatzbereiche	517
10.2	Bemessung der Augenstäbe	518
10.2.1	Allgemeine Hinweise	518
10.2.2	Bemessung der Augenstäbe	520
10.3	Bemessung der Bolzen	521
10.4	Statische Tragversuche	522
10.5	Ermüdungsfestigkeit	524
10.6	Tragsicherheitsnachweis	525
10.6.1	Nachweisform	525
10.6.2	Beispiele und Ergänzungen	526
11	VERBINDUNGSTECHNIK IV: Sondertechniken	529
11.1	Vorbemerkungen	529
11.2	Punktschweißen	529

11.3	Bolzenschweißen	530
11.4	Schweißen von Kranschienenstößen	531
11.5	Schießringbolzen	531
11.6	Blindniete	532
11.7	Selbstschneidende Blechschrauben	532
11.8	Dübel	533
11.9	Trägerklemmen	534
11.10	Metallkleben	534
12	STÜTZEN	537
12.1	Einführung	537
12.2	Querschnittsformen	537
12.3	Stützenstöße	538
12.4	Stützenfußkonstruktionen	540
12.4.1	Konstruktive Ausbildung	540
12.4.2	Berechnung der Fußkonstruktion	544
12.4.2.1	Pressung - Druck- und Ankerkräfte	544
12.4.2.2	Fußplatten	547
12.4.2.4	Beispiele und Ergänzungen	550
12.4.2.5	Montageanker	556
12.4.2.6	Zuganker	557
12.4.2.7	Beispiel	559
12.4.3	Stützenverankerungen ohne und mit Vorspannung der Anker	562
12.4.3.1	Nicht vorgespannte Verankerungen	562
12.4.3.2	Vorgespannte Verankerungen	564
12.4.3.3	Beispiele und Ergänzungen	565
12.4.4	Köcherfundamente	569
12.4.4.1	Allgemeines	569
12.4.4.2	Berechnungshinweise	569
12.4.4.3	Beispiel	572
12.4.4.4	Berechnungsmodell: Elastisch gebetteter Balken	473
12.4.4.5	Tragversuche und Folgerungen	575
13	VOLLWANDTRÄGER	579
13.1	Walzträger	579
13.2	Geschweißte Vollwandträger (Querschnittsformen - Steifen)	581
13.3	Auslegung und Berechnung von Vollwandträgern	584
13.3.1	Nachweis der Tragsicherheit - Bemessung	584
13.3.2	Formänderungsnachweis	587
13.3.2.1	Beschränkung der Durchbiegung	587
13.3.2.2	Verfahren der W-Gewichte	587
13.3.2.3	Träger mit konstanter Biegesteifigkeit	589
13.3.2.3	Träger mit variabler Biegesteifigkeit	592
13.4	Trägerstöße	595
13.4.1	Allgemeines	595
13.4.2	Geschweißte Trägerstöße	595
13.4.3	Geschraubte Trägerstöße	598
13.4.3.1	Gurtplattenstöße	598
13.4.3.2	Stegblechstöße	599
13.4.3.3	Beispiel: Geschraubter Vollstoß eines Hochbauträgers	601
13.5	Geschraubte (genietet) Vollwandträger	603
13.6	Sonderfragen	605
13.6.1	Steifenlose Walzträger	605
13.6.2	Träger mit dünnen Stegen	605
13.6.3	Träger mit Stegdurchbrüchen	606
13.6.4	Wabenträger	607
13.6.5	Rahmenträger	608
13.6.6	Näherungsweise Abschätzung der VIERENDEEL-Rahmentragwirkung	608
13.6.7	Tragversuche an Trägern mit Stegausehnehmungen und Berechnungsvorschlag	611
13.6.7.1	Experimenteller Befund	611
13.6.7.2	Berechnungsanweisung und Beispiel	612
14	GELENKIGE UND BIEGESTEIFE ANSCHLUSSKONSTRUKTIONEN	617
14.1	Allgemeine Konstruktionshinweise	617
14.2	Querkraftbeanspruchte Trägeranschlüsse	621
14.2.1	Anschluß mittels Doppelwinkel	621
14.2.2	Anschluß mittels Stirnplatte	622
14.2.3	Ausklinkungen	623
14.2.4	Beispiele und Ergänzungen	624
14.3	Biegesteife Anschlüsse und Rahmenecken	625
14.3.1	Konstruktive Ausbildung von Rahmenecken - Geschweißte Ausführung	625
14.3.2	Aussteifungsrippen	628
14.3.3	Anschlußschnittgrößen	630
14.3.4	Geschraubter Stirnplattenanschluß mit Zuglasche	630
14.3.5	Geschraubter Stirnplattenanschluß ohne Zuglasche	631
14.3.5.1	Vorgabe des Druckpunktes	631
14.3.5.2	Bestimmung des Druckzentrums nach dem Verfahren von SCHINEIS	632
14.3.5.3	Beispiele	634
14.3.5.4	Anmerkungen zu den Nachweisverfahren	636
14.3.6	Spannungs- und Beulnachweis der Rahmeneckbleche	639
14.3.7	Biegesteife Stirnplattenanschlüsse mit vorgespannten hochfesten Schrauben	642

14.3.7.1	Regelausführungen nach dem DStV-DAST-Typenkatalog	642
14.3.7.2	Beanspruchung und Ausbildung der Stützenflansche der Rahmenstiele	643
14.3.7.3	Berechnungsanweisungen	645
14.3.7.4	Beispiele	647
14.4	Steifenlose Auflager- und Anschlußkonstruktionen	650
15	FACHWERKTRAGER	653
15.1	Allgemeine Gestaltungs- und Berechnungsgrundsätze	653
15.2	Geschweißte Fachwerke des Stahlhochbaues	657
15.2.1	Querschnittsformen	657
15.2.2	Fachwerke aus Rundrohren	660
15.3	Geschraubte (genietete) Fachwerke - Geschraubte Anschlüsse	665
15.3.1	Querschnittsformen	665
15.3.2	Knotenbleche und Anschlüsse	665
15.4	Ergänzungen und Beispiele	668
15.4.1	Fachwerke mit Kopfplattenanschluß der Füllstäbe	668
15.4.2	Spannungen im Anschlußbereich geschraubter JL-Stäbe	668
15.4.3	Zusatzmomente bei JL-Füllstäben in Fachwerken	669
15.4.4	Ausmittigkeitenbeanspruchung bei exzentrisch liegenden Zugstreben	670
16	SEILE UND SEILWERKE	673
16.1	Seile, Bündel und Kabel	673
16.1.1	Seildraht	673
16.1.2	Seilarten - Seilendausbildung	673
16.1.3	Gewicht, Querschnittsfläche und Bruchkraft von Seilen	676
16.1.4	Tragsicherheitsnachweis bei vorwiegend ruhender Belastung	677
16.1.5	Tragsicherheitsnachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung	677
16.1.5.1	Allgemeine Hinweise	677
16.1.5.2	Versuchsbefund	678
16.1.5.3	Nachweisform nach DIN 1073/DIN 18809	789
16.1.6	Dehnverhalten der Seile - Elastizitätsmodul	680
16.2	Stangen (Spannstahlstangen als Zugglieder)	682
16.2.1	Allgemeines	682
16.2.2	Vorwiegend ruhende Beanspruchung	683
16.2.3	Nicht vorwiegend ruhende Beanspruchung	683
16.3	Seilstatik	684
16.3.1	Herleitung der Seilgleichung für das ebene Seil	684
16.3.2	Parabel	686
16.3.2.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	686
16.3.2.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	686
16.3.2.3	Ungleichhohe Aufhängepunkte	687
16.3.3	Katenoide (Kettenlinie)	690
16.3.3.1	Allgemeine Lösung der Grundgleichung	690
16.3.3.2	Gleichhohe Aufhängepunkte	691
16.3.3.3	Zur Annäherung der Katenoide durch eine Parabel	693
16.3.3.4	Ungleichhohe Aufhängepunkte	694
16.3.4	Beispiele und Ergänzungen	696
16.3.4.1	Polygonalseile unter Einzellasten	696
16.3.4.2	Flach gespannte Seile unter symmetrischer Belastung	699
16.3.4.3	Flach gespannte Seile unter unsymmetrischer Belastung	702
16.3.4.4	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit gleichhohen Aufhängepunkten	702
16.3.4.5	Zustandsgleichung des straff gespannten Seiles mit ungleichhohen Aufhängepunkten	704
16.3.4.6	Hinweise zur Berechnung von Freileitungen	704
16.3.4.7	Hinweise zur Berechnung von Fahrleitungen	707
16.3.4.8	Halte- und Abspannseile von Kranen (Fördertechnik)	708
16.3.4.9	Schrägseile mit Einzellasten	709
16.3.4.10	Hinweise zur Berechnung von Seilbahnen	710
17	TRAPEZPROFIL-BAUWEISE	719
17.1	Einführung	719
17.2	Zum Tragverhalten dünnwandiger Bauteile im überkritischen Bereich	719
17.3	Herstellung der Trapezbleche - Profiltypen	722
17.4	Statische Funktion der Stahltrapezprofile	726
17.5	Verwendung der Trapezprofile als lastabtragende Biegeglieder	726
17.5.1	Zur Optimierung der Profilform	726
17.5.2	Bestimmung der Tragfähigkeit mittels Versuchen	727
17.5.3	Ergänzende Angaben zum Tragsicherheitsnachweis und zur baulichen Ausbildung	728
17.5.4	Durchbiegungsnachweis	730
17.5.5	Beispiel: Hallenflachdach als Warmdach	730
17.6	Verwendung der Trapezprofile als Schubfelder	732
17.6.1	Tragwirkung und konstruktive Ausbildung der Schubfelder	732
17.6.2	Einführung in die Schubfeldtheorie	733
17.6.3	Anwendung der Schubfeldtheorie auf Stahltrapezprofile	736
17.6.4	Beispiele	738
17.7	Kaltprofile	745

18	STAHLVERBUNDBAUWEISE	747
18.1	Allgemeine Hinweise	747
18.2	Elasto-statische Berechnung (Nachweis der Gebrauchsfähigkeit)	751
18.2.1	Berechnungsgrundlagen	751
18.2.2	Verteilungsgrößen	751
18.2.2.1	Außerlich statisch bestimmte Systeme	751
18.2.2.2	Außerlich statisch unbestimmte Systeme	753
18.2.3	Kriechen und Schwinden des Betons	754
18.2.3.1	Einführung	754
18.2.3.2	Neuere Kriech- und Schwindansätze	755
18.2.4	Umlagerungsgrößen infolge Kriechens und Schwindens	757
18.2.4.1	Außerlich statisch-bestimmte Systeme	757
18.2.4.2	Außerlich statisch-unbestimmte Systeme	760
18.2.5	Berechnungsbeispiele	762
18.2.5.1	Ansatz der mitwirkenden Breite	762
18.2.5.2	Statisch-bestimmt gelagerter Einfeldträger	762
18.2.5.3	Statisch-unbestimmt gelagerter Zweifeldträger	765
18.2.6	Schlaaffe Bewehrung und Vorspannung der Betonplatte durch Spannglieder	769
18.3	Plasto-statische Berechnung (Nachweis der Tragsicherheit)	770
18.3.1	Sicherheitsfragen	770
18.3.2	Berechnungsgrundlagen für den Nachweis der plastischen Grenztragfähigkeit	773
18.3.3	Plastisches Tragmoment M_{p1}	773
18.3.4	Plastisches Tragmoment doppelt-symmetrischer Walzprofile	776
18.3.5	M/Q-Interaktion	777
18.3.6	Beispiele	778
18.3.7	Verbundsicherung	779
18.3.7.1	Erforderliche Anzahl der Verbundmittel	779
18.3.7.2	Kopfbolzendübel	780
18.3.7.3	Blockdübel und Dübel aus ausgesteiften Profilstählen	780
18.3.7.4	Hakenanker	781
18.3.7.5	Ergänzungen	781
18.3.8	Schubbewehrung im Betongurt	782
18.4	Stahlverbunddecken	782
18.4.1	Konstruktive Ausbildung	782
18.4.2	Bemessung	783
18.4.3	Beispiel	783
18.5	Stahlverbundstützen	784
18.5.1	Konstruktive Ausbildung	784
18.5.2	Berechnungsgrundlagen (DIN 18806 T1)	786
18.5.3	Berechnung der Tragfähigkeit nach strengen Verfahren (mittels EDV)	787
18.5.4	Berechnung der Tragfähigkeit nach einem vereinfachten Verfahren	787
18.5.4.1	Planmäßig mittiger Druck	788
18.5.4.2	Beispiel: Mittig gedrückte Hohlprofilstütze	789
18.5.4.3	Planmäßig außermittiger Druck	789
18.5.4.4	Beispiel: Außermittig gedrückte Stütze mit einbetoniertem Walzprofil	790
18.5.4.5	Querkraftschub	793
18.5.4.6	Krafteinleitungsbereiche	793
19	KORROSIONSSCHUTZ - BRANDSCHUTZ	795
19.1	Vorbemerkungen	795
19.2	Korrosionsschutz	796
19.2.1	Korrosion	796
19.2.1.1	Flächenkorrosion, insbesondere in der Atmosphäre	796
19.2.1.2	Kontaktkorrosion	798
19.2.2	Fertigungsbeschichtungen (FB) - Walzstahlkonservierung	798
18.2.3	Korrosionsschutz durch Beschichtungen	799
19.2.3.1	Vorbereitung der Stahloberfläche	799
19.2.3.2	Wirkung und Zusammensetzung der Beschichtung	800
19.2.3.3	Applikation und Prüfung der Beschichtung	800
19.2.4	Korrosionsschutz durch Überzüge - Stückverzinkung	801
19.2.4.1	Verfahrenstechnik beim Stückverzinken (Feuerverzinken)	801
19.2.4.2	Korrosionsschutzwirkung	802
19.2.4.3	Der Einfluß der Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften	802
19.2.4.4	Überschweißen von Zinküberzügen	803
19.2.4.5	Feuerverzinkte Schrauben	803
19.2.5	Korrosionsschutz von Seilen	803
19.2.6	Weitere Korrosionsschutzmaßnahmen	804
19.2.7	Spannungsrißkorrosion (SRK) und Schwingungsrißkorrosion (SWRK)	805
19.3	Brandschutz	805
19.3.1	Allgemeine Hinweise	805
19.3.2	Brandverlauf und Brandbelastung - DIN 18230	807
19.3.3	Verhalten ungeschützter und geschützter Bauteile und Systeme bei Brandeinwirkung	809
19.3.4	DIN 4102	812
19.3.5	Bauaufsichtliche Brandschutzforderungen	814
19.3.6	Maßnahmen des baulichen Brandschutzes	815
19.3.6.1	Schutzmaßnahmen (Übersicht)	815
19.3.6.2	Stahlverbundbauweise mit brandschutztechnischer Auslegung	817

20	STAHLHOCHBAU	821
20.1	Toleranz- und Modulordnung	821
20.1.1	Toleranzordnung im Maschinenbau	821
20.1.2	Toleranzordnung im Hochbau	822
20.1.3	Modulordnung	823
20.2	Bewegungsfugen	824
20.3	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	824
20.3.1	Allgemeines	824
20.3.2	Windbelastung	825
20.3.2.1	Orkanwind	825
20.3.2.2	Atmosphärische Grenzschicht	826
20.3.2.3	Berechnungswind - Lastannahmen	827
20.3.2.4	Staudruck und Druckverteilung	827
20.3.2.5	Aerodynamische Druck- und Kraftbeiwerte	829
20.3.2.6	Beispiel: Windlast auf ein turmartiges Bauwerk	831
20.3.2.7	Beispiel: Windlast auf Satteldächer	833
20.4	Tragwerke des Stahlhochbaues	834
20.4.1	Stabilisierung der Tragwerke	834
20.4.2	Grundformen des Hallenbaues	833
20.4.3	Grundformen des Geschoßbaues	839
20.4.4	Stabilisierungskräfte infolge Tragwerksimperfectionen	840
20.4.4.1	Stabilisierung eines Stützenstranges	840
20.4.4.2	Stabilisierung des Druckgurtes eines Fachwerkbinders	841
20.5	Ausbau	842
20.6	Treppen	842
20.6.1	Allgemeine Entwurfs- und Berechnungshinweise	842
20.6.2	Berechnung gewendelter Einholmtreppen	844
21	KRANBAHNEN	847
21.1	Kranhallen	847
21.1.1	Hallen für leichten Kranbetrieb	847
21.1.2	Hallen für schweren Kranbetrieb	848
21.2	Brückenkran	852
21.3	Kranschienen	853
21.4	Kranbahnträger - Konstruktive Gestaltung	857
21.4.1	Kranbahnträger für leichten Betrieb	857
21.4.2	Kranbahnträger für schweren Betrieb	859
21.4.3	Auflagerung von Kranbahnträgern	860
21.5	Berechnungsgrundlagen für Kranbahnträger	861
21.5.1	Lotrechte Lasten	861
21.5.2	Waagerechte Lasten	862
21.5.2.1	Kraftschluß-Schlupf-Funktion	862
21.5.2.2	Zur Herkunft der waagerechten Kräfte	863
21.5.2.3	Massenkräfte aus Kranfahren	863
21.5.2.4	Führungskräfte aus Schrägläuf	866
21.5.2.4.1	Berechnungsanweisung	866
21.5.2.4.2	Einführung in die Spurführungsmechanik	869
21.5.2.4.3	Beispiel	872
21.5.3	Betriebsfestigkeitsnachweis	873
21.5.3.1	Nachweisform	873
21.5.3.2	Betriebsfestigkeitsnachweis	875
21.5.3.2.1	Rückblick	875
21.5.3.2.2	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises nach DIN 15018/DIN 4132	875
21.5.3.3	Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 4132	877
21.5.4	Spezielle Berechnungsverfahren	879
21.5.4.1	Auswertung von Einflußlinien	879
21.5.4.2	Einfeldkranbahnen	880
21.5.4.3	Zwei- und Mehrfeldkranbahnen	884
21.5.4.4	Durchbiegungsberechnung	885
21.5.4.5	Beanspruchung der Kranbahnträger-Obergurte und -Stegbleche infolge örtlichen Raddrucks	889
21.5.4.5.1	Spannungen aus der Radlasteinleitung	890
21.5.4.5.2	Radlastverteilungsbiegung des Obergurtes	891
21.5.4.5.3	Torsionsbeanspruchung des Obergurtes und Querbiegung des angrenzenden Stegbleches infolge exzentrischer Radlaststellung	892
21.5.4.5.4	Beulsicherheitsnachweis des Stegbleches unter Radlasten	893
21.5.4.5.5	Beispiele	894
21.5.4.6	Pufferkräfte	900
21.5.4.6.1	Harte Auffahrt	900
21.5.4.6.2	Auffahrt auf Puffer	900
21.5.4.7	Trägerflanschbiegung bei Unterflanschlaufkatzen	903
21.5.4.7.1	Allgemeines	903
21.5.4.7.2	Berechnungsansätze	904
21.5.4.7.3	Beispiele	906
22	BEHÄLTERBAU	909
22.1	Einführung	909
22.2	Lager- und Fördergüter	911
22.3	Behälter - Tanke (Beispiele)	915

22.3.1	Wasserbehälter - Wassertürme	915
22.3.2	Abwasserbehälter	916
22.3.3	Oberirdische zylindrische Tankbauwerke (DIN 4119) - Tropfenbehälter	916
22.3.4	Niederdruckgasbehälter (DIN 3397)	917
22.3.5	Kugelgasbehälter	918
22.4	Silos	919
22.5	Dampfkessel- und Reaktoranlagen	920
22.6	Rohrleitungsbau	921
22.7	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	924
22.7.1	Allgemeine Hinweise	924
22.7.2	Anmerkungen zur Behälterschalentheorie	925
22.8	Ergänzende Hinweise zur Ausführung	930
23	STAHLSCORNSTEINE	931
23.1	Allgemeine Hinweise zur konstruktiven Auslegung	931
23.1.1	Tragrohr und Rauchrohr	931
23.1.2	Immissions- und rauchgastechnische Auslegung	932
23.1.3	Korrosionsschutz	933
23.1.4	Ergänzende Hinweise	934
23.2	Statische Auslegung	934
23.2.1	Allgemeines	934
23.2.2	Windlastannahmen	935
23.2.3	Aerodynamische Beiwerte	935
23.2.4	Verformungseinfluß Theorie II. Ordnung	937
23.2.5	Nachweis des Mantelrohres	941
23.2.5.1	Nennspannungsnachweis	941
23.2.5.2	Zylindrisch-konische Übergangsbereiche	941
23.2.5.3	Fuchs- und Einstiegöffnungen	942
23.2.5.4	Zum Beulnachweis des Mantelrohres	944
23.2.6	Ringsteifen - Einflußlinien	945
23.2.7	Mantel- und Ringsteifenbeanspruchung infolge örtlichen Winddrucks	946
23.2.8	Beispiele und Ergänzungen	951
23.2.9	Montagestöße	952
23.2.9.1	Laschenstöße - Flanschstöße	952
23.2.9.2	Beispiel: Montagestoß	954
23.2.10	Schornstein-Verankerung	956
23.2.10.1	Konstruktionsformen	956
23.2.10.2	Ankerkräfte	957
23.2.10.3	Nicht vorgespannte Verankerung	958
23.2.10.3.1	Allgemeine Hinweise	958
23.2.10.3.2	Berechnungsformeln	959
23.2.10.3.3	Beispiel	962
23.2.10.4	Vorgespannte Verankerung	963
23.2.10.4.1	Berechnungsmodell	963
23.2.10.4.2	Beispiel	964
23.3	Dynamische Auslegung	966
23.3.1	Vorbemerkungen	966
23.3.2	Hinweise zur Frequenzberechnung	967
23.3.3	Böeninduzierte Schwingungen	970
23.3.3.1	Windböigkeit	971
23.3.3.2	Modell nach RAUSCH	971
23.3.3.3	Modell nach SCHLAICH	971
23.3.3.4	Modell nach PETERSEN	972
23.3.3.5	Modell nach DAVENPORT	972
23.3.4	Wirbelinduzierte Schwingungen	974
23.3.4.1	Strömungsphänomen	974
23.3.4.2	Querschwingungsnachweis - Näherungsverfahren	976
23.3.4.3	Querschwingungsnachweis - Strenge Verfahren	976
23.3.4.4	Beispiele	977
23.3.4.5	Zum Problem der Selbststeuerung der Wirbelstraße	981
23.3.4.6	Querschwingungsnachweis nach RUSCHEWEYH	982
23.3.4.7	Ergänzende Hinweise zum Querschwingungsnachweis	984
23.3.4.8	Aerodynamische Störmaßnahmen	986
23.3.4.9	Schwingungsdämpfer	986
23.3.4.9.1	Allgemeine Hinweise	986
23.3.4.9.2	Kinetisch äquivalentes Ersatzsystem	989
23.3.4.9.3	Stationäre Bewegung eines Systems mit viskosem Schwingungs- dämpfer	990
23.3.4.9.4	Optimierungskriterium nach DEN HARTOG	992
23.3.4.9.5	Parametervariation	992
24	TÜRME UND MASTE	
24.1	Einsatzgebiete der Türme und Maste - Begriffe	995
24.1.1	Allgemeines	995
24.1.2	Turmartige Bauwerke für funktechnische Zwecke (Antennenträger)	998
24.1.3	Turmartige Bauwerke für andere als funktechnische Zwecke	999
24.2	Lastannahmen für Antennentragwerke	1004
24.2.1	Allgemeine Hinweise	1004
24.2.2	Ungleichförmigkeit des Staudruckes	1004

- XVIII -

24.2.3	Aerodynamischer Beiwert für Fachwerktürme und -maste	1005
24.2.4	Aerodynamischer Beiwert für Einbauten und Antennenausrüstungen	1007
24.2.5	Aerodynamischer Beiwert für Antennen	1008
24.2.6	Windbelastung bei Montagezuständen	1009
24.2.7	Lastannahmen bei Vereisung	1010
24.3	Turm- und Mastausfachung	1011
24.4	Statische Berechnung der Türme und Maste	1012
24.4.1	Allgemeine Berechnungshinweise	1012
24.4.2	Zur Frage der kinematischen Stabilität der Turmfachwerke	1016
24.4.3	Ergänzende Hinweise	1018
24.5	Berechnung abgespannter Maste	1018
24.5.1	Vorbemerkungen	1018
24.5.2	Unmittelbare Belastung der Seile	1021
24.5.3	Seilgleichung	1022
24.5.4	Federcharakteristik des dreiseiligen Abspannbündels	1023
24.5.5	Hinweise zur Mastberechnung	1026
24.5.6	Federcharakteristik von Abspannungen geringer Höhe	1027
24.6	Dynamische Auslegung	1030
24.6.1	Vorbemerkungen	1030
24.6.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung einfacher Mast- und Turmstrukturen	1030
24.6.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen abgespannter Maste	1034
24.6.4	Böenreaktionsfaktor bei abgespannten Masten	1036
24.7	Zur konstruktiven Ausbildung	1039
24.8	Blitzschutz	1039
25	BROCKENBAU	1043
25.1	Vorbemerkungen	1043
25.2	Eisenbahnbrücken	1043
25.2.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1045
25.2.2	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	1048
25.2.3	Lastbild UIC71	1051
25.2.4	Mitwirkender Gurtquerschnitt	1053
25.2.4.1	Berechnungsansätze	1053
25.2.4.2	Beispiel	1056
25.2.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	1059
25.2.5.1	Nachweisform (DS804)	1059
25.2.5.2	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises	1061
25.2.5.2.1	Rückblick	1061
25.2.5.2.2	Betriebsfestigkeitsnachweis der DS804	1063
25.2.6	Entwicklung des Eisenbahnbrückenbaues in den zurückliegenden Jahrzehnten	1070
25.2.6.1	Vorbemerkungen	1070
25.2.6.2	Fahrbahn	1070
25.2.6.3	Vollwandbrücken	1073
25.2.6.4	Fachwerkbrücken	1074
25.2.7	Neuzeitlicher Eisenbahnbrückenbau	1077
25.3	Straßenbrücken	1086
25.3.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1086
25.3.2	Belastungs- und Berechnungsgrundlagen	1088
25.3.3	Fahrbahn und Fahrbahnbelag	1091
25.3.4	Deckbrücken in Vollwandbauweise	1093
25.3.5	Großbrückenbau	1096
25.4	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken)	1101
25.4.1	Allgemeine Entwurfshinweise	1101
25.4.2	Tragsicherheitsnachweis	1103
25.4.3	Schwingungsnachweis	1107
25.5	Ausgewählte Kapitel aus dem Brückenbau	1107
25.5.1	Allgemeine Hinweise zum Tragsicherheitsnachweis	1107
25.5.2	Verfahren der Übertragungsmatrizen	1108
25.5.2.1	Vorbemerkungen	1108
25.5.2.2	Der gerade Stab unter Zug/Druck- und Biegebeanspruchung	1108
25.5.2.2.1	Definition der Verformungs- und Schnittgrößen	1108
25.5.2.2.2	Elastizitätsgesetz für die Verschiebung u in Stablängsrichtung	1109
25.5.2.2.3	Elastizitätsgesetz für die Durchbiegung w in Stabquerrichtung	1109
25.5.2.2.4	Gleichgewichtsgleichungen	1110
25.5.2.2.5	Grundgleichungen (Th.I.Ordnung) für u und w	1110
25.5.2.2.6	Temperatureinwirkung	1110
25.5.2.2.7	Senk- und drehfederelastische Bettung	1111
25.5.2.2.8	Massenkräfte (Balkenschwingungen)	1111
25.5.2.2.9	Anmerkungen zur Lösung der Grundgleichungen	1111
25.5.2.2.10	Übertragungsmatrix für den zug- und drucksteifen Stab	1112
25.5.2.2.11	Übertragungsmatrix für den biegesteifen Stab	1113
25.5.2.2.12	Übertragungsmatrix für den biegesteifen Stab auf elastischer Bettung	1114
25.5.2.3	Der gerade Stab unter Torsion (Primärtorsion)	1114
25.5.2.3.1	Grundgleichung und Lösungssystem	1114
25.5.2.3.2	Erweiterung auf drehelastische Bettung	1114
25.5.2.4	Der im Grundriß kreisförmig gekrümmte Stab	1115
25.5.2.4.1	Gekoppelte Formänderungsbeziehungen	1115
25.5.2.4.2	Gleichgewichtsgleichungen	1116
25.5.2.4.3	Grundgleichung	1116
25.5.2.5	Hinweise zur Ableitung der Übertragungsmatrizen und zur Berechnungsmethodik	1117

25.5.2.6	Ergänzende Hinweise	1123
25.5.3	Mitwirkende Breite - Mitwirkender Gurtquerschnitt	1124
25.5.3.1	Vorbemerkungen	1124
25.5.3.2	Einführung in die elasto-statische Theorie der mitwirkenden Breite	1124
25.5.3.3	Beispiel	1126
25.5.4	Orthotrope Fahrbahnplatten	1128
25.5.4.1	Einleitung	1128
25.5.4.2	Grundzüge der Theorie der orthotropen Fahrbahnplatte	1129
25.5.4.3	Berechnung orthotroper Fahrbahnplatten nach PELIKAN/ESSLINGER	1132
25.5.4.3.1	Berechnungsprinzip	1132
25.5.4.3.2	Orthotrope Platte mit geschlossenen Rippen	1136
25.5.4.3.3	Ergänzungen	1136
25.5.5	Scheinbarer Elastizitätsmodul von Schrägseilen	1136
25.5.5.1	Problemstellung	1136
25.5.5.2	Herleitung des scheinbaren Elastizitätsmoduls für das unter Eigen- gewicht stehende Schrägseil	1136
25.5.5.3	Wind- und Vereisungseinfluß	1139
25.5.6	Grundlagen der Hängebrückenberechnung	1139
25.5.6.1	Vorbemerkungen	1139
25.5.6.2	Berechnungstheorie	1140
25.5.6.3	Berechnungsbeispiel: Hängebrücke mittlerer Spannweite	1142
25.5.6.7	Ergänzende Hinweise	1144
25.5.7	Bogenbrücken	1145
25.5.8	Verbände	1146
25.5.9	Nebenspannungen in Fachwerkbrücken	1146
25.6	Brückenlager	1149
25.6.1	Vorbemerkungen	1149
25.6.2	Lageranordnung	1152
25.6.3	HERTZsche Pressung	1152
25.6.4	Lagerformen	1154
25.6.4.1	Stählerne Punktkipplager	1154
25.6.4.2	Stählerne Linienkipplager	1155
25.6.4.3	Stählerne Rollenlager	1155
25.6.4.4	Kunststoffe für Brückenlager	1157
25.6.4.4.1	PTFE (Polytetrafluoräthylen)	1157
25.6.4.4.2	Elastomer	1158
25.6.4.5	Topflager	1159
25.6.4.6	Kalottenlager	1159
25.6.4.7	Elastomer-Lager	1160
25.6.5	Lagerung der Lager	1160
25.6.6	Berechnungsbeispiele und Ergänzungen	1161
25.6.6.1	Berechnungsansätze	1161
25.6.6.2	Behelfe für die Berechnung von Kreisplatten	1161
25.6.6.3	Beispiel: Punktkipplager	1165
25.6.6.4	Ergänzungen zum Beispiel: Punktkipplager	1168
25.6.6.5	Pressungsverteilung in Zapfen und Dollen	1168
25.6.6.6	Abwälzkinematik	1169
25.6.6.7	Gleitkinematik der Kalottenlager	1170
25.6.7	Lagerplatten auf elastischem Halbraum	1170
25.7	Brückenschwingungen	1173
25.7.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen	1173
25.7.2	Brückenschwingungen unter rollendem Verkehr	1173
25.7.3	Brückenschwingungen infolge aeroelastischer Anregung	1173
25.7.3.1	Einleitung	1173
25.7.3.2	Galopping-Biegeschwingungen	1174
25.7.3.3	Flatterschwingungen	1177
25.7.3.3.1	Berechnung der kritischen Windgeschwindigkeit	1177
25.7.3.3.2	Beispiele	1179
26	ELASTO-STATISCHE BIEGETHEORIE, INSBESONDERE FÜR DÜNNWANDIGE STÄBE	1181
26.1	Vorbemerkungen	1181
26.2	Flächenmomente	1181
26.3	Stäbe mit dünnwandigem offenen Querschnitt	1181
26.3.1	Berechnung der Biege- und Schubspannungen ohne Kenntnis der Hauptachsen	1182
26.3.2	Berechnung der Biege- und Schubspannungen bei Kenntnis der Hauptachsen	1186
26.3.2.1	Rechnerische Ermittlung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1186
26.3.2.2	Zeichnerische Bestimmung der Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	1187
26.3.3	Schubmittelpunkt	1188
26.3.4	Beispiel	1189
26.4	Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt	1194
26.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1195
26.4.2	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1196
26.4.3	Beispiele	1197
26.4.3.1	Erstes Beispiel: Symmetrischer, gemischt offen-geschlossener Quer- schnitt	1197
26.4.3.2	Zweites Beispiel: Unsymmetrischer, gemischt offen-geschlossener Querschnitt	1202
26.5	Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung	1207
26.6	Zur numerischen Berechnung der Flächenmomente	1208

26.7	Vollwandige Träger veränderlicher Höhe	1219
26.8	Berücksichtigung der Schubverzerrung bei der Stabbiegung	1221
26.8.1	Schubsteifigkeit $S=GA_s$ - Schubkorrekturfaktor	1222
26.8.2	Trägerdurchbiegung infolge Querkraft	1224
26.8.3	Beispiele und Ergänzungen	1226
26.8.4	Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung einschließlich Schubverzerrung	1227
26.9	Stäbe mit starker Krümmung bei einachsiger Biegung und Normalkraft	1227
26.9.1	Biegespannungen	1227
26.9.2	Radialspannungen	1230
26.9.3	Formänderungen	1231
26.9.4	Beispiele und Ergänzungen	1231
26.9.5	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften I-Querschnitten	1234
26.9.6	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften Kastenquerschnitten	1236
26.9.7	Experimenteller Befund	1237
26.9.8	Hinweise zur praktischen Ausführung	1239
26.9.9	Rohrkrümmer	1239
26.10	Berechnung der Randspannungen mit Hilfe des Querschnittskerns	1240
26.10.1	Bestimmung des Querschnittskerns	1240
26.10.2	Beispiele und Ergänzungen	1241
26.10.3	Maßgebende Wirkungsrichtung bei umlaufender Belastung	1243
26.11	Berechnung der Spannungen bei versagender Zugzone	1244
26.11.1	Bestimmung der klaffenden Fuge	1244
26.11.2	Beispiele	1245
26.12	Zugbiegung Theorie II. Ordnung	1249
26.13	Nichtlineare Zugbiegung schlanker Stäbe mit größerem Durchhang	1252
26.13.1	Einführung	1252
26.13.2	Dehnsteife Hängestäbe	1252
26.13.3	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Näherungslösungen	1254
26.13.4	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für $p=\text{konst}$	1255
26.13.5	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für beliebige Belastung $p(x)$	1256
27	ELASTO-STATISCHE TORSIONSTHEORIE, INSBESONDERE FÜR DONNWANDIGE STÄBE	1261
27.1	Vorbemerkungen	1261
27.2	Torsion gerader Stäbe mit dickwandigem Querschnitt	1261
27.2.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (ST-VENANTSche Torsion)	1261
27.2.1.1	Torsionsmoment	1261
27.2.1.2	Gleichgewichtsgleichungen - Spannungsfunktion ϕ	1262
27.2.1.3	Formänderungsgleichungen	1263
27.2.1.3.1	Verdrillung (Verwindung), Verwölbung	1263
27.2.1.3.2	Kinematische Beziehungen zwischen Verzerrungen und Verformungen	1264
27.2.1.3.3	HOOKEsches Gesetz	1264
27.2.1.3.4	Elasto-statische Beziehungen zwischen Spannungen und Verformungen	1265
27.2.1.4	Grundgleichung für ϕ - Randbedingungen	1265
27.2.1.5	Torsionsträgheitsmoment I_T dickwandiger Querschnitte	1266
27.2.1.6	Anmerkungen zur Lösung der Grundgleichung	1269
27.2.1.7	Schubspannungslinien	1270
27.2.1.8	Seifenhautgleichnis	1270
27.2.1.9	Lösungen für verschiedene Querschnittsformen	1271
27.2.1.9.1	Elliptischer Voll- und Hohlquerschnitt	1271
27.2.1.9.2	Kreis- und Kreisringquerschnitt	1273
27.2.1.9.3	Querschnitt in Form eines gleichseitigen Dreiecks	1273
27.2.1.9.4	Rechteck- und Trapezquerschnitt	1275
27.2.1.9.5	Dünnwandige offene Querschnitte (Stahlbau-Profile)	1277
27.2.1.9.6	Dünnwandige einzellige Querschnitte	1278
27.2.1.9.7	Geschweißte und geschraubte Lamellenquerschnitte	1279
27.2.1.9.8	Vergitterte Querschnittswandungen	1279
27.2.1.9.9	Stahlverbundquerschnitte	1281
27.2.1.10	Beispiele und Ergänzungen	1281
27.2.1.11	Grundgleichung der ST-VENANTSchen Torsion und Lösungssystem	1286
27.2.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung	1289
27.3	Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, offenen Querschnitt	1290
27.3.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (Primärtorsion)	1290
27.3.1.1	Primäre Schubspannungen	1290
27.3.1.2	Verdrehung, Verdrillung (Verwindung) und Verwölbung - Einheitsverwölbung	1290
27.3.1.3	Transformation der Einheitsverwölbung bei Verlagerung der Drehachse	1292
27.3.1.4	Berechnungsbeispiel	1293
27.3.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung (Sekundärtorsion)	1295
27.3.2.1	Grundgleichung der Wölbkrafttorsion	1295
27.3.2.2	Lösungssystem - Rand- und Übergangsbedingungen	1297
27.3.2.3	Wölbkrafttorsion bei Stäben mit I-Querschnitt	1299
27.3.2.4	Schubmittelpunkt	1301
27.3.2.5	Beispiele	1302
27.3.2.5.1	Zusammengesetzter offener Querschnitt; Berechnung des Schubmittelpunktes	1302

27.3.2.5.2	Kragträger mit C-Querschnitt: Wölbspannungsberechnung	1306
27.3.2.6	Ergänzende Hinweise	1309
27.4	Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenen Querschnitt	1309
27.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt	1309
27.4.2	Beispiel: Einzelliger Kastenquerschnitt	1311
27.4.3	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt	1313
27.4.4	Stäbe mit gemischt offen-geschlossenem Querschnitt	1314
27.4.5	Beispiele und Ergänzungen	
27.4.5.1	Kreisrohrquerschnitt (dünn- und dickwandig)	1316
27.4.5.2	Unsymmetrischer, zweizelliger Querschnitt	1317
27.5	Gebundene Biegung - Gebundene Torsion	1320
27.6	Ergänzende Hinweise	1321
28	BRUCHTHEORIE	1323
28.1	Vorbemerkungen	1323
28.2	Ebener Spannungszustand	1324
28.2.1	Hauptspannungen	1324
28.2.2	Verzerrungen des ebenen Spannungszustandes	1327
28.2.3	Vergleichsspannungen bei statischer Beanspruchung	1328
28.2.4	Vergleichsspannungen bei dynamischer Beanspruchung	1330
28.3	Räumlicher Spannungszustand	1331
28.3.1	Formale Vereinbarungen	1331
28.3.2	Verschiebungstensor	1331
28.3.3	Verzerrungstensor	1332
28.3.4	Spannungstensor	1335
28.3.5	HOOKEsches Gesetz	1336
28.3.6	Kugeltensor und Deviator	1337
28.3.7	Festigkeitshypothese von HUBER-MISES-HENCKY für zähe Metalle	1338
28.3.7.1	Vorbemerkungen	1338
28.3.7.2	Invariantentheorie nach v.MISES	1339
28.3.7.3	Oktaederschubspannung	1339
28.3.7.4	Hypothese der konstanten Gestaltänderungsarbeit	1340
28.3.7.5	Ergänzungen	1341
28.3.8	Zahlenbeispiel	1342
28.4	Experimente zur Problematik des Streckgrenzenansatzes	1343
28.4.1	"Statische" Streckgrenze	1343
28.4.2	Elastisch-plastische Hysterese - BAUSCHINGER-Effekt	1346
28.4.3	Bruchbilder statischer Versuche	1347
28.5	Bruchmechanik (Einführung)	1348
28.5.1	Vorbemerkungen	1348
28.5.2	Rißöffnungsarten - Spannungsintensitätsfaktor K	1349
28.5.3	Rißtheorie bei statischer Beanspruchung	1350
28.5.3.1	GRIFFITH-Riß (1921)	1350
28.5.3.2	IRWIN-Riß (1952) - K-Konzept	1353
28.5.3.3	DUGDALE-Riß (1960) - COD-Konzept	1355
28.5.4	Spannungsrißkorrosion	1355
28.5.5	Rißtheorie bei dynamischer Beanspruchung	1356
Anhang		1359
Literaturverzeichnis		1367
Sachregister		1409