

Rolf Kindmann

Stahlbau

Teil 1: Grundlagen

- Fortführung eines Standardwerkes in 6. Auflage
- erweitert zu den Themen Stabilität und Trag-sicherheitsnachweise für Kranbahnträger
- mit zahlreichen Beispielen nach Eurocode 3
- für Studium und Praxis

Das Buch vermittelt das Grundwissen für die Bemessung im Stahlbau gemäß Eurocode 3 mit den Teilen 1-1 (Bauteile) und 1-8 (Verbindungen) und Grundkenntnisse für die Konstruktion von Stahlbauten. Mit ausführlichen Beispielen.



6., erweiterte Auflage · 2024 ·
700 Seiten · 470 Abbildungen ·
178 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03218-3 € 69*

eBundle (Print + ePDF)

ISBN 978-3-433-03218-3 € 89*

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3218

Vorwort zur 6. Auflage

Zentrale Themen des Buches sind die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Das vorliegende Buch ist als Lehrbuch für Studierende an Technischen Hochschulen, Universitäten und Fachhochschulen sowie für Ingenieure in der Baupraxis konzipiert. Im Vordergrund stehen das Verständnis für das Tragverhalten, der Zusammenhang mit den theoretischen Grundlagen und die Durchführung zweckmäßiger Nachweise. Besonderer Wert wird auf die Vermittlung von Methoden, Verfahren und Vorgehensweisen gelegt, die mit vielen Bildern und Berechnungsbeispielen veranschaulicht werden.

Der Inhalt des Buches ist wie folgt gegliedert:

- Allgemeines
- Bemessung und Konstruktion von Bauteilen
- Stabtheorie und Querschnittswerte
- Spannungsnachweise
- Plastische Querschnittstragfähigkeit
- Stabilitätsnachweise für Bauteile
- Theorie II. Ordnung mit Imperfektionen
- Bemessung und Konstruktion von Verbindungen
- Verbindungen mit Schrauben
- Verbindungen mit Schweißnähten
- Statische Berechnungen für Stahlbauten
- Tragfähigkeit und Stabilität – Nachweisverfahren (neues Kapitel)
- Tragfähigkeit und Stabilität – Verständnis (neues Kapitel)
- Tragfähigkeitsnachweise für Kranbahnträger (neues Kapitel)

Das Buch enthält zahlreiche Berechnungsbeispiele mit Nachweisen nach DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-8, die die Anwendung der Bemessungs- und Konstruktionsregeln sowie die Durchführung der Tragfähigkeitsnachweise in allen Einzelheiten zeigen.

Die letzte Auflage aus dem Jahre 2013 wurde vollständig überarbeitet und dem Stand der Technik entsprechend aktualisiert. Dies betrifft sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die sachgerechte Bemessung von Tragwerken und Bauteilen. Darüber hinaus wurde der Umfang des Buches mit fast 180 Seiten beträchtlich erweitert. Die Erweiterungen betreffen im Wesentlichen Folgendes:

- Die Ausführungen zur plastischen Querschnittstragfähigkeit in Kapitel 5 wurden aufgrund neuer Erkenntnisse aktualisiert und erheblich erweitert. Dies betrifft insbesondere die Verwendung linearer Interaktionsbeziehungen und die Nachweisbedingungen für gewalzte und geschweißte I-Querschnitte. Die Abschnitte zu den kreisförmigen und den eckigen Hohlprofilen wurden im Hinblick auf Nachweise für beliebige Schnittgrößenkombinationen beträchtlich ergänzt.

- Im neuen Kapitel 12 „Tragfähigkeit und Stabilität – Nachweisverfahren“ werden das Ersatzstabverfahren (Kapitel 6) und das Ersatzimperfectionsverfahren (Kapitel 7) mit Berechnungen nach der Fließzonentheorie und mit einem vom Verfasser neuentwickelten Verfahren SIGMA+ verglichen. Damit wird gezeigt, dass sich teilweise erhebliche Unterschiede bezüglich der Tragfähigkeit und im Hinblick auf den Arbeitsaufwand ergeben.
- Da die klassischen Nachweisverfahren zur Stabilität Black-Box-Verfahren sind, die schematisch angewendet werden müssen, wird in Kapitel 13 im Hinblick auf das Verständnis ausführlich erläutert, welche Auswirkungen Biegeknicken und Biegedrillknicken auf die Tragfähigkeit haben. Im Vordergrund stehen dabei Nachweise mit dem ingenieurmäßig anschaulichen Verfahren SIGMA+ und mit rechnerisch genauen Berechnungen nach der Fließzonentheorie. Die Berechnungsbeispiele in Kapitel 13 zeigen, dass einige Nachweisverfahren für gewisse baustatische Systeme nur bedingt geeignet sind.
- In Kapitel 14 wird die Tragfähigkeit von Kranbahnträgern bei Berücksichtigung des Biegedrillknickens ausführlich behandelt. Die in den Normen enthaltenen Verfahren werden gesichtet und bezüglich Aufwand und Genauigkeit beurteilt. Da im Hinblick auf die unterschiedlichen Anwendungsbereiche Defizite bestehen, wird das neu entwickelte Verfahren SIGMA+ für baupraktische Anwendungen empfohlen. Als Alternativen dazu werden modifizierte Ersatzstabverfahren und Ersatzimperfectionsverfahren vorgeschlagen. Kapitel 14 enthält ausführliche Berechnungsbeispiele.

Auf www.kindmann.de stehen Computerprogramme sowie ein Lehrbuch [21] zum kostenlosen Download zur Verfügung, s. Abschnitte 1.5 und 1.6. Die im Buch enthaltenen Berechnungsbeispiele sind in einem Verzeichnis auf den Seiten XVII bis XIX zusammengestellt.

Autor

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Rolf Kindmann

studierte Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum. Von 1974 bis 1989 war er für sechs Jahre als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Ruhr-Universität Bochum und für zehn Jahre in verschiedenen Positionen bei Thyssen Engineering tätig, zuletzt als Prokurist und Hauptabteilungsleiter der technischen Büros. 1990 wurde er zum Ordinarius des Lehrstuhls für Stahl- und Verbundbau an der Ruhr-Universität Bochum ernannt und 1991 gründete er die Ingenieursozietät Schürmann – Kindmann und Partner in Dortmund, in der er als Beratender Ingenieur, Prüflingenieur für Baustatik (Fachrichtungen Metall- und Massivbau) sowie als Gutachter wirkte.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		V
Autor		VII
Verzeichnis der Berechnungsbeispiele		XVII
1	Allgemeines	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Buchinhalt (Übersicht)	8
1.3	Technische Baubestimmungen	10
1.4	Bezeichnungen und Annahmen	12
1.5	Downloads	15
1.6	Computerprogramme	16
2	Bemessung und Konstruktion von Bauteilen	17
2.1	Vorbemerkungen	17
2.2	Werkstoff Stahl	17
2.3	Stahlerzeugnisse	22
2.3.1	Einteilung	22
2.3.2	Langerzeugnisse	22
2.3.3	Flacherzeugnisse	27
2.4	Teilsicherheitsbeiwerte	28
2.5	Querschnittsklassen	29
2.6	Tragfähigkeitsnachweise	34
2.7	Querschnittswerte	45
2.7.1	Grundsätzliches	45
2.7.2	Doppelt-symmetrische Querschnitte	46
2.7.3	Einfach-symmetrische Querschnitte	49
2.7.4	Querschnitte ohne Symmetrieachsen	53
2.7.5	Zusätzliche Querschnittswerte für Stabilitätsuntersuchungen	56
2.8	Spannungsermittlung und Nachweise	58
2.8.1	Vorbemerkungen	58
2.8.2	Walzprofil IPE 240	58
2.8.3	Walzprofil HEM 600	60
2.8.4	Rechteckiges Hohlprofil	64
2.8.5	Hohlkastenträger	66
2.8.6	Winkelprofil als Träger	67
2.8.7	H-Bahn-Träger	70

2.8.8	Fußgängerbrücke	76
2.8.9	Profil UPE 180	82
2.9	Plastische Querschnittstragfähigkeit	83
2.9.1	Vorbemerkungen	83
2.9.2	Einfeldriger Deckenträger	84
2.9.3	Zweifeldträger	84
2.9.4	HEA 300 mit Standardbeanspruchungen	88
2.9.5	I-Querschnitt mit ungewöhnlichen Beanspruchungen	91
2.9.6	Rechteckiges Hohlprofil	93
2.9.7	Kastenquerschnitt	96
2.9.8	Kreisförmiges Hohlprofil	97
2.10	Stabilität und Theorie II. Ordnung	99
2.10.1	Vorbemerkungen	99
2.10.2	Einfeldträger IPE 330	99
2.10.3	Zweifeldträger IPE 400	100
2.10.4	Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und Biegebeanspruchung	103
2.10.5	Eingespannte Rohrstütze	105
2.10.6	Stütze HEA 140 mit planmäßiger Biegung	108
2.10.7	Stütze IPE 300 und Erfassung von drei Stabilitätsfällen	110
2.10.8	Zweifeldrige Giebelwandeckstütze	112
2.10.9	Einfeldträger IPE 450 mit Kragarm	117
2.10.10	Verschiebliche ebene Rahmen	120
2.10.11	Fachwerkträger	126
3	Stabtheorie und Querschnittswerte	133
3.1	Vorbemerkungen	133
3.2	Stabtheorie	133
3.2.1	Grundsätzliches	133
3.2.2	Lineare Stabtheorie (Theorie I. Ordnung)	139
3.3	Schwerpunkt, Hauptachsen und Hauptträgheitsmomente	142
3.3.1	Querschnittsnormierung Teil I	142
3.3.2	Aufteilung der Querschnitte in Teilflächen	150
3.3.3	Basisquerschnitte und elementare Querschnittsformen	152
3.4	Schubmittelpunkt und weitere Querschnittswerte	157
3.4.1	Querschnittsnormierung Teil II	157
3.4.2	Ermittlung des Schubmittelpunktes mit der Wölbordinate	163
3.4.3	Ermittlung des Schubmittelpunktes mit Schubspannungen	166
3.4.4	Berechnung von I_{ω} , I_T und $\max \tau$	171
4	Spannungsnachweise	175
4.1	Anwendungsbereiche	175
4.2	Nachweise	175
4.3	Spannungsermittlung	177

4.3.1	Vorbemerkungen	177
4.3.2	Schnittgrößen als Resultierende der Spannungen	177
4.3.3	Erläuterungen zum Wölbmoment	179
4.3.4	Berechnung von Spannungen	181
4.3.4.1	Normalspannungen σ_x infolge N , M_y , M_z und M_ω	181
4.3.4.2	Schubspannungen τ infolge V_y , V_z , M_{xp} und M_{xs}	183
4.3.4.3	Doppelt-symmetrische I-Querschnitte	184
4.3.4.4	Rechteckige Hohlprofile	188
4.3.4.5	U-Profile	189
4.3.4.6	Kreisförmige Hohlprofile	190
4.3.4.7	Rechteckige Vollquerschnitte	191
5	Plastische Querschnittstragfähigkeit	193
5.1	Einführung – Rechteckquerschnitt	193
5.1.1	Tragfähigkeitsreserven	193
5.1.2	Grenzschnittgrößen N_{pl} , M_{pl} und V_{pl}	194
5.1.3	Gemeinsame Wirkung von N und M	194
5.1.4	Gemeinsame Wirkung von N , M und V	196
5.2	Anwendungshinweise	197
5.2.1	Grundlagen	197
5.2.2	Schubbeanspruchte Querschnitte	199
5.2.3	Formeln in DIN EN 1993-1-1	202
5.2.4	Teilschnittgrößenverfahren TSV und TSV-plus	203
5.2.5	Computer-Programme	203
5.2.6	Nachweismethoden	204
5.3	Lineare Interaktionsbeziehungen	205
5.4	Doppelt-symmetrische I-Querschnitte	207
5.4.1	Übersicht	207
5.4.2	Plastische Grenzschnittgrößen	207
5.4.3	Schnittgrößen N , M_y und V_z	209
5.4.4	Schnittgrößen N , M_z und V_y	214
5.4.5	Schnittgrößen N , M_y und M_z	217
5.5	I-Querschnitte mit beliebigen Schnittgrößen	221
5.5.1	TSV für alle Stabschnittgrößen	221
5.5.2	Schnittgrößen V_y , V_z , M_{xp} und M_{xs}	222
5.5.3	Schnittgrößen N , M_y , M_z und M_ω	224
5.6	Kreisförmige Hohlprofile	228
5.6.1	Allgemeines	228
5.6.2	Plastische Grenzschnittgrößen	229
5.6.3	Schnittgrößen M_x und V	230
5.6.4	Schnittgrößen N und M	231
5.6.5	Beliebige Kombination aller Schnittgrößen	232
5.6.6	Kriterium nach DIN EN 1993-1-1	233
5.7	Quadratische und rechteckige Hohlprofile	233

5.7.1	Allgemeines	233
5.7.2	Plastische Grenzschnittgrößen	235
5.7.3	Ersatz durch Vierblechquerschnitte	237
5.7.4	Schnittgrößen V_y , V_z und M_x	238
5.7.5	Schnittgrößen N , M_y und M_z	239
5.7.6	Beliebige Kombination aller Schnittgrößen	243
5.7.7	Kriterien nach DIN EN 1993-1-1	244
5.8	Drei- und Zweiblechquerschnitte (TSV)	245
6	Stabilitätsnachweise für Bauteile	248
6.1	Übersicht	248
6.2	Druckstäbe	250
6.3	Ideale Verzweigungslasten N_{cr}	257
6.3.1	Grundlagen	257
6.3.2	Eulerfälle I bis IV	259
6.3.3	Knickbiegelinien und Knicklängen	262
6.3.4	Hinweise zur Berechnung von N_{cr}	265
6.3.5	Ersatz von Tragwerksteilen durch Federn	270
6.3.6	Druckstäbe mit Federn an den Enden	273
6.4	Biegebeanspruchte Stäbe	276
6.4.1	Nachweise	276
6.4.2	Bemessungshilfen (Diagramme und Tabellen)	283
6.5	Ideale Biegedrillknickmomente $M_{cr,y}$	290
6.5.1	Stabilitätsproblem Biegedrillknicken	290
6.5.2	Berechnung von $M_{cr,y}$	292
6.5.3	Aufteilung in Teilsysteme	294
6.5.4	Träger mit Randmomenten	296
6.5.5	Kragträger	301
6.5.6	Träger mit einfach-symmetrischen I-Querschnitten	303
6.6	Biege- und druckbeanspruchte Bauteile	304
6.7	Allgemeines Nachweisverfahren für Bauteile	311
7	Theorie II. Ordnung mit Imperfektionen	315
7.1	Grundsätzliches	315
7.2	Nachweisführung	317
7.3	Imperfektionen	317
7.3.1	Grundlagen	317
7.3.2	Ersatzimperfektionen für die Tragwerksberechnung	318
7.3.3	Bauteilimperfektionen	320
7.3.4	Imperfektionen zur Berechnung aussteifender Systeme	321
7.4	Schnittgrößenermittlung zum Biegeknicken	322
7.4.1	Erläuterungen zum Verständnis	322
7.4.2	Berechnungsformeln	325

7.4.3	Vergrößerungsfaktoren	332
7.4.4	Weggrößenverfahren	345
7.5	Nachweise zum Biegedrillknicken	351
7.5.1	Allgemeines	351
7.5.2	Walzprofilträger	351
7.5.3	Träger mit einfach-symmetrischem I-Querschnitt	354
8	Bemessung und Konstruktion von Verbindungen	357
8.1	Übersicht	357
8.2	Grundsätzliches	357
8.3	Verbindungen mit scherbeanspruchten Schrauben	364
8.3.1	Nachweise und Bemessungshilfen	364
8.3.2	Ermittlung der Schraubenkräfte	366
8.3.3	Flachblechstoß zur Übertragung von N	370
8.3.4	Walzprofilstoß zur Übertragung von N	371
8.3.5	Trägerstoß für M, V und N	373
8.3.6	Gelenkiger Trägeranschluss mit Winkeln	376
8.4	Verbindungen mit zugbeanspruchten Schrauben	379
8.4.1	Übersicht	379
8.4.2	Kraftübertragung bei Trägerstößen	379
8.4.3	Vereinfachte Berechnungsmodelle für Trägerstöße	381
8.4.4	Äquivalenter T-Stummel nach DIN EN 1993-1-8	384
8.4.5	Trägerstoß mit überstehenden Stirnplatten	391
8.4.6	Trägerstoß mit bündigen Stirnplatten	393
8.4.7	Geschraubte Rahmenecke mit Stirnplatte	394
8.5	Verbindungen mit Schweißnähten	395
8.5.1	Übersicht	395
8.5.2	Bemessungshilfen für Kehlnähte	395
8.5.3	Rechnerische Schweißnahtspannungen	396
8.5.4	Halsnähte eines I-Querschnitts	399
8.5.5	Halsnähte eines Kastenquerschnitts	400
8.5.6	Trägerstoß mit Stirnplatte	401
9	Verbindungen mit Schrauben	402
9.1	Einleitung	402
9.2	Orientierungshilfen	402
9.3	Darstellung auf Zeichnungen	404
9.4	Kategorien nach DIN EN 1993-1-8	405
9.5	Löcher für Schrauben – Lochdurchmesser	407
9.6	Kraftübertragung und Tragverhalten	408
9.6.1	Vorbemerkungen	408
9.6.2	Kategorie A: Scher-/Lochleibungsverbindungen	408
9.6.3	Kategorien B und C: Kraftübertragung durch Reibung	413

9.6.4	Kategorien D und E: Zugbeanspruchung der Schrauben	413
9.6.5	Kombinierte Zug- und Abscherbeanspruchung	415
9.7	Bemessung nach DIN EN 1993-1-8	417
9.7.1	Vorbemerkungen	417
9.7.2	Werkstoffkennwerte	418
9.7.3	Rand- und Lochabstände	419
9.7.4	Beanspruchbarkeit von Schrauben	421
9.7.5	Hochfeste Schrauben in gleitfesten Verbindungen	425
9.7.6	Lange Schraubenverbindungen	426
9.7.7	Einschnittige Überlappungsstöße mit einer Schraube	426
9.7.8	Einschenkligter Anschluss von Winkelprofilen	427
9.7.9	Querschnittsschwächung durch Schraubenlöcher	428
9.7.10	Anziehen und Vorspannen von geschraubten Verbindungen	430
9.8	Schrauben, Muttern und Scheiben	434
10	Verbindungen mit Schweißnähten	439
10.1	Einleitung	439
10.2	Nahtarten und Darstellung	439
10.3	Spannungen in Schweißnähten	441
10.4	Kehlnähte	443
10.5	Andere Nahtarten	451
11	Statische Berechnungen für Stahlbauten	455
11.1	Allgemeines	455
11.2	Statische Berechnungen	456
11.3	Zeichnungen	457
11.4	Werkstattgebäude mit Pultdach	459
11.4.1	Baubeschreibung	459
11.4.2	Einwirkungen	460
11.4.3	Schnittgrößenermittlung und Nachweisführung	462
11.4.4	Stahltrapezprofil (Pos. 1) auf Pfetten	464
11.4.5	Dachpfetten HEA 120, S235 (Pos. 2)	465
11.4.6	Bauteile in den Achsen 2 und 3	467
11.4.7	Dachträger HEA 220, S235 (Pos. 3)	469
11.4.8	Stützen HEA 140, S235, in der Rückwand (Pos. 5)	470
11.4.9	Eingespannte Stützen HEB 220, S235 (Pos. 8)	472
11.4.10	Bauteile in den Achsen 1 und 4	474
11.4.11	Ortgangträger HEA 180, S235 (Pos. 4)	475
11.4.12	Stützen HEA 140, S235, an den Enden der Rückwand (Pos. 7)	476
11.4.13	Eingespannte Stützen HEB 220 im Giebelwandbereich (Pos. 8)	476
11.4.14	Pendelstützen HEA 140, S235, in den Seitenwänden (Pos. 6)	476
11.4.15	Wandverband mit Diagonalen \varnothing 12 mm, S235 (Pos. 9)	477
11.4.16	Anschluss der Pfetten (Pos. 2) an die Dachträger (Pos. 3)	478

11.4.17	Anschluss der Dachträger an die Einspannstützen (Pos. 8)	479
11.4.18	Anschluss der Dachträger an die Rückwandstützen (Pos. 5)	481
11.4.19	Anschluss des Wandverbandes (Pos. 9) an die Stützen	481
11.4.20	Fußpunkt der Pendelstützen (Pos. 5)	482
11.4.21	Fußpunkt der Einspannstützen (Pos. 8)	484
11.5	Lagerhalle mit Zweigelenkrahmen	486
11.5.1	Konstruktionsbeschreibung	486
11.5.2	Einwirkungen nach DIN EN 1991	487
11.5.3	Zweigelenkrahmen in der Rahmenebene	488
11.5.4	Stabilität der Rahmenstiele	492
11.5.5	Stabilität der Rahmenriegel	494
11.5.6	Dachverbände	500
11.5.7	Wandverbände	504
11.5.8	Ortganträger HEA 120	505
11.5.9	Giebelwandstützen HEA 180	505
11.5.10	Firststoß der Zweigelenkrahmen	506
11.5.11	Rahmenecken der Zweigelenkrahmen	508
11.5.12	Fußpunkte der Zweigelenkrahmen	512
12	Tragfähigkeit und Stabilität – Nachweisverfahren	515
12.1	Alte, neue und modifizierte Nachweisverfahren	515
12.2	Vergleiche für ausgewählte Basissysteme	516
12.3	Nachweise mit Abminderungsfaktoren (ESV)	521
12.4	Ersatzimperfektionsverfahren (EIV)	523
12.5	Berechnungen nach der Fließzonen­theorie (FZT)	525
12.5.1	Übersicht	525
12.5.2	Berechnungsgrundlagen – Stand der Technik	525
12.5.3	Geometrische Imperfektionen	528
12.5.4	Eigenspannungen in Stahlkonstruktionen	528
12.5.4.1	Ursachen, Auswirkungen und Eigenschaften	528
12.5.4.2	Eigenspannungen in gewalzten I-Profilen	529
12.5.4.3	Eigenspannungen in geschweißten I-Profilen	531
12.5.4.4	Ergänzende Hinweise	533
12.5.5	Berechnungsbeispiel Kranbahnträger	533
12.6	Neues Nachweisverfahren SIGMA+	535
12.6.1	Grundlagen	535
12.6.2	Ermittlung der Spannungen	536
12.6.3	Bauteile ohne Fließzonen in Druckbereichen	537
12.6.4	Bauteile mit Fließzonen in Druckbereichen	540
12.6.5	Berechnungsbeispiel Druckstab (Stütze)	542
12.6.6	Hinweise zu den Berechnungen	544
12.6.7	Berechnungsbeispiele (Übersicht)	546
12.7	Stäbe aus gewalzten I-Profilen	547
12.8	Stäbe aus geschweißten I-Profilen	549

12.8.1	Berechnungsbeispiel Stütze	549
12.8.2	Berechnungsbeispiel Träger	553
12.8.3	Berechnungsbeispiel Träger mit ungleichen Gurten	559
12.9	Modifizierte Nachweisverfahren	564
12.9.1	Übersicht	564
12.9.2	Modifizierte Ersatzstabverfahren	565
12.9.3	Modifizierte Ersatzimperfectionsverfahren	566
13	Stabilitätsnachweise - Verständnis	567
13.1	Einleitung	567
13.2	Genaue Nachweisverfahren und Näherungsverfahren	569
13.3	Grundlegende Erkenntnisse für Basissysteme	571
13.4	Biegeknicken einer Stütze (Druckstab)	575
13.5	Biegedrillknicken eines Trägers	584
13.6	Biegedrillknicken eines Trägers mit Drucknormalkraft	594
13.7	Biegedrillknicken eines Zweifeldträgers	599
14	Tragfähigkeitsnachweise für Kranbahnträger	603
14.1	Einleitung	603
14.2	Nachweise zur Tragfähigkeit und Stabilität	604
14.2.1	Nachweisverfahren – Grundsätzliches	604
14.2.2	Nachweise nach DIN EN 1993-1-1	605
14.2.2.1	Ersatzstabverfahren (ESV)	605
14.2.2.2	Ersatzimperfectionsverfahren (EIV)	606
14.2.2.3	Fließzonentheorie (FZT)	606
14.2.3	Nachweise nach DIN EN 1993-6	607
14.2.3.1	Ersatzstabverfahren nach Anhang A der Norm	607
14.2.3.2	Biegeknicknachweis gedrückter Gurte	607
14.2.3.3	Andere Verfahren	609
14.2.3.4	Neue bzw. modifizierte Nachweisverfahren	610
14.3	Durchführung der Berechnungen	610
14.3.1	Vorbemerkungen	610
14.3.2	Einwirkungen, Schnittgrößen und Tragverhalten	610
14.3.3	Lastangriff der vertikalen Radlasten	613
14.3.4	Spannungsermittlung	614
14.3.5	Plastische Querschnittstragfähigkeit	615
14.3.6	Anordnung der Radlasten in Trägerlängsrichtung	616
14.3.7	Berechnungen nach der FZT	616
14.4	Berechnungsbeispiele	616
14.4.1	Vorbemerkungen	616
14.4.2	Ergebnisse und Erkenntnisse	617
14.4.3	Beispiel 1 – Einfeldträger HEA 400	620
14.4.4	Beispiel 2 – Zweifeldträger HEB 300	623

14.4.5	Beispiel 3 – Einfeldträger Dreiblechquerschnitt	625
14.4.6	Beispiel 4 – Einfeldträger Dreiblechquerschnitt	630
14.4.7	Beispiel 5 – Einfeldträger winkelverstärktes Walzprofil	631
14.4.8	Beispiel 6 – Zweifeldträger winkelverstärktes Walzprofil	633
14.5	Eigenspannungen in Kranbahnträgern	635
14.5.1	Walzprofile und geschweißte Dreiblechquerschnitte	635
14.5.2	Walzprofile mit angeschweißten Winkeln am Obergurt	637
14.5.3	Kranbahnträger mit angeschweißten Kranschienen	638
14.6	Nachweise nach der Fließzonentheorie (FZT)	640
14.6.1	Berechnungsgrundlagen	640
14.6.2	Berechnungsbeispiele	641
14.7	Neues Nachweisverfahren SIGMA+	644
14.8	Modifizierte Ersatzimperpektionsverfahren	648
14.8.1	Nachweisführung	648
14.8.2	Berechnungsbeispiel	650
14.9	Modifizierte Ersatzstabverfahren	652
14.9.1	Grundlagen	652
14.9.2	Nachweise mit plastischen Schnittgrößen	653
14.9.3	Berechnungsbeispiel mit plastischen Schnittgrößen	654
14.9.4	Nachweise mit Spannungen	655
14.9.5	Berechnungsbeispiel mit Spannungen	655
Anhang	Profiltabellen	659
Literaturverzeichnis		680
Stichwortverzeichnis		684

Verzeichnis der Berechnungsbeispiele

Abschnitt	Berechnungsbeispiele in Kapitel 2
	Bemessung und Konstruktion von Bauteilen
2.6	Vier Beispiele zu den Stabilitätsfällen bei Stäben, s. Tabelle 2.18
	Querschnittswerte
2.7.2	Geschweißter I-Querschnitt und vergleichbares Walzprofil
2.7.2	Kastenquerschnitt
2.7.3	Einfach-symmetrischer I-Querschnitt
2.7.3	Zusammengesetzter Querschnitt aus einem HEB 300 und einem UPE 200
2.7.3	Querschnitt aus vielen Einzelteilen – Fußgängerbrücke
2.7.4	Unsymmetrischer T-Querschnitt
2.7.4	Z-Querschnitt
2.7.5	Einfeldträger mit einfach-symmetrischem Querschnitt
	Spannungsermittlung und Nachweise
2.8.2	Walzprofil IPE 240
2.8.3	Walzprofil HEM 600
2.8.4	Rechteckiges Hohlprofil
2.8.5	Hohlkastenträger
2.8.6	Winkelprofil als Träger
2.8.7	H-Bahn-Träger
2.8.8	Fußgängerbrücke
2.8.9	Profil UPE 180
	Plastische Querschnittstragfähigkeit
2.9.2	Einfeldriger Deckenträger
2.9.3	Zweifeldträger
2.9.4	HEA 300 mit Standardbeanspruchungen
2.9.5	I-Querschnitt mit ungewöhnlichen Beanspruchungen
2.9.6	Rechteckiges Hohlprofil
2.9.7	Kastenquerschnitt
2.9.8	Kreisförmiges Hohlprofil
	Stabilität und Theorie II. Ordnung
2.10.2	Einfeldträger IPE 330
2.10.3	Zweifeldträger IPE 400
2.10.4	Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und Biegebeanspruchung
2.10.5	Eingespannte Rohrstütze
2.10.6	Stütze HEA 140 mit planmäßiger Biegung
2.10.7	Stütze IPE 300 und Erfassung von drei Stabilitätsfällen
2.10.8	Zweifeldrige Giebelwandeckstütze
2.10.9	Einfeldträger IPE 450 mit Kragarm
2.10.10.2	Zweigelenkrahmen
2.10.10.3	Einhüftiger Rahmen mit Pendelstütze
2.10.11	Fachwerkträger

Abschnitt	Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 3 und 5
	Stabtheorie und Querschnittswerte
3.2.2	Einführungsbeispiel Einfeldträger
3.2.2	Beispiel zur Aufteilung in vier Beanspruchungsfälle und Ergebnisse für die lineare Stabtheorie (finite Elemente)
3.3.1	Querschnitt für das Beispiel zur Anwendung der Methoden A und B
3.4.1	Wölbordinate für vier verschiedene Querschnitte
	Plastische Querschnittstragfähigkeit
5.4.3	Berechnungsbeispiel zur N- M_y -Interaktion
5.4.4	Berechnungsbeispiel zur N- M_z -Interaktion
5.4.5	Berechnungsbeispiel zur N- M_y - M_z -Interaktion
5.5.3	Walzprofil IPE 400, Schnittgrößen M_y , M_z und M_ω

Abschnitt	Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 6 und 7
	Stabilitätsnachweise für Bauteile
6.2	Biegeknicken einer Stütze
6.4.1	Biegedrillknicken eines Trägers
6.4.2	Bemessungshilfen (Diagramme und Tabellen)
6.5.4	Biegedrillknicken Dreifeldträger
6.6	Biegeknicken Druckstab mit Querbelastung
6.7	Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und Biegemomentenbeanspruchung
	Theorie II. Ordnung mit Imperfektionen
7.4.3	Baustatische Systeme für drei Beispiele zur Schnittgrößenermittlung mit Vergrößerungsfaktoren
7.4.4	Beispiel zur Anwendung des Weggrößenverfahrens
7.5	Nachweise zum Biegedrillknicken
7.5.2	Walzprofilträger
7.5.3	Träger mit einfach-symmetrischem I-Querschnitt

Abschnitt	Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 8, 10 und 11
	Geschraubte und geschweißte Verbindungen
8.3.3	Flachblechstoß zur Übertragung von N
8.3.4	Walzprofilstoß zur Übertragung von N
8.3.5	Trägerstoß für M, V und N
8.3.6	Gelenkiger Trägeranschluss mit Winkeln
8.4.5	Trägerstoß mit überstehenden Stirnplatten
8.4.6	Trägerstoß mit bündigen Stirnplatten
8.4.7	Geschraubte Rahmenecke mit Stirnplatte
8.5.4	Halsnähte eines I-Querschnitts
8.5.5	Halsnähte eines Kastenquerschnitts
8.5.6	Trägerstoß mit Stirnplatte
10.4	Zentrisch und exzentrisch beanspruchte Anschlüsse mit Doppelkehlnähten
	Statische Berechnungen für Stahlbauten
11.4	Werkstattgebäude mit Pultdach 21 Abschnitte mit Nachweisen für Bauteile und Verbindungen
11.5	Lagerhalle mit Zweigelenkrahmen 12 Abschnitte mit Nachweisen für Bauteile und Verbindungen

Abschnitt	Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 12, 13 und 14
	Tragfähigkeit und Stabilität – Nachweisverfahren
12.1	Drei Basisbeispiele für Vergleichsrechnungen zur Stabilität (Walzprofile)
12.2	Ergebnisse für die Basisbeispiele (Stütze, Träger und Träger mit N)
12.5.5	Berechnungsbeispiel Kranbahnträger (Fließzonentheorie)
12.6.5	Berechnungsbeispiel Druckstab (Stütze)
12.6.7	Berechnungsbeispiele mit Tragfähigkeitsvergleichen (Verfahren SIGMA+)
12.7	Verfahren SIGMA+ mit Fließzonen – Basisbeispiel Träger
12.8.1	Berechnungsbeispiel geschweißte Stütze
12.8.2	Berechnungsbeispiel geschweißter Träger
12.8.3	Berechnungsbeispiel geschweißter Träger mit ungleichen Gurten
	Tragfähigkeit und Stabilität – Verständnis
13.4	Biegeknicken einer Stütze (Druckstab HEA 200)
13.5	Biegedrillknicken eines Trägers (HEA 400)
13.6	Biegedrillknicken eines Trägers mit Drucknormalkraft (IPE 300)
13.7	Biegedrillknicken eines Zweifeldträgers (IPE 400)
	Tragfähigkeitsnachweise für Kranbahnträger
14.4.3	Kranbahnträger HEA 400 (Einfeldträger, L = 7 m)
14.4.4	Kranbahnträger HEB 300 (Zweifeldträger, L je 6 m)
14.4.5	Kranbahnträger mit Dreiblechquerschnitt (L = 10 m)
14.4.6	Kranbahnträger mit Dreiblechquerschnitt (L = 14 m)
14.4.7	Kranbahnträger HL 1100 B mit Winkeln 250×18 (Einfeldträger, L = 16 m)
14.4.8	Kranbahnträger IPE 600 mit Winkeln 100×10 (Zweifeldträger, L je 7 m)

2.5 Querschnittsklassen

Grundlagen

Mit der Klassifizierung von Querschnitten soll die Begrenzung der Beanspruchbarkeit und Rotationskapazität durch lokales Beulen von Querschnittsteilen festgestellt werden. Die Einstufung führt dazu, dass die Nachweise in einer für die jeweilige Querschnittsklasse geeigneten Vorgehensweise geführt werden.

Einstufung

Es werden vier Querschnittsklassen definiert:

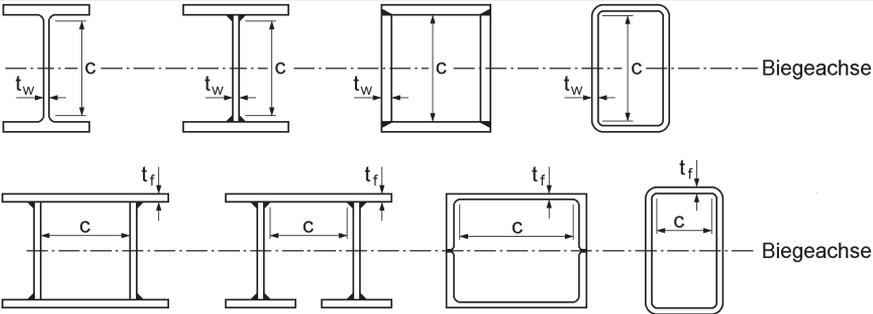
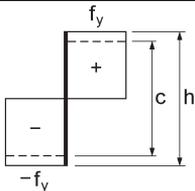
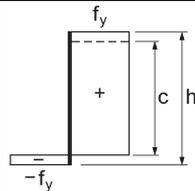
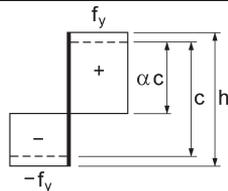
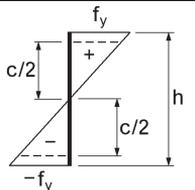
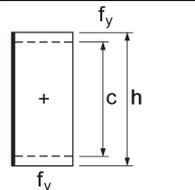
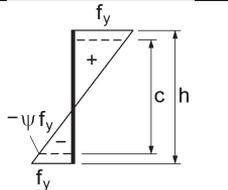
- Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke oder Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastische Berechnung ausbilden.
- Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber aufgrund örtlichen Beulens nur eine begrenzte Rotationskapazität.
- Querschnitte der Klasse 3 erreichen für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber wegen örtlichen Beulens die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln.
- Querschnitte der Klasse 4 sind solche, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auftritt.

Bei Querschnitten der Klasse 4 dürfen effektive Breiten verwendet werden, um die Abminderung der Beanspruchbarkeit infolge lokalen Beulens zu berücksichtigen. Die Klassifizierung eines Querschnitts ist vom c/t -Verhältnis seiner **druckbeanspruchten Teile** abhängig. Druckbeanspruchte Querschnittsteile können entweder vollständig oder teilweise unter der zu untersuchenden Einwirkungskombination Druckspannungen aufweisen.

Die verschiedenen druckbeanspruchten Querschnittsteile (wie z. B. Steg oder Flansch) können im Allgemeinen verschiedenen Querschnittsklassen zugeordnet werden. Ein Querschnitt wird, bis auf in DIN EN 1993-1-1 genannte Ausnahmen, durch die ungünstigste Klasse seiner druckbeanspruchten Querschnittsteile klassifiziert

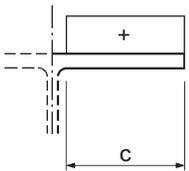
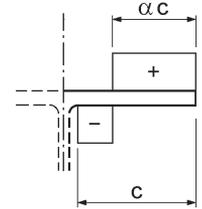
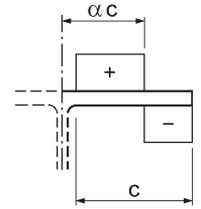
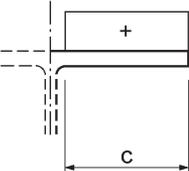
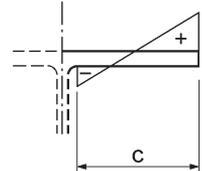
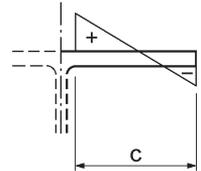
Die Grenzabmessungen druckbeanspruchter Querschnittsteile für die Klassen 1, 2 und 3 können den Tabellen 2.10 (**beidseitig** gestützte Querschnittsteile) und 2.11 (**einseitig** gestützte Querschnittsteile) entnommen werden. Querschnittsteile, die die Anforderungen der Querschnittsklasse 3 nicht erfüllen, sind in Querschnittsklasse 4 einzuordnen. Aus den **Profiltabellen im Anhang** kann die Zuordnung zu den Querschnittsklassen für Druckkräfte sowie Biegemomente unmittelbar abgelesen werden. Bei den Angaben für Walzprofile der Reihen IPE, HEAA, HEA, HEB und HEM (aus S235 oder S355) gilt die erste Zahl für Druckkräfte N und die zweite für Biegemomente M (M_y und/oder M_z). Beispiel: 3-1 bedeutet QK 3 für Druckkräfte und QK 1 für Biegemomente.

Tabelle 2.10 c/t -Verhältnisse für **beidseitig gestützte** druckbeanspruchte Querschnittsteile

						
	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
Klasse 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 33 \varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 396 \varepsilon / (13 \alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 36 \varepsilon / \alpha$			
Klasse 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 456 \varepsilon / (13 \alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 41,5 \varepsilon / \alpha$			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
Klasse 3	$c/t \leq 124 \varepsilon$	$c/t \leq 42 \varepsilon$	für $\psi > -1$: $c/t \leq 42 \varepsilon / (0,67 + 0,33 \psi)$ für $\psi \leq -1$ ^a : $c/t \leq 62 \varepsilon (1 - \psi) \sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y =$	235	275	355	420	460
	$\varepsilon =$	1	0,92	0,81	0,75	0,71

^a siehe DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2

Tabelle 2.11 c/t -Verhältnisse für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile		auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
		freier Rand im Druckbereich	freier Rand im Zugbereich	
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)				
Klasse 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq 9 \varepsilon / \alpha$	$c/t \leq 9 \varepsilon / (\alpha \sqrt{\alpha})$	
Klasse 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq 10 \varepsilon / \alpha$	$c/t \leq 10 \varepsilon / (\alpha \sqrt{\alpha})$	
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)				
Klasse 3	$c/t \leq 14 \varepsilon$	$c/t \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ Für k_σ siehe DIN EN 1993-1-5.		

Die vorhandenen c/t -Verhältnisse von Walzprofilen können mithilfe von Tabelle 2.12 oder Bild 2.2 bestimmt werden. Für auf reine Biegung **oder** Druck beanspruchte Querschnittsteile ist es zweckmäßig, die Tabellen 2.13 oder 2.14 zu verwenden. Tabelle 2.13 ist ein Extrakt aus den Tabellen 2.10 und 2.11 für die beiden Sonderfälle. Darüber hinaus enthält diese Tabelle auch Angaben für kreisförmige Hohlprofile (Rohre). Mithilfe von Tabelle 2.14 kann für Walzprofile der Reihen IPE, HEAA, HEA, HEB und HEM unmittelbar festgestellt werden, ob sie mindestens die Bedingungen für die Querschnittsklasse 2 erfüllen und ob die plastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt werden darf. Sofern die Bedingung für Druckkräfte N erfüllt ist, gilt sie für beliebige Beanspruchungen.

Tabelle 2.12 c/t-Verhältnisse von Walzprofilen

Nenn- höhe	IPE		HEAA		HEA		HEB		HEM	
	Gurt	Steg								
80	3,10	15,7	-	-	-	-	-	-	-	-
100	3,24	18,2	6,53	13,3	4,44	11,2	3,50	9,33	1,75	4,67
120	3,62	21,2	8,35	17,6	5,69	14,8	4,07	11,4	2,13	5,92
140	3,93	23,9	9,31	21,4	6,50	16,7	4,54	13,1	2,48	7,08
160	3,99	25,4	8,96	23,1	6,89	17,3	4,69	13,0	2,65	7,43
180	4,23	27,5	9,67	24,4	7,58	20,3	5,05	14,4	2,95	8,41
200	4,14	28,4	9,91	24,4	7,88	20,6	5,17	14,9	3,10	8,93
220	4,35	30,1	10,5	25,3	8,05	21,7	5,45	16,0	3,36	9,81
240	4,28	30,7	10,6	25,2	7,94	21,9	5,53	16,4	2,94	9,11
260	-	-	10,8	27,2	8,18	23,6	5,77	17,7	3,11	9,83
270	4,82	33,3	-	-	-	-	-	-	-	-
280	-	-	11,3	28,0	8,62	24,5	6,15	18,7	3,36	10,6
300	5,28	35,0	11,4	27,7	8,48	24,5	6,18	18,9	3,01	9,90
320	-	-	10,8	28,1	7,65	25,0	5,72	19,6	2,93	10,7
330	5,07	36,1	-	-	-	-	-	-	-	-
340	-	-	10,3	28,6	7,17	25,6	5,44	20,3	2,93	11,6
360	4,96	37,3	9,88	29,0	6,74	26,1	5,19	20,9	2,91	12,4
400	4,79	38,5	9,10	31,4	6,18	27,1	4,84	22,1	2,90	14,2
450	4,75	40,3	8,74	34,4	5,58	29,9	4,46	24,6	2,90	16,4
500	4,62	41,8	8,41	37,1	5,09	32,5	4,13	26,9	2,89	18,6
550	4,39	42,1	7,82	38,1	4,86	35,0	3,98	29,2	2,89	20,9
600	4,21	42,8	7,55	40,5	4,66	37,4	3,84	31,4	2,88	23,1
650	-	-	7,30	42,7	4,47	39,6	3,71	33,4	2,88	25,4
700	-	-	6,85	44,8	4,29	40,1	3,58	34,2	2,86	27,7
800	-	-	6,28	48,1	4,02	44,9	3,37	38,5	2,78	32,1
900	-	-	5,63	51,3	3,73	48,1	3,16	41,6	2,76	36,7
1000	-	-	5,33	54,3	3,60	52,6	3,07	45,7	2,76	41,3

Die Berechnungsbeispiele in den Abschnitten 2.8 bis 2.10 enthalten zahlreiche Beispiele, bei denen die Querschnittsklasse bestimmt wird, beispielsweise:

- Abschnitt 2.9.4, Walzprofil HEA 300
- Abschnitte 2.8.4 und 2.9.6, rechteckiges Hohlprofil
- Abschnitt 2.8.5, Hohlkastenträger
- Abschnitt 2.10.5, kreisförmiges Hohlprofil (Rohr)

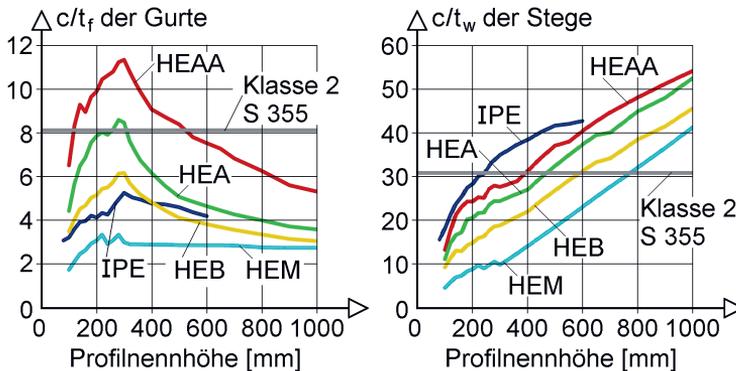


Bild 2.2 Verhältnisse c/t bei Walzprofilen (Gurte links, Stege rechts)

Tabelle 2.13 Bedingungen für die Querschnittsklassen 1 bis 3 nach DIN EN 1993-1-1 für auf Druck oder Biegung beanspruchte Querschnittsteile

Querschnittsklasse	Beidseitig gestützte Teile		Einseitig gestützte Teile Druck	Kreisförmige Hohlquerschnitte (Rohre)
	Druck	Biegung		
1	$c/t \leq 33 \epsilon$	$c/t \leq 72 \epsilon$	$c/t \leq 9 \epsilon$	$d/t \leq 50 \epsilon^2$
2	$c/t \leq 38 \epsilon$	$c/t \leq 83 \epsilon$	$c/t \leq 10 \epsilon$	$d/t \leq 70 \epsilon^2$
3	$c/t \leq 42 \epsilon$	$c/t \leq 124 \epsilon$	$c/t \leq 14 \epsilon$	$d/t \leq 90 \epsilon^2$
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$ mit f_y in N/mm^2				

Tabelle 2.14 Walzprofile der Querschnittsklasse 2 (s. auch Profiltabellen im Anhang)

Schnittgrößen	S235	S355
Biegemoment M_y Biegemoment M_z	alle Walzprofile bis auf: HEAA 220 bis 340	alle Walzprofile bis auf: HEAA 120 bis 500 HEA 260 bis 300
Druckkraft N (ungünstigster Beanspruchungsfall)	alle Walzprofile bis auf: IPE 400 bis 600 HEAA 220 bis 340	alle Walzprofile bis auf: IPE 270 bis 600 HEAA 120 bis 1000
Beliebige Schnittgrößen	HEAA 550 bis 1000 HEA 650 bis 1000 HEB 800 bis 1000 HEM 1000	HEA 260 bis 300 HEA 500 bis 1000 HEB 600 bis 1000 HEM 800 bis 1000

2.6 Tragfähigkeitsnachweise

Für Tragwerke sind in statischen Berechnungen folgende Nachweise zu erbringen:

- Tragfähigkeit
- Gebrauchstauglichkeit
- Dauerhaftigkeit bzw. Ermüdungsfestigkeit
- Lagesicherheit

Die Grundlage für die Nachweise sind bei Stahlkonstruktionen folgende Normen:

- DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung
- DIN EN 1991: Einwirkungen auf Tragwerke
- DIN EN 1993: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Da die Nachweise zur Tragfähigkeit bei vielen Tragwerken im Vordergrund stehen, werden sie im Folgenden ausführlich behandelt. Vorab werden hier Hinweise zu den anderen Nachweisen gegeben. Gemäß Kapitel 7 der DIN EN 1993-1-1 muss ein Stahltragwerk so entworfen und ausgeführt werden, dass es alle maßgebenden Anforderungen an die **Gebrauchstauglichkeit** erfüllt. Dies betrifft im Wesentlichen die Begrenzung von vertikalen Durchbiegungen und horizontalen Verformungen. Darüber hinaus sind Vibrationen (dynamische Einflüsse, Schwingungen) in Tragwerken mit öffentlicher Nutzung so zu begrenzen, dass eine starke Beeinträchtigung der Nutzer vermieden wird.

Bei der **Dauerhaftigkeit** geht es gemäß DIN EN 1993-1-1, Kapitel 4, um den Korrosionsschutz und die Werkstoffermüdung, die hauptsächlich bei Brücken und Kranbahnträgern große Bedeutung hat. Bei Hochbauten sind normalerweise keine **Ermüdungsnachweise** erforderlich außer für Bauteile mit Beanspruchungen aus:

- Hebevorrichtungen oder rollenden Lasten
- wiederholten Spannungswechseln durch Maschinenschwingungen
- windinduzierten Schwingungen
- Schwingungen aus rhythmischer Bewegung von Personengruppen

Bei der **Lagesicherheit** geht es gemäß Abschnitt 2.4.4 der DIN EN 1993-1-1 beispielsweise um die Bemessung von Verankerungen oder den Nachweis gegen das Abheben von Lagern bei Durchlaufträgern.

Nachweise zur Tragfähigkeit

Beim Nachweis für Grenzzustände der Tragfähigkeit ist gemäß DIN EN 1990 zu zeigen, dass die folgende Bedingung eingehalten wird:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

Der Bemessungswert der Einwirkungen (**Beanspruchungen**) E_d darf nicht größer als der Bemessungswert der Tragfähigkeit (**Beanspruchbarkeiten**) R_d sein. Die Bemessungswerte der Einwirkungen sind nach DIN EN 1991 unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten γ_f und Kombinationsbeiwerten ψ zu bestimmen. Bei den Bemessungswerten der Beanspruchbarkeiten sind die in Tabelle 2.9 aufgeführten Teil-

sicherheitsbeiwerte γ_{Mi} zu berücksichtigen. Der Bemessungswert der Streckgrenze ergibt sich damit zu $f_{y,Rd} = f_y/\gamma_{Mi}$.

In DIN EN 1993-1-1 werden Schnittgrößen und Spannungen als Bemessungswerte der Einwirkungen mit dem Index „Ed“ gekennzeichnet. Auf diesen Index wird in dem hier vorliegenden Buch bei allen Nachweisbedingungen und Berechnungsbeispielen verzichtet, weil der Entfall von „Ed“ zur Übersichtlichkeit beiträgt und darüber hinaus stets eindeutig klar ist, dass es sich um Nachweise zur Tragfähigkeit handelt. Mit dem Index „Rd“ werden die Bemessungswerte der Streckgrenze für die Normalspannungen ($f_{y,Rd}$), der Schubspannungen (τ_{Rd}) und der vollplastischen Schnittgrößen (z. B. $N_{pl,Rd}$) gekennzeichnet, sofern Nachweise zur Tragfähigkeit behandelt werden. Bei allgemeinen Herleitungen und Erläuterungen zum Verständnis wird auf den Index „Rd“ verzichtet.

DIN EN 1993-1-1 unterscheidet in elastische und plastische Tragwerksberechnungen und verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Beanspruchbarkeiten der Querschnitte. Bei der Elastizitätstheorie ist die in Bild 2.3 dargestellte Hooke'sche Gerade $\sigma_x = E \cdot \epsilon_x$ die Grundlage der Berechnungen. Die Dehnungen werden durch $\epsilon_x = f_y/E$ begrenzt und die Streckgrenze wird in den Randfasern der Querschnitte erreicht. Aufgrund der großen Duktilität von Baustahl können bei Querschnitten der Klassen 1 und 2 wesentlich größere Dehnungen zugelassen werden. Dies führt zu dem in Bild 2.3 gekennzeichneten idealplastischen Werkstoffverhalten und zur plastischen Querschnittstragfähigkeit, bei der im gesamten Querschnitt $\sigma_x = f_{y,Rd}$ bzw. $\sigma_x = -f_{y,Rd}$ ist.

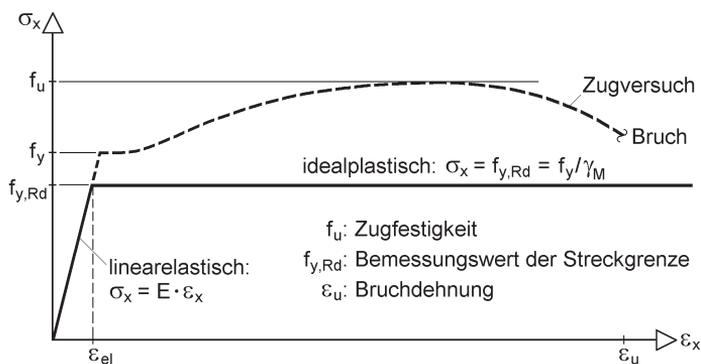


Bild 2.3 Linearelastisch-idealplastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Baustahl

Die Nachweise zur Tragfähigkeit können in vier Nachweismethoden eingeteilt werden. Ausschlaggebend dafür ist die Zuordnung der Querschnitte zu den Querschnittsklassen (QK) 1 bis 4 gemäß Abschnitt 2.5. Tabelle 2.15 enthält eine Übersicht mit vier Nachweismethoden (NW) und mit Tabelle 2.16 wird erläutert, wie die Nachweise üblicherweise geführt werden.

Nachweismethode 1 ist die klassische Methode zur Führung von Tragfähigkeitsnachweisen im Stahlbau, die sehr häufig in der Baupraxis zum Einsatz kommt. Sofern

keine Beulgefahr besteht, also bei Querschnitten der Klassen 1 bis 3, können für beliebige Querschnitte und Beanspruchungen Spannungsnachweise geführt werden.

Tabelle 2.15 Tragfähigkeitsnachweise nach DIN EN 1993-1-1

Nachweismethode	Tragwerksberechnung ⇒ E_d	Querschnittsausnutzung ⇒ R_d
NW 1 (sehr häufig) Querschnitte der Klassen 1 bis 3	nach der Elastizitätstheorie ⇒ Schnittgrößen N, M_y usw.	nach der Elastizitätstheorie ⇒ Bemessungswert der Streckgrenze $f_{y,Rd}$
NW 2 (häufig) Querschnitte der Klassen 1 und 2	nach der Elastizitätstheorie ⇒ Schnittgrößen N, M_y usw.	nach der Plastizitätstheorie ⇒ Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit
NW 3 (selten) Querschnitte der Klasse 1	nach der Plastizitätstheorie ⇒ Schnittgrößen nach der Fließgelenk- oder Fließzonentheorie	nach der Plastizitätstheorie ⇒ Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit
NW 4 (selten) Querschnitte der Klasse 4	nach der Elastizitätstheorie ⇒ Schnittgrößen N, M_y usw.	nach der Elastizitätstheorie unter Berücksichtigung des Beulens

Tabelle 2.16 Durchführung der Tragfähigkeitsnachweise

Nachweismethode	Nachweise
NW 1 (QK 1 bis 3)	mit Spannungen und der Streckgrenze bzw. dem Fließkriterium
NW 2 (QK 1 und 2)	mit plastischen Grenzschnittgrößen bzw. Interaktionsbeziehungen
NW 3 (QK 1)	nach der Fließgelenktheorie mit kinematischen Ketten oder schrittweise elastischen Berechnungen; nach der Fließzonentheorie mit Computerprogrammen
NW 4 (QK 4)	mit Spannungen unter Berücksichtigung des Beulens

Bei Walzprofilen der Reihen IPE, HEAA, HEA HEB und HEM und geschweißten Querschnitten, die den Querschnittsklassen 1 oder 2 zugeordnet werden können, bietet die Nachweismethode 2 in vielen Fällen erhebliche Vorteile. Im Vergleich zu Methode 1 ist sie häufig einfacher in der Anwendung und es lassen sich darüber hinaus höhere Tragfähigkeiten ausnutzen.

Die Nachweismethode 3 ist auf Querschnitte der Klasse 1 beschränkt. In der Bau Praxis wird diese Methode nur in Ausnahmefällen verwendet und in dem vorliegenden Buch wird sie daher nur am Rande behandelt. Das Berechnungsbeispiel in Abschnitt 2.9.3 (Zweifeldträger) vermittelt Grundlegendes zur Führung der Nachweise. Nachweismethode 4 betrifft Querschnitte der Klasse 4, bei denen der Einfluss des Beulens berücksichtigt werden muss. Dafür werden spezielle Nachweisformate benö-

tigt, die im Rahmen des vorliegenden Buches nicht behandelt werden, s. DIN EN 1993-1-5 und [38].

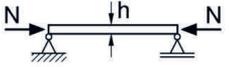
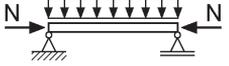
Theorie II. Ordnung

Die Schnittgrößen zur Führung der Nachweise können

- nach Theorie I. Ordnung unter Ansatz der Ausgangsgeometrie des Tragwerks oder
- nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Einflüsse aus der Tragwerksverformung

berechnet werden. Nach DIN EN 1993-1-1 sind die Einflüsse der Tragwerksverformungen (Einflüsse aus Theorie II. Ordnung) in der Regel zu berücksichtigen, wenn die daraus resultierende Vergrößerung der Schnittgrößen nicht mehr vernachlässigt werden darf oder das Tragverhalten maßgeblich beeinflusst wird. Gemäß Tabelle 2.17 ist die Theorie II. Ordnung eine baupraktische Näherung für die geometrisch nichtlineare Theorie. Dabei wird das Gleichgewicht am schwach verformten System gebildet, was entsprechend kleine Verformungen voraussetzt. Berechnungen nach Theorie II. Ordnung werden in Kapitel 7 ausführlich behandelt und mit Bild 7.1 werden Erläuterungen zum Verständnis gegeben.

Tabelle 2.17 Unterschiede zwischen Theorie I. und II. Ordnung sowie der geometrisch nichtlinearen Theorie [36]

	Theorie I. Ordnung (geometrisch lineare Theorie)	Theorie II. Ordnung	Geometrisch nichtlineare Theorie
Gleichgewicht	am unverformten System	am schwach verformten System	am stark verformten System
Stab unter Druckbelastung	 $N \leq N_{cr}$	 $N \leq N_{cr}$	 $N > N_{cr}$
Stab unter Druck- und Querbelastung	 $N \ll N_{cr}$ $w < h$	 $N < N_{cr}$ $w \cong h$	 $N \cong N_{cr}$ $w \gg h$

Die Unterschiede zwischen der **geometrisch linearen** und **nichtlinearen** Theorie werden mithilfe von Tabelle 2.17 erläutert. Bei der geometrisch linearen Theorie, auch Theorie I. Ordnung genannt, wird das Gleichgewicht am **unverformten** System formuliert. Man ist stets bestrebt, diese Theorie anzuwenden, weil sie gut überschaubar ist, den geringsten Rechenaufwand erfordert und die Überlagerung der Schnittgrößen nach dem Superpositionsprinzip erlaubt. Bei einigen Anwendungsfällen reicht diese Näherung aber nicht aus und man muss genauer rechnen, weil man ansonsten völlig falsche Ergebnisse erhält und bei der Bemessung auf der unsicheren Seite liegt. Dies ist dann der Fall, wenn das Tragwerk **stabilitätsgefährdet** ist.

Bei der geometrisch nichtlinearen Theorie wird das Gleichgewicht am **verformten** System formuliert und es werden dabei große Verformungen berücksichtigt. Mit dieser Theorie erhält man die genauen Lösungen, die aber auch einen hohen Rechenaufwand erfordern. Bei Baukonstruktionen können mit der geometrisch nichtlinearen Theorie sehr große Verformungen berechnet werden, die jedoch i. d. R. unrealistisch sind, weil angrenzende Bauteile bereits versagt haben (Gebrauchstauglichkeit), oder unsinnig sind, weil die Lasten nicht mehr eingeleitet werden können. Im Stahlbau verwendet man daher eine **Theorie II. Ordnung**, die eine Näherung für die geometrisch nichtlineare Theorie ist. Dabei wird das Gleichgewicht am **verformten** System formuliert und aufgrund von Linearisierungen werden näherungsweise nur mäßige Verformungen berücksichtigt. Die Skizzen in Tabelle 2.17 vermitteln anschaulich die Unterschiede bei den Verformungen.

Bei Tragwerken des Bauwesens sollte man die Verformungen stets so begrenzen, dass die Theorie II. Ordnung zu ausreichend genauen Ergebnissen führt. Abgesehen von Seilkonstruktionen ist es in der über 30-jährigen Berufspraxis der Verfasser nur einmal vorgekommen, dass die geometrisch nichtlineare Theorie erforderlich war: Dabei war die Standsicherheit eines Windspiels von 16 m Höhe mit weit auskragenden beweglichen Armen zu untersuchen. Planmäßig treten bei diesem Kunstwerk sehr große Verformungen auf.

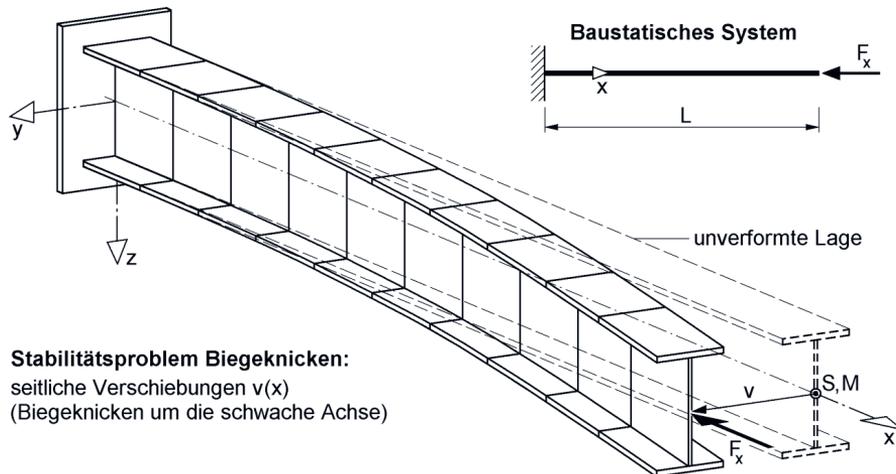
Stabilitätsfälle

Beim **Knicken** von Stäben und Stabwerken wird zwischen dem **Biegeknicken** und dem **Biegedrillknicken** unterschieden. Bei dem eingespannten Stab in Bild 2.4a entsteht aufgrund der angreifenden Last F_x eine Drucknormalkraft N . Dadurch wird der Stab zusammengedrückt, was zu Verschiebungen u in x -Richtung führt. Planmäßig treten keine weiteren Verformungen auf, weil der Stab ideal gerade sein soll und die Last genau mittig angreift. Solange stabiles Gleichgewicht vorhanden ist, ändert sich an diesem Zustand nichts. Bei einer gewissen Lastintensität geht jedoch das stabile Gleichgewicht verloren und es tritt das **Stabilitätsproblem Biegeknicken** auf. Der Übergang zum labilen Gleichgewicht erfolgt bei Erreichen der kritischen Normalkraft (Verzweigungslast) $N = N_{cr}$. Bei Stabtragwerken muss die Belastung kleiner sein, da stabiles Gleichgewicht zu gewährleisten ist. N_{cr} stellt daher eine obere Grenze für N dar. Das Stabilitätsproblem Biegeknicken ist durch reine Verschiebungszustände gekennzeichnet, Querschnittsverdrehungen ϑ treten nicht auf. Man unterscheidet zwei Fälle:

- **Biegeknicken um die y -Achse**, häufig auch Biegeknicken um die **starke Achse** genannt, mit **Verschiebungen $w(x)$** , d. h. in z -Richtung
- **Biegeknicken um die z -Achse**, häufig auch Biegeknicken um die **schwache Achse** genannt, mit **seitlichen Verschiebungen $v(x)$** wie in Bild 2.4a, d. h. in y -Richtung

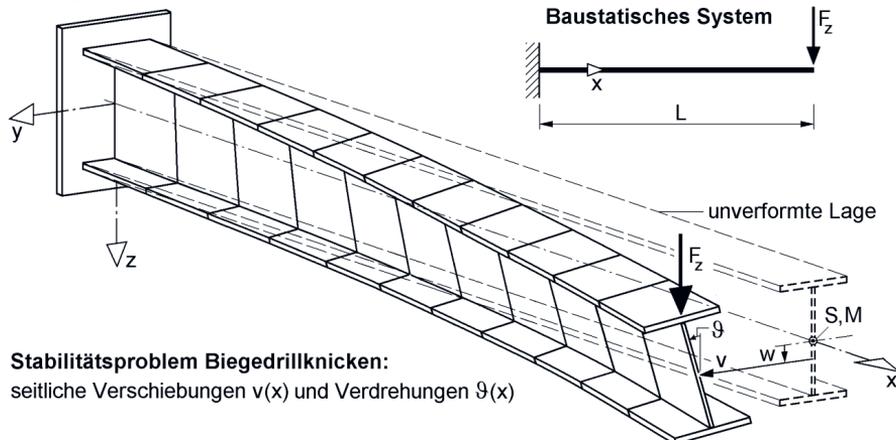
Das Stabilitätsproblem Biegeknicken kann nur auftreten, wenn Drucknormalkräfte vorhanden sind.

a) Biegeknicen



Stabilitätsproblem Biegeknicen:
seitliche Verschiebungen $v(x)$
(Biegeknicen um die schwache Achse)

b) Biegedrillknicken



Stabilitätsproblem Biegedrillknicken:
seitliche Verschiebungen $v(x)$ und Verdrehungen $\vartheta(x)$

Bild 2.4 Stabilitätsprobleme beim Knicken von Stäben

In Bild 2.4b wird ein eingespannter Stab unter einer Querlast F_z betrachtet. Dabei treten planmäßige Biegemomente M_y auf und es ergeben sich Verschiebungen $w(x)$ nach unten. Wie beim Druckstab in Bild 2.4a gibt es einen Übergang vom stabilen zum labilen Gleichgewicht, der durch die Druckspannungen im Querschnitt infolge M_y hervorgerufen und durch den Lastangriffspunkt von F_z beeinflusst wird. Der Fall in Bild 2.4b ist ein typisches Beispiel für das Stabilitätsproblem Biegedrillknicken, bei dem seitliche Verschiebungen $v(x)$ und Verdrehungen $\vartheta(x)$ auftreten. **Kennzeichnendes Merkmal beim Biegedrillknicken** sind die in Bild 2.4b dargestellten **Verdrehungen $\vartheta(x)$** , wobei der Wortteil „drill“ ausdrückt, dass es auf die Verdrehung, d. h. die Veränderung der Verdrehung in Stablängsrichtung, ankommt. Ein Sonderfall des Biegedrillknickens ist das Drillknicken, bei dem nur Verdrehungen $\vartheta(x)$ und keine

Dieser Wert ist deutlich kleiner als eins, sodass man anstelle der genauen Steifigkeitsbeziehung in Bild 7.19 auch die Näherung mit den beiden Teilmatrizen \underline{K}_e und \underline{G}_e verwenden kann. Bestätigt wird dies durch Bild 7.21 links, aus dem sich eine maximale Elementlänge von ca. 7,50 m ergibt, die deutlich größer als die vorhandene ist.

Wenn man N_{cr} berechnen möchte, muss man normalerweise die **genaue** Steifigkeitsbeziehung verwenden oder alternativ mit der Näherung rechnen und dabei das System feiner einteilen (beispielsweise in 15 Elemente). Hier ist selbst für N_{cr} die Stabkennzahl der drei Elemente mit $\varepsilon = 1,027$ so klein, dass die Näherung mit drei Elementen relativ genau ist (101,3 %). Mit einem Computerprogramm, das mit dem Matrizenzerlegungsverfahren nach [38] rechnet, erhält man als genaue Lösung:

$$N_{cr} = 5697 \text{ kN}$$

Anmerkungen: Die Methode der finiten Elemente (FEM) wird in [38] für Berechnungen nach Theorie II. Ordnung und zur Ermittlung von Verzweigungslasten ausführlich erläutert und anhand zahlreicher Beispiele verdeutlicht. Berechnungen können mit den Computerprogrammen FE-STAB und FE-RAHMEN durchgeführt werden, s. Abschnitt 1.5. In Abschnitt 2.10 wird ein Zweigelenkrahmen mit dieser Methodik nach Theorie II. Ordnung berechnet.

7.5 Nachweise zum Biegedrillknicken

7.5.1 Allgemeines

Nachweise zum Biegedrillknicken mit Berechnungen nach Theorie II. Ordnung (Ersatzimperfektionsverfahren) sind aufwendig und können nur in wenigen Einzelfällen mit Handrechnungen geführt werden. Man benötigt daher entsprechend leistungsfähige Computerprogramme, wie z. B. FE-STAB (s. Abschnitt 1.5), damit die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung mit erträglichem Aufwand berechnet werden können. Darüber hinaus sind Interaktionsbeziehungen zum Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erforderlich. Die Thematik wird in [36] ausführlich erläutert und in [38] bezüglich der FE-Berechnungen vertieft. In den folgenden Abschnitten wird das Wichtigste für das Verständnis anhand von zwei Berechnungsbeispielen erläutert, damit eine sachgerechte Verwendung von Computerprogrammen möglich ist.

7.5.2 Walzprofilträger

Bei dem in Bild 7.24 dargestellten Träger treten **planmäßig** die Schnittgrößen M_y und V_z auf. Das maximal aufnehmbare Biegemoment unter Berücksichtigung des Biegedrillknickens kann mit den Bemessungshilfen in Abschnitt 6.4 bestimmt werden. Aus Bild 6.24 liest man ca. 140 kNm ab und mit dem Abminderungsfaktor in Tabelle 6.13 erhält man $M_{y,b,Rd} = 0,497 \cdot 279,3 = 138,8 \text{ kNm} > 134,1 \text{ kNm} = \max M_{y,Ed}$.

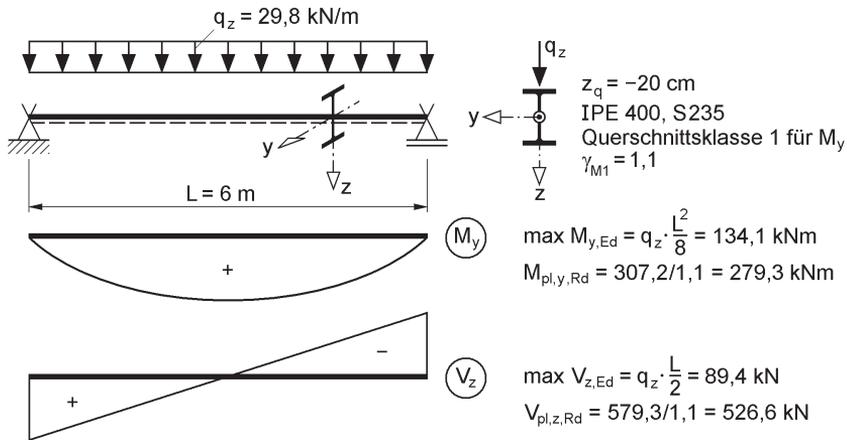


Bild 7.24 Einfeldträger und planmäßige Schnittgrößen

Als Alternative zur Bemessung mithilfe von Abminderungsfaktoren kann der Nachweis mit dem Ersatzimperfektionsverfahren geführt werden. Aufgrund des Biegemomentes und des Lastangriffs am Obergurt ist der Träger biegedrillknickgefährdet und bei der Eigenform treten, wie in den Bildern 6.2 und 6.30 dargestellt, Verschiebungen $v(x)$ und Verdrehungen $\vartheta(x)$ auf. Gemäß Abschnitt 7.3.3 ist als Imperfektion eine Vorkrümmung $v_0(x)$ anzunehmen. Wegen $h/b = 400/180 = 2,22 > 2$ für das Walzprofil IPE 400 wird gemäß Tabelle 7.2 in Feldmitte

$$v_{0,m} = e_{0,d} = L/150 = 600/150 = 4,0 \text{ cm}$$

angesetzt. Aufgrund dieser seitlichen Vorkrümmung $v_0(x)$ und den Beanspruchungen gemäß Bild 7.24 entstehen im Träger nach Theorie II. Ordnung Torsionsverdrehungen und Torsionsbeanspruchungen. Wenn man für $v_0(x)$ eine Sinushalbwellen wählt, ergeben sich mit dem Computerprogramm FE-STAB nach Theorie II. Ordnung in Feldmitte folgende Verformungen:

$$w = 1,035 \text{ cm}; \quad v = 2,573 \text{ cm}; \quad \vartheta = 0,165 \text{ rad } (9,45^\circ)$$

In Tabelle 7.6 sind auf der linken Seite die Schnittgrößen \hat{M}_y , \hat{V}_z , \hat{M}_x und \hat{M}_ω dargestellt, die sich aus dem Gleichgewicht bezogen auf die unverformte Lage (s. Bild 7.24) ergeben. Für den Nachweis ausreichender Querschnittstragfähigkeit werden die Schnittgrößen unter Berücksichtigung der Verdrehungen benötigt. Diese **Nachweis-schnittgrößen** ergeben sich mithilfe von Bild 7.25 wie folgt:

$$M_y = \hat{M}_y \cdot \cos \vartheta + \hat{M}_z \cdot \sin \vartheta \quad (7.64)$$

$$M_z = \hat{M}_z \cdot \cos \vartheta - \hat{M}_y \cdot \sin \vartheta$$

Da man bei Theorie II. Ordnung die Näherungen $\sin \vartheta \cong \vartheta$ und $\cos \vartheta \cong 1$ verwendet, erhält man:

$$M_y = \hat{M}_y + \hat{M}_z \cdot \vartheta \quad (7.65)$$

$$M_z = \hat{M}_z - \hat{M}_y \cdot \vartheta$$

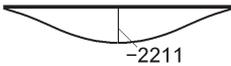
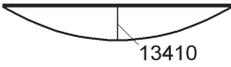
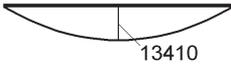
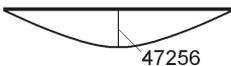
Bei dem hier untersuchten Beispiel sind $\hat{M}_z = 0$ und $\hat{M}_y = M_y^I$, sodass sich in Feldmitte folgende Biegemomente ergeben:

$$\max M_y = \max M_y^I = 134,1 \text{ kNm}$$

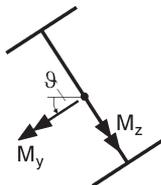
$$\max M_z = -\max M_y^I \cdot \vartheta = -134,1 \cdot 0,165 = -22,13 \text{ kNm}$$

Aufgrund der Verdrehung ϑ tritt ein Biegemoment M_z um die schwache Achse auf. Es ist im Vergleich zu M_y relativ klein. Zu bedenken ist aber, dass die Querschnittstragfähigkeit für Biegung um die schwache Achse mit $M_{p,z,Rd} = 48,93 \text{ kNm}$ ebenfalls deutlich geringer ist.

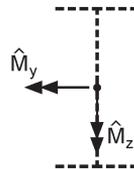
Tabelle 7.6 Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung für den Einfeldträger in Bild 7.24 unter Berücksichtigung von $v_0(x)$

Gleichgewichtsschnittgrößen		Nachweisschnittgrößen		Einheit
\hat{N}	= 0	N	unbedeutend	kN
\hat{M}_z	= 0	M_z		kNcm
\hat{V}_y	= 0	V_y	unbedeutend	kN
\hat{M}_y		M_y		kNcm
\hat{V}_z	89,4  -89,4	V_z	89,4  -89,4	kN
\hat{M}_ω		M_ω		kNcm ²
\hat{M}_x	557  -557	M_{xp}	347  -347	kNcm
		M_{xs}	212  -212	kNcm

Querschnitt nach Verformung des Stabes:



Ausgangslage:



Transformationsbeziehungen:

$$M_y = \hat{M}_y \cdot \cos \vartheta + \hat{M}_z \cdot \sin \vartheta$$

$$M_z = \hat{M}_z \cdot \cos \vartheta - \hat{M}_y \cdot \sin \vartheta$$

Näherung für kleine Winkel:

$$\cos \vartheta \cong 1, \sin \vartheta \cong \vartheta$$

Bild 7.25 Zur Ermittlung der Nachweisschnittgrößen M_y und M_z

Die unplanmäßige Torsion aufgrund der Ersatzimperfektion $v_0(x)$ führt zu den Schnittgrößen M_{xp} , M_{xs} und M_ω . Die maximalen Werte sind gemäß Tabelle 7.6:

$$M_{xp} = 3,47 \text{ kNm} \quad (= 61,6 \% \text{ von } M_{pl,xp,Rd})$$

$$M_{xs} = 2,12 \text{ kNm} \quad (= 1,8 \% \text{ von } M_{pl,xs,Rd})$$

$$M_\omega = 4,73 \text{ kNm}^2 \quad (= 52,3 \% \text{ von } M_{pl,\omega,Rd})$$

Das primäre Torsionsmoment ist relativ groß. Es tritt an den Stabenden auf und ist daher hier nicht bemessungsrelevant. Völlig unbedeutend ist dagegen das sekundäre Torsionsmoment, da die korrespondierende Tragfähigkeit des Querschnitts wesentlich größer als bei der primären Torsion ist. Im Vergleich dazu tritt das maximale Wölbmoment in Feldmitte auf. Es bestimmt gemeinsam mit den Biegemomenten $\max M_y$ und $\max M_z$ die Tragfähigkeit des Trägers.

Die Querschnittstragfähigkeit wird mit dem Teilschnittgrößenverfahren nach Abschnitt 5.7 bestimmt. Es ist im Computerprogramm FE-STAB implementiert, sodass die Ausnutzung der Querschnitte den Programmresultaten entnommen werden kann. Bild 7.26 zeigt den Verlauf über die Trägerlänge. In Feldmitte beträgt die Querschnittsausnutzung $E_d/R_d = 0,999$, d. h. 99,9 %.

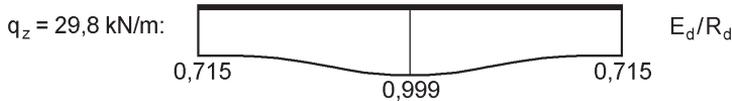


Bild 7.26 Ausnutzung der Querschnittstragfähigkeit E_d/R_d des Trägers in Bild 7.24

7.5.3 Träger mit einfach-symmetrischem I-Querschnitt

Beim doppelt-symmetrischen I-Querschnitt, der in Abschnitt 7.5.2 verwendet wurde, liegt der Schubmittelpunkt im Schwerpunkt, sodass $y_M = z_M = 0$ sind. Sofern Querschnitte nicht doppelt-symmetrisch sind, müssen bei Theorie II. Ordnung zusätzliche Querschnittsparameter berücksichtigt werden:

$$y_M, z_M, i_M, r_y, r_z \text{ und } r_\omega$$

Welche Werte ungleich null sind, hängt von der Querschnittsform und den Symmetrieeigenschaften des Querschnitts ab, s. Tabelle 7.7. Wegen

$$i_M^2 = i_p^2 + y_M^2 + z_M^2 \quad (7.66)$$

treten alle Querschnittsparameter in

$$M_{tr} = N \cdot i_M^2 - M_z \cdot r_y + M_y \cdot r_z + M_\omega \cdot r_\omega \quad (7.67)$$

auf, einer Größe, die gemäß [36] nach Theorie II. Ordnung mit der Verdrillung \mathcal{G}' zu einem Torsionsmoment infolge von Normalspannungen σ_x führt:

$$M_x(\sigma_x) = M_{tr} \cdot \mathcal{G}' \quad (7.68)$$

Tabelle 7.7 zeigt, dass i_M bei allen Querschnitten ungleich null ist. Diese Querschnittsgröße wird also stets benötigt, wenn eine Normalkraft vorhanden ist. Einzelne Werte von r_y , r_z und r_o sind bei vielen baupraktischen Querschnitten gleich null und werden im Übrigen nur benötigt, wenn M_z , M_y bzw. M_o auftreten. Abschnitt 2.7.5 enthält ergänzende Erläuterungen, s. auch Tabelle 2.21.

Tabelle 7.7 Übersicht zu den Querschnittsparametern y_M , z_M , i_M , r_y , r_z und r_o

Querschnitt	y_M	z_M	i_M	r_y	r_z	r_o
 doppelt-symmetrisch	0	0	$\neq 0$	0	0	0
 einfachsymmetrisch zur z-Achse	0	$\neq 0$	$\neq 0$	0	$\neq 0$	0
 einfachsymmetrisch zur y-Achse	$\neq 0$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	0	0
 punktsymmetrisch	0	0	$\neq 0$	0	0	$\neq 0$
beliebig	$\neq 0$					

Als Beispiel wird der in Bild 7.27 dargestellte Einfeldträger betrachtet. Er entspricht bis auf den Querschnitt dem baustatischen System in Abschnitt 7.5.2. Der einfachsymmetrische I-Querschnitt hat die gleiche Fläche wie das Walzprofil IPE 400 ohne Ausrundungsflächen ($r = 0$), wobei jedoch die Gurtflächen im Verhältnis 2/3 zu 1/3 aufgeteilt wurden. Diese Vorgehensweise ermöglicht den Vergleich der beiden Fälle in Bild 7.27 mit dem Einfeldträger in Abschnitt 7.5.2.

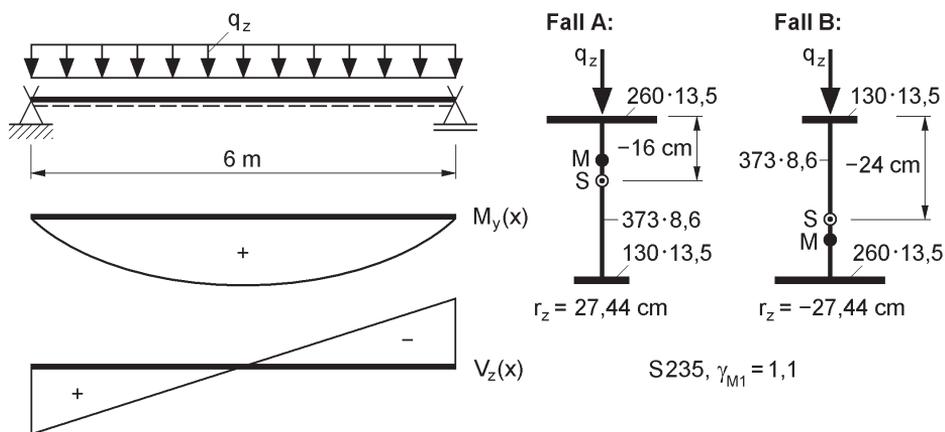


Bild 7.27 Einfeldträger mit einfach-symmetrischem I-Querschnitt

Nach **Theorie I. Ordnung** ist das maximale Feldmoment für die Bemessung maßgebend. Für $M_{pI,y} = 262,1$ kNm ergibt sich mit

$$\max q_z = 8 \cdot 262,1/6^2 = 58,2 \text{ kN/m}$$

eine Grenzbelastung nach Theorie I. Ordnung, die davon unabhängig ist, ob der breite Gurt oben oder unten liegt (Fall A bzw. B). Nach Theorie II. Ordnung, d. h. unter Berücksichtigung des Biegedrillknickens, ist die Grenztragfähigkeit unterschiedlich, was anschaulich mithilfe von Bild 7.27 festgestellt werden kann. Ohne konstruktive Zwänge wird man den Querschnitt **nicht** wie bei Fall B anordnen, weil:

- der schmale Gurt der Druckgurt ist
- der Abstand von q_z zum Schubmittelpunkt größer ist

Fall B hat aber durchaus baupraktische Bedeutung, weil derartige Querschnitte beispielsweise bei Verbundträgern vorkommen und die Tragfähigkeit im Bauzustand nachgewiesen werden muss, wenn die Betonplatte noch nicht mitwirkt. Für die Berechnung mit dem Computerprogramm FE-STAB wird wie in Abschnitt 7.5.2 eine Vorkrümmung mit $v_{0,m} = L/150 = 600/150 = 4,0$ cm angesetzt. Ausgewählte Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 7.8 zusammengestellt. Die Querschnittstragfähigkeit wird auch bei diesem Beispiel mit dem Teilschnittgrößenverfahren nach [21] ermittelt, s. auch Abschnitt 5.7.

Für den Fall, dass der **breite Gurt** oben liegt (Fall A), ist die Tragfähigkeit wesentlich größer (251 %!), als wenn der schmale Gurt den Obergurt bildet. Nicht nur das, auch im Vergleich zum IPE-Träger ist die Tragfähigkeit mit 149 % erheblich höher (s. auch Bild 7.26), sodass geschweißte Träger mit einfach-symmetrischen Querschnitten für derartige Anwendungsfälle wirtschaftlicher als Walzprofile sein können.

Um wie viel ungünstiger Fall B gegenüber Fall A ist, verdeutlichen die Werte in Tabelle 7.8. Obwohl nur 40 % der Belastung aufgebracht wird, sind die Verdrehung und $\max M_\omega$ deutlich größer. Die Ergebnisse zeigen, welchen signifikanten Einfluss der Querschnittsparameter r_z hat, der das unterschiedliche Tragverhalten bei den Fällen A und B im Wesentlichen erfasst. Hinzu kommt, dass der Abstand zwischen dem Lastangriffs- und dem Schubmittelpunkt bei Fall B deutlich größer als bei Fall A ist.

Tabelle 7.8 Ergebnisse für den Einfeldträger in Bild 7.27

Größe	Fall A	Fall B
v_{0m}	4,0 cm	4,0 cm
$\max q_z$	44,5 kN/m	17,74 kN/m
α_{cr}	1,832	1,337
$\max \vartheta$	0,157	0,197
$\max M_y$	20025 kNcm	7983 kNcm
$\max M_z$	-3149 kNcm	-1570 kNcm
$\max M_\omega$	27438 kNcm ²	40298 kNcm ²
$\max E_d/R_d$	0,999	0,999

8 Bemessung und Konstruktion von Verbindungen

8.1 Übersicht

Im Stahlbau werden überwiegend

- geschraubte Verbindungen mit Laschen, Winkeln oder Stirnplatten, d. h. mit scher- oder zugbeanspruchten Schrauben, und
- geschweißte Verbindungen mit Kehl- oder Stumpfnähten

ausgeführt. Die Berechnungs- und Nachweismethoden für diese Verbindungen werden im Folgenden ausführlich behandelt und mithilfe von Berechnungsbeispielen erläutert. Dabei werden die Grundlagen für geschraubte und geschweißte Verbindungen, die in den Kapiteln 9 und 10 vermittelt werden, als bekannt vorausgesetzt. Kapitel 11 enthält weitere Berechnungsbeispiele für Verbindungen, die Bestandteile der statischen Berechnungen für ein Werkstattgebäude mit Pultdach und für eine Lagerhalle mit Zweigelenkrahmen sind. Die folgenden Ausführungen basieren auf [32], sind dort aber wesentlich umfangreicher.

8.2 Grundsätzliches

Im **Hoch- und Industriebau** werden bei der Werkstattfertigung normalerweise geschweißte Verbindungen ausgeführt. Auf der Baustelle sind die Bedingungen für das Schweißen ungünstiger als in der Werkstatt (Witterung, Stromanschluss, Vorwärmen), sodass die Montageverbindungen fast immer mit Schrauben hergestellt werden. Bei **Brücken** werden dagegen die Bauteile bis auf wenige Ausnahmen sowohl in der Werkstatt als auch auf der Baustelle mit Schweißnähten verbunden. Auf Baustellen des Brückenbaus müssen daher entsprechende Stromanschlüsse und Schutzeinrichtungen (Einhausungen für die Schweißarbeiten) vorgehalten werden.

Bedingungen und Prinzipien

Bei der Konstruktion und Bemessung von Verbindungen sind Bedingungen und Prinzipien zu beachten, die die einwandfreie Übertragung der Schnittgrößen gewährleisten, ohne dass es zu Schäden kommt. Gemäß DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 2.5, muss bei der Berechnung von Anschlüssen eine wirklichkeitsnahe Verteilung der Schnittgrößen angenommen werden. Für die Verteilung der Kräfte und Momente auf die Einzelteile der Konstruktion und die einzelnen Verbindungsmittel ist Folgendes zu beachten:

- a) Die angenommene Verteilung der Kräfte und Momente steht im Gleichgewicht mit den am Anschluss angreifenden Schnittgrößen.
- b) Jedes Element (Teil) des Anschlusses kann die ihm zugewiesenen Kräfte und Momente übertragen.

- c) Die Verformungen, welche durch diese Verteilung hervorgerufen werden, überschreiten nicht das Verformungsvermögen der Verbindungsmittel oder der Schweißnähte und der angeschlossenen Bauteile.
- d) Die angenommene Verteilung der Kräfte und Momente muss den Steifigkeitsverhältnissen im Anschluss entsprechen.
- e) Die Verformungen, die bei elastisch-plastischen Berechnungsmodellen aus Starrkörperverdrehungen und/oder Verformungen in der Tragwerksebene herühren, sind physikalisch möglich.
- f) Das verwendete Berechnungsmodell steht nicht im Widerspruch zu Versuchsergebnissen, siehe EN 1990.

Bei der Bemessung einer Verbindung muss der Kraftfluss eindeutig festgelegt und konsequent verfolgt werden. Weitere Anforderungen bezüglich der konstruktiven Durchbildung sind:

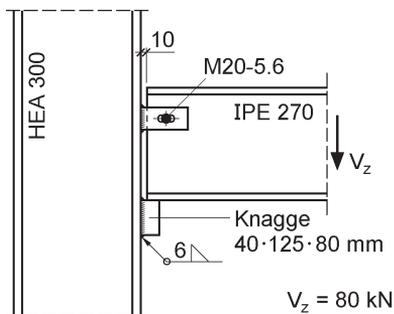
- Druck- oder schubbeanspruchte Bereiche dürfen nicht durch Stabilität versagen.
- Die Verbindungen müssen im Hinblick auf die Zugänglichkeit bzw. Abmessungen herstellbar (Schweißnähte) und montierbar (Schrauben) sein.
- Die Kosten für die Ausführung sollten möglichst gering sein.
- Der Korrosionsschutz sollte dauerhaft und problemlos erneuerbar sein.

Im Hinblick auf die konstruktive Durchbildung sollten Stöße und Anschlüsse gedungen ausgebildet und die einzelnen Querschnittsteile für sich angeschlossen und gestoßen werden. Eine unmittelbare und symmetrische Stoßdeckung ist anzustreben.

Gelenkige und biegesteife Verbindungen

Nach DIN EN 1993-1-8 [12] werden Anschlüsse (Verbindungen) im Hinblick auf die Steifigkeit und die Tragfähigkeit klassifiziert. Dort werden gelenkige, starre und verformbare Anschlüsse bzw. gelenkige, volltragfähige und teiltragfähige Anschlüsse unterschieden.

a) Gelenkiger Anschluss
mit Auflagerknagge



b) Gelenkiger Anschluss
mit Fahnenblech

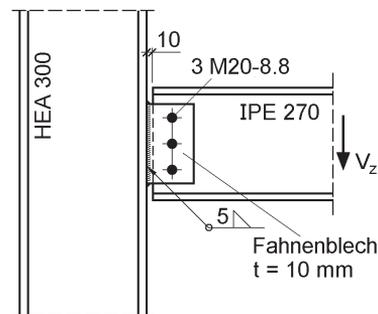


Bild 8.1 Gelenkige Anschlüsse von Trägern an Stützen

In der Baupraxis wird in der Regel in gelenkige und biegesteife Verbindungen eingeteilt. Bei gelenkigen Verbindungen geht man davon aus, dass planmäßig keine Biege-

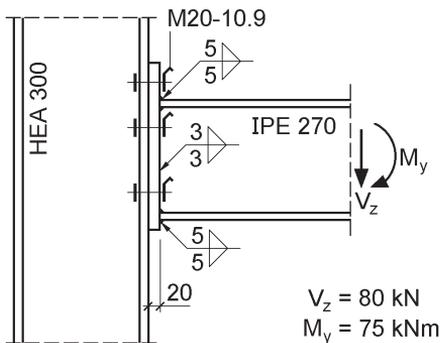
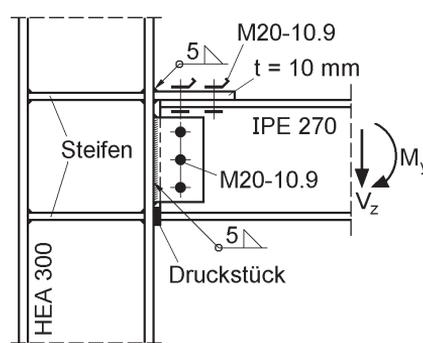
momente übertragen werden. Als Beispiel sind in Bild 8.1 gelenkige Anschlüsse von Trägern an Stützen dargestellt, bei denen Querkräfte V_z übertragen werden. Aufgrund der Verformbarkeit im Anschlussbereich treten keine nennenswerten Momente auf. Es ist jedoch zu beachten, dass die Querkräfte exzentrisch in die Stützen eingeleitet werden, was zu entsprechenden Versatzmomenten führt. Gelenkige Anschlüsse werden in der Regel wie folgt ausgeführt:

- mit Auflagerknaggen und Sicherungslaschen wie in Bild 8.1a
- mit dünnen Fahnenblechen wie Bild 8.1b
- mit dünnen Stirnplatten wie in Bild 11.19b
- mit Winkeln wie in Abschnitt 8.3.6

Es ist offensichtlich, dass die Auflagerknaggen eine ausreichende Verdrehbarkeit gewährleisten. Fahnenbleche und Stirnplatten oder die angeschlossenen Bauteile müssen so dünn sein, dass die Lochleibung der Schrauben maßgebend ist und nicht das Abscheren der Schrauben. Die mögliche Aufweitung der Löcher führt dann zu der erforderlichen Verformbarkeit. Bei der Lösung mit Winkeln sollte der Anschluss so ausgelegt werden, dass eine entsprechende Verformbarkeit vorhanden ist.

a) Biegesteifer

Stirnplattenanschluss

b) Biegesteifer Anschluss
mit Lasche und Steifen**Bild 8.2** Biegesteife Anschlüsse von Trägern an Stützen

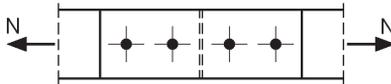
Biegesteife Verbindungen dienen hauptsächlich zur Übertragung von Biegemomenten. Ggf. vorhandene Normal- und Querkräfte haben dagegen meist geringere Bedeutung. Bei den biegesteifen Anschlüssen in Bild 8.2 kann das Biegemoment näherungsweise in eine im Obergurt wirkende Zugkraft und eine im Untergurt wirkende Druckkraft (Kräftepaar) aufgeteilt werden. Zur Übertragung der Teilschnittgrößen sind verschiedene Konstruktionsvarianten möglich. In Bild 8.2a wird die Zugkraft über die Stirnplatte und die Schrauben in die Stütze eingeleitet. In Bild 8.2b wird die Zugkraft zunächst in eine Lasche eingeleitet und die dazu verwendeten Schrauben werden auf Abscheren beansprucht. Die Druckkraft infolge M_y wird in beiden Fällen durch Druckkontakt (unten) übertragen. Wenn man wie in Bild 8.2b Steifen in den Kamern der Stütze anordnet, können wesentlich größere Kräfte – und daher auch größere Biegemomente – eingeleitet werden. Darüber hinaus ist dieser Anschluss steifer, so-

dass dabei in der Regel von einem starren Anschluss ausgegangen werden kann. In Abschnitt 8.3.5 wird ein biegesteifer Trägerstoß mit Laschen behandelt.

Symmetrische Stoßausbildung

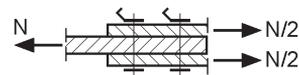
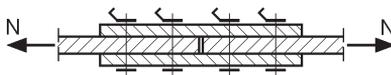
Am Beispiel des Zugstabes in Bild 8.3 wird verdeutlicht, dass die symmetrische Stoßausbildung der unsymmetrischen vorzuziehen ist. Während bei der einseitig angeordneten Lasche eine Exzentrizität und daher in der Verbindungslasche neben der Normalkraft auch ein Versatzmoment auftritt, ist dies beim symmetrisch ausgebildeten Stoß nicht der Fall. Der in Bild 8.3 dargestellte Laschenstoß ist ein typisches Beispiel für eine Scher-/Lochleibungsverbindung. Abschnitt 8.3.3 enthält dazu ein Berechnungsbeispiel.

a) Ansicht Laschenstoß



b) Günstige Verbindung

Symmetrischer Kraftfluss, keine Exzentrizität



c) Ungünstige Verbindung

Unsymmetrischer Kraftfluss, Exzentrizität

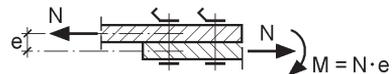
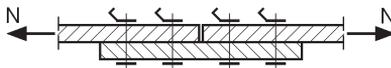
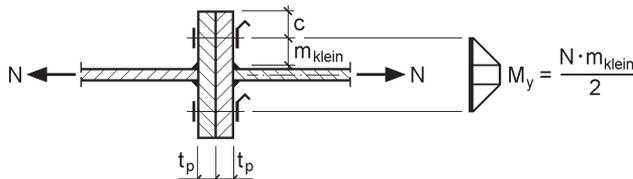


Bild 8.3 Symmetrischer und unsymmetrischer Stoß eines Zugstabes

a) Stirnplattenverbindung mit schmalen Blechen



b) Stirnplattenverbindung mit breiten Blechen

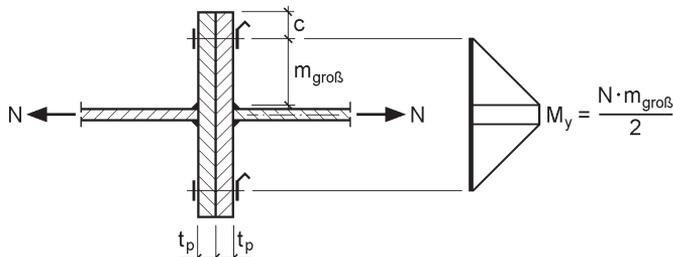


Bild 8.4 Stirnplattenverbindungen mit schmalen bzw. breiten Blechen

Abstützkräfte und Blechbiegung

Ein wichtiger Grundsatz ist bei Verbindungen eine möglichst gedrungene (kompakte) konstruktive Ausbildung, damit die Kräfte ohne große Umwege direkt übertragen werden. Dieser Grundsatz hat allgemeine Gültigkeit und wird in Bild 8.4 für einen Sonderfall erläutert. Dort ist der Stoß eines Zugstabes mit Stirnplatten dargestellt, bei dem die Schrauben unterschiedlich weit von der Stabachse angeordnet sind. Offensichtlich führt die kompakte Verbindung zu höheren Tragfähigkeiten, da die Blechbiegebeanspruchung der Stirnplatten aufgrund des kleineren Abstandes der Schrauben zur Stabachse geringer ist. Bei derartigen Konstruktionen können Abstützkräfte entstehen, die großen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung haben. Der Sachverhalt wird in Abschnitt 8.4 ausführlich erläutert.

Versatz- und Anschlussmomente

Ein weiteres wichtiges Prinzip ist das Konstruieren von Verbindungen unter Beachtung der Systemlinien. Bei Stäben, die ausschließlich durch Normalkräfte beansprucht werden, wie z. B. bei Fachwerken, entsprechen die Systemlinien den Wirkungslinien der Normalkräfte. Im Schnittpunkt der Systemlinien, also der Wirkungslinien von N , treten keine Biegemomente auf, was sich auf die Tragfähigkeit der Konstruktionen günstig auswirkt. An Stellen, wo sich die Systemlinien nicht schneiden, entstehen Versatzmomente, die bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen. Häufig treten im Bereich von geschweißten oder geschraubten Anschlüssen Versatzmomente auf, die wesentlichen Einfluss auf die Bemessung haben.

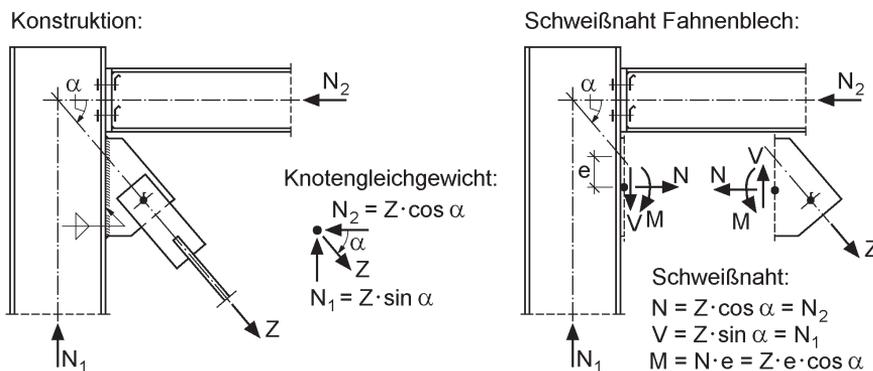
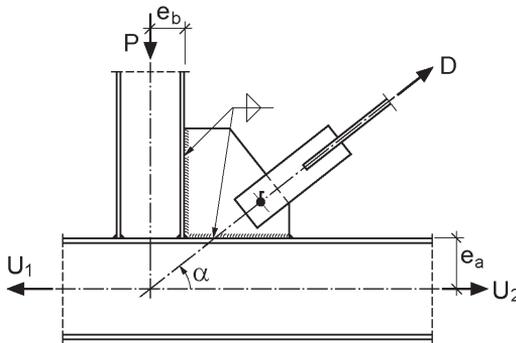


Bild 8.5 Anschluss einer Verbandsdiagonale mit einem Fahnenblech

Als Beispiel wird der in Bild 8.5 dargestellte Anschluss einer Verbandsdiagonale mit einem Fahnenblech betrachtet. Die Wirkungslinien der Normalkräfte schneiden sich in einem Punkt, sodass in den Stäben keine Versatzmomente auftreten. Da das Fahnenblech nur mit der Stütze verbunden ist, wird die Zugkraft unmittelbar in die Stütze eingeleitet. Die vertikale Komponente von Z führt zur Stützennormalkraft N_1 und die horizontale Komponente von Z muss sich mit N_2 im Riegel ausgleichen. Die Skizze auf der rechten Seite des Bildes mit den Schnittgrößen für die Dimensionierung der Schweißnaht zeigt, dass die Wirkungslinie von Z nicht durch den Schwerpunkt des Fahnenblechanschlusses verläuft. Die Schweißnaht ist daher nicht nur für

die Komponenten von Z (N und V) zu bemessen, sondern auch unter Berücksichtigung des Anschlussmomentes $M = N \cdot e$.

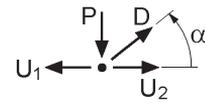
Konstruktion:



Knotengleichgewicht:

$$P = D \cdot \sin \alpha$$

$$U_1 - U_2 = D \cdot \cos \alpha$$



Schnittgrößen in den Schweißnähten der Knotenblechverbindung:

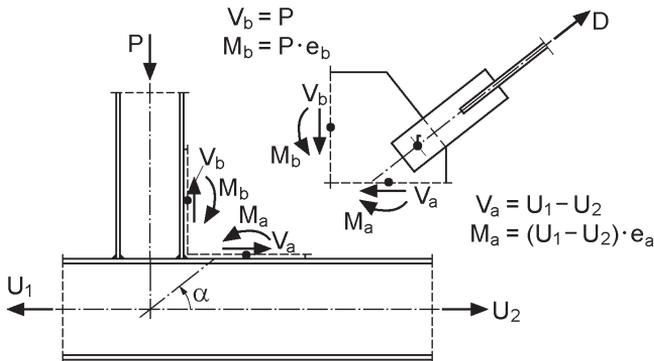


Bild 8.6 Untergurtnode eines Fachwerkträgers

Mit dem Untergurtnode eines Fachwerkträgers in Bild 8.6 soll Folgendes gezeigt werden:

- Im Knoten treten keine Exzentrizitäten auf. Mit den Gleichgewichtsbedingungen erhält man: $U_1 - U_2 = D \cdot \cos \alpha$ sowie $P = D \cdot \sin \alpha$. Die Horizontalkomponente von D muss daher in den Unterzug und die Vertikalkomponente von P kann direkt in den Pfosten übertragen werden.
- Beim Anschluss des Pfostens und der Diagonale an den Unterzug tritt ein Versatzmoment auf. Da die Differenz der Unterzugzugkräfte $U_1 - U_2$ in die Diagonale übertragen werden muss, erhält man als Versatzmoment $(U_1 - U_2) \cdot e_a$.
- Die Schweißnähte zwischen dem Knotenblech und dem Unterzug sowie dem Pfosten werden durch Längskräfte in den Nähten und Anschlussmomente beansprucht. Gemäß Bild 8.6 führen die Gleichgewichtsbedingungen zu: $V_b = P$, $V_a = U_1 - U_2$, $M_a = (U_1 - U_2) \cdot e_a$ und $M_b = P \cdot e_b$.

Ungestützte Bleche mit Druckbeanspruchungen

Druckbeanspruchte Bleche, die senkrecht zur Blechebene bereichsweise seitlich nicht abgestützt worden sind, waren mehrfach die Ursache von Einstürzen mit katastrophalen Folgen. Dabei ist es aufgrund von Konstruktionsfehlern im Bereich von Anschlüssen und Verbindungen zum Versagen durch seitliches Knicken bzw. Beulen der Bleche gekommen.

Um 1970 sind weltweit mehrere Brücken mit breiten Hohlkästen eingestürzt. Diese Katastrophen haben zahlreiche Todesopfer gefordert. Die Hauptursache lag beim Beulen ausgesteifter Hohlkästen, bei denen Bodenbleche im Bereich negativer Biegemomente versagten. In allen Fällen lag die Ursache bei Mängeln in den Konstruktionsdetails.

In Bild 8.7 ist der Baustellenstoß des Bodenblechs der Rheinbrücke Koblenz dargestellt, die 1971 eingestürzt ist. Wie man sieht, ist der Ausschnitt in den Längssteifenstegen (1/2 IPE 330) mit über 400 mm Länge viel zu groß, weil das stark gedrückte Bodenblech dort nicht gehalten wird. Es versagt in diesem Bereich wie ein Knickstab. Einzelheiten zu den Brückeneinstürzen können [53] entnommen werden.

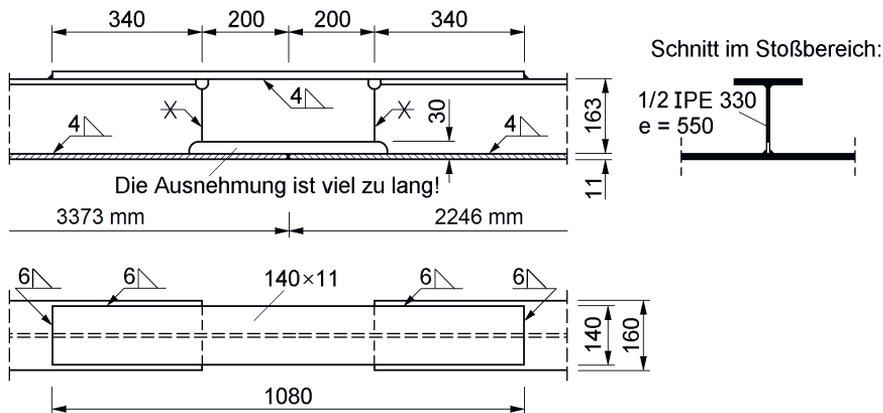


Bild 8.7 Baustellenstoß des Bodenblechs und der Längssteifen bei der Rheinbrücke Koblenz [53]

Beim Neubau des Kraftwerks in Grevenbroich ist es ebenfalls zu einem Schadensfall mit schwerwiegenden Folgen gekommen. Über diesen Einsturz sind zahlreiche Veröffentlichungen mit unterschiedlichen Auffassungen zur Einsturzursache erschienen, auf die hier wegen des Umfangs nicht näher eingegangen werden kann. Fest steht jedoch, dass die Hauptursache beim seitlichen Ausweichen druckbeanspruchter Knotenbleche lag.

Zur Veranschaulichung ist in Bild 8.8 das Versagen der äußeren Druckdiagonale des abgestürzten Fachwerkträgers skizziert. Diese Druckdiagonale ist mit einem soliden Kastenquerschnitt ausgeführt worden, der problemlos in der Lage war, die große Drucknormalkraft in der Diagonale aufzunehmen. Die vier Bleche des Kastenquer-

12.7 Stäbe aus gewalzten I-Profilen

In Bild 12.1 sind drei Basissysteme aus Walzprofilen für Vergleichsrechnungen dargestellt:

- Beidseitig gelenkig gelagerte Stütze (Druckstab), HEA 200, $L = 5$ m
- Beidseitig gelenkig und gabelgelagerter Träger, HEA 400, $L = 7$ m
- Beidseitig gelenkig und gabelgelagerter Träger mit Drucknormalkraft, IPE 300, $L = 6$ m

Für diese Basissysteme sind die maximalen Tragfähigkeiten, die sich mit dem ESV, dem EIV, der FZT und dem Verfahren SIGMA+ ergeben, in Tabellen 12.1 bis 12.3 zusammengestellt. Die Ergebnisse sind in Bild 12.27 dargestellt, damit die verfahrensbedingten Unterschiede anschaulich ersichtlich sind. Abschnitt 12.2 enthält Erläuterungen für die drei Basissysteme, s. insbesondere Bilder 12.2 bis 12.5.

Bild 12.27 enthält beim Verfahren SIGMA+ Ergebnisse, die den elastischen Grenzlasten entsprechen, da sie mit dem erweiterten Spannungsnachweis nach Gl. (12.8) berechnet worden sind. Es ist bemerkenswert, dass sich bei einer Stütze aus S355 mit dem erweiterten Spannungsnachweis (ohne Fließzonen) eine um 15,6 % höhere Tragfähigkeit als mit dem Ersatzstabverfahren ergibt (769 kN anstelle von 665 kN).

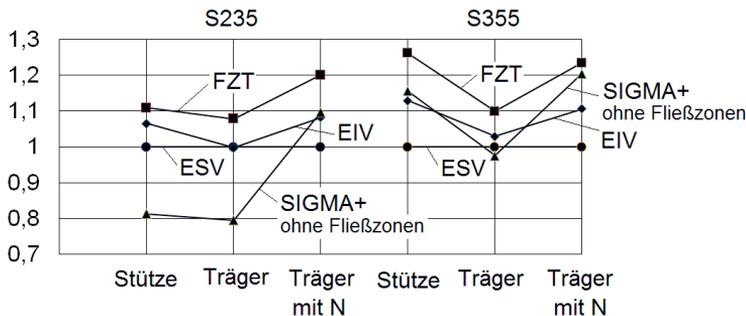


Bild 12.27 Vergleich der max. Tragfähigkeiten für die drei Basissysteme (Bezug ESV)

Die drei Basissysteme werden in den Abschnitten 13.4 bis 13.6 eingehend untersucht und im Hinblick auf das Verständnis ausführlich erläutert. Dies betrifft die unterschiedlichen Berechnungsmethoden der vier Nachweisverfahren und den Einfluss der Stabilität auf die Tragfähigkeit. In Verbindung mit dem Verfahren SIGMA+ ermöglichen die realitätsnahen Berechnungen nach der FZT die Beurteilung der Näherungsverfahren ESV und EIV hinsichtlich ihrer Genauigkeit und verständnisfördernde Erkenntnisse bzgl. der Tragfähigkeit.

Verfahren SIGMA+ mit Fließzonen – Träger in Bild 12.1b aus S235

Mit der Berücksichtigung von Fließzonen können bei der Stütze und dem Träger aus S235 deutlich höhere Tragfähigkeiten als in Bild 12.27 eingetragen nachgewiesen werden, s. Tabellen 12.1 und 12.2. Gemäß Tabelle 12.2 kann der Träger für diesen Fall max $M_y = 387,7$ kNm aufnehmen. Der Nachweis mit Berücksichtigung von

Fließzonen kann mithilfe von Abschnitt 12.6.4 erfolgen. Für $q_z = 38770 \cdot 8/700^2$ kN/cm und mit $v_0 = L/1000 = 0,7$ cm erhält man mit FE-STAB nach Theorie II. Ordnung in Feldmitte folgende Schnittgrößen: $M_y = 38770$ kNcm, $M_z = -479,1$ kNcm und $M_\omega = 15035$ kNcm². Damit ergibt sich die betragsmäßig größte Druckspannung am rechten Rand des Obergurts bei $y = -15$ cm zu:

$$\begin{aligned} \min \sigma_{x,S} &= \frac{M_y}{I_y} \cdot y - \frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{M_\omega}{I_\omega} \cdot \omega \\ &= \frac{38770}{45069} \cdot (-18,55) - \frac{-479,1}{8564} \cdot (-15,0) + \frac{15035}{2893600} \cdot (-276,5) \\ &= -15,96 - 0,84 - 1,44 = -18,24 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Die Überlagerung von $\min \sigma_{x,S}$ mit der Druckeigenspannung $\sigma_{x,ES} = -7,05$ kN/cm² am Gurtrand (s. Bild 12.11b) führt zu:

$$\Sigma \min \sigma_x = \min \sigma_{x,S} + \min \sigma_{x,ES} = -18,24 - 7,05 = -25,29 \text{ kN/cm}^2$$

$$|\Sigma \min \sigma_x| = 25,29 \text{ kN/cm}^2 > f_y/\gamma_M = 23,5 \text{ kN/cm}^2$$

Die Spannungsüberschreitung von 7,6 % zeigt, dass im Bereich des Obergurtrandes auf der rechten Seite eine Fließzone auftritt, die Bild 12.23c entspricht. Ihre Breite b_{FZ} wird näherungsweise mithilfe von Bild 12.24 ermittelt. Die Überlagerung der Spannungen führt in Obergurtmitte zu $\Sigma \sigma_x = -15,96 + 7,05 = -8,91$ kN/cm².

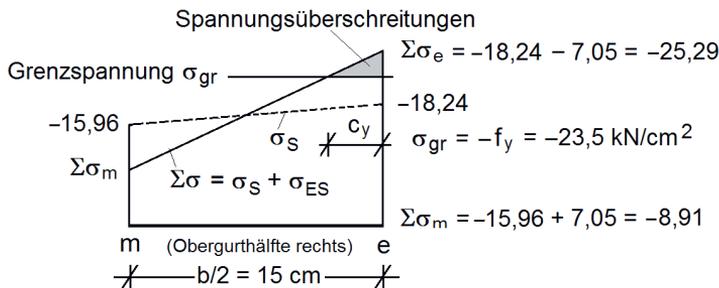


Bild 12.28 Maß c_y bei Spannungsüberschreitungen infolge $\Sigma \sigma_x$

Da die Spannungsüberschreitungen nur den rechten Rand des Obergurts betreffen, wird mithilfe von Bild 12.24 der Bereich c_y mit Spannungsüberschreitungen ermittelt. Mit Bild 12.28 ergibt sich das Maß c_y wie folgt:

$$c_y = \frac{\Sigma \sigma_e - \sigma_{gr}}{\Sigma \sigma_e - \Sigma \sigma_m} \cdot \frac{b}{2} = \frac{-25,29 + 23,5}{-25,29 + 8,91} \cdot \frac{30,0}{2} = 1,639 \text{ cm} \quad (\text{mit: } \sigma_{gr} = -f_y)$$

Mit Abschnitt 12.6.4 und Gl. (12.9) erhält man:

$$b_{FZ} = 2 \cdot c_y = 2 \cdot 1,639 = 3,278 \text{ cm} < 0,4 \cdot b = 12,0 \text{ cm}$$

zeigt anschaulich, dass die Näherungsverfahren ESV und EIV im Vergleich zu den rechnerisch genauen Ergebnissen nach der FZT weit auf der sicheren Seite liegen, was aber nicht verallgemeinert werden kann. Bei diesem Berechnungsbeispiel können mit dem Verfahren SIGMA+ deutlich höhere Tragfähigkeiten als mit dem ESV und dem EIV nachgewiesen werden. Dies ist bemerkenswert, weil dafür Spannungsnachweise ausreichen, die belegen, dass bis zu den mit dem Verfahren SIGMA+ ermittelten maximalen Druckkräften keine Fließzonen auftreten. Die Berechnungen und Nachweise mit den vier Nachweisverfahren (ESV, EIV, FZT und SIGMA+) werden im Folgenden näher erläutert.

Mit dem **Ersatzstabverfahren** erhält man für ein geschweißtes Profil aus S235 als maximale Tragfähigkeit $N = 577$ kN (hier als Druckkraft positiv). Dieser Wert kann mit Abschnitt 6.2 wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{N_{pl}/N_{cr,z}} = \sqrt{1278/1106} = 1,075 \rightarrow \chi_z = 0,497 \text{ (KL c)}$$

$$N = \chi_z \cdot N_{pl}/\gamma_{M1} = 0,497 \cdot 1278/1,1 = 577 \text{ kN}$$

Sofern die Stütze aus S355 ausgeführt wird, ergibt sich $\max N = 667$ kN.

Die Berechnungen mit dem **Ersatzimperfektionsverfahren** werden mit FE-STAB nach Theorie II. Ordnung durchgeführt und es wird dabei gemäß Tabelle 7.1 eine geometrische Ersatzimperfektion von $v_0 = L/200 = 2,5$ cm angesetzt. Für $\max N = 630$ kN (S235) bzw. $\max N = 761$ kN (S355) ermittelt das Programm mit dem TSV maximale Ausnutzungen der plastischen Querschnittstragfähigkeit von 0,999 bzw. 0,998, sodass $E_d/R_d < 1$ ist.

Die **maximale Tragfähigkeit** der Stütze in Bild 12.28 kann mit Berechnungen nach der **Fließzonentheorie** ermittelt werden. Bei den Berechnungen mit FE-STAB-FZ werden geometrische Imperfektionen mit $v_0 = L/1000 = 0,5$ cm (s. Bild 12.10) und die Schweißbeigenspannungen gemäß Bild 12.29 rechts angesetzt. Die Schweißbeigenspannungen werden gemäß Bild 12.21d angenommen, weil davon ausgegangen wird, dass das Profil aus thermisch geschnittenen Blechen hergestellt wird. Für Schweißnahtdicken von $a = 3$ mm erhält man mit Gl. (12.1):

$$a_{f,t} = t_w + 5 \cdot a = 8 + 5 \cdot 3 = 23 \text{ mm} < 0,2 \cdot b = 40 \text{ mm}$$

Der Bereich mit Zugeigenspannungen in der Mitte der Gurte ist 2,3 cm breit. Damit ergeben sich die Druckeigenspannungen wie folgt:

$$\sigma_{f,c} = -\frac{b/16 + a_{f,t}}{b - b/8 - a_{f,t}} \cdot f_y \cdot \varepsilon = -\frac{20/16 + 2,3}{20 - 20/8 - 2,3} \cdot f_y \cdot \varepsilon = -0,2336 \cdot f_y \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_{f,c} = -0,2336 \cdot 23,5 \cdot 1,0 = -5,49 \text{ kN/cm}^2 \text{ (S235)}$$

$$\sigma_{f,c} = -0,2336 \cdot 35,5 \cdot 0,814 = -6,75 \text{ kN/cm}^2 \text{ (S355)}$$

Mit diesen Imperfektionen berechnet FE-STAB-FZ für die Stahlsorte **S235** eine Grenztragfähigkeit von $F_x = 729$ kN. Als maximales Feldmoment ermittelt das Pro-

gramm $M_z = -1383$ kNcm und die in Bild 12.31 dargestellten Fließzonen. Die Grenztragfähigkeit wird erreicht, weil der Verzweigungslastfaktor (Eigenwert) des teilplastizierten Systems $\alpha_{cr,FZ} = 1,00$ ist. Die Last-Verformungs-Kurve hat an ihrem Ende eine horizontale Tangente. In Feldmitte ist die Querschnittstragfähigkeit zu ca. 69 % ausgenutzt.

Für eine Stütze aus **S355** erhält man als Grenztragfähigkeit $F_x = 897$ kN. Die Fließzonen ähneln den in Bild 12.31 dargestellten, sind aber etwas kürzer und die maximale Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit beträgt nur ca. 63 %. In Bild 12.5 sind die Fließzonen für Stützen aus Walzprofilen HEA 200 dargestellt (S235 und S355).

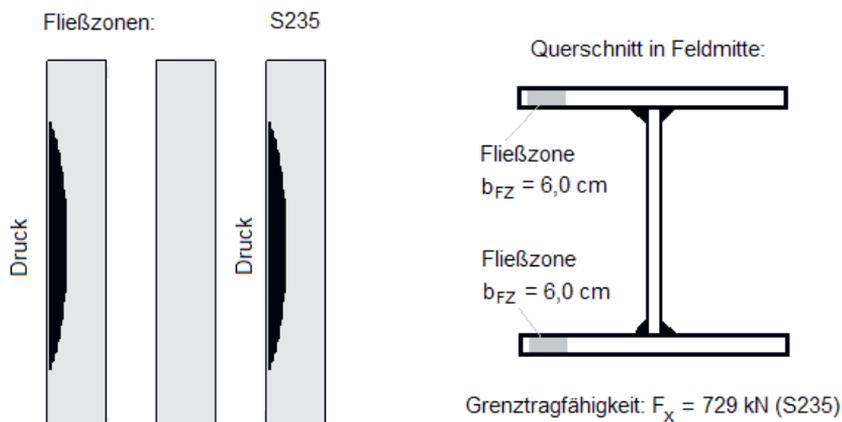


Bild 12.31 Fließzonen im geschweißten Profil der Stütze (S235)

Beim Verfahren **SIGMA+** werden dieselben Schweißbeigenspannungen wie bei der FZT angesetzt. Dies gilt auch für die Annahme der geometrischen Imperfektion $v_0 = L/1000 = 0,5$ cm. Für $F_x = 673$ kN (S235) erhält man mit FE-STAB nach Theorie II. Ordnung in Feldmitte ein Biegemoment um die schwache Achse von $M_z = -859$ kNcm und als Schnittgröße $N = -673$ kN. Der Verzweigungslastfaktor beträgt $\alpha_{cr} = 1,64$ und ist damit größer als eins. Die betragsmäßig größte Druckspannung tritt an den Rändern der Gurte bei $y = -10,0$ cm auf:

$$\min \sigma_{x,S} = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} \cdot y = \frac{-673}{54,4} - \frac{-859}{1334} \cdot (-10,0) = -12,37 - 6,44 = -18,81 \text{ kN/cm}^2$$

Da an den Rändern der Gurte gemäß Bild 12.29 **Zugeigenspannungen** auftreten, liegt der maßgebende Bemessungspunkt bei $y = -b/2 + b/16 = -10,0 + 20,0/16 = -8,75$ cm. Dort erhält man:

$$\sigma_{x,S} = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} \cdot y = -12,37 - \frac{-859}{1334} \cdot (-8,75) = -12,37 - 5,63 = -18,00 \text{ kN/cm}^2$$

An dieser Stelle wirkt, wie bei den Berechnungen nach der FZT ermittelt, eine Druckeigenspannung von $\sigma_{f,c} = -5,49 \text{ kN/cm}^2$ (S235), sodass die Überlagerung, wie in Bild 12.32 dargestellt, mit $\sigma_{x,S}$ zu $\Sigma \min \sigma_x = -18,00 - 5,49 = -23,49 \text{ kN/cm}^2$ führt. Damit kann der Nachweis

$$|\Sigma \min \sigma_x| = 23,49 \text{ kN/cm}^2 < 23,50 \text{ kN/cm}^2 = f_{y,S235} / \gamma_M$$

erfolgreich geführt werden. Die Berechnungen zeigen, dass $F_x = 673 \text{ kN}$ die elastische Grenzlast für eine Stütze aus S235 ist. Fließzonen treten nicht auf.

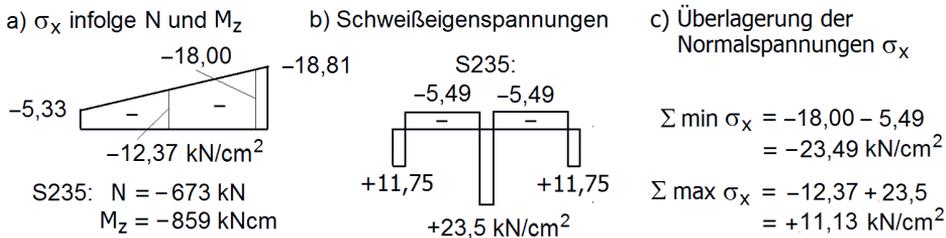


Bild 12.32 Spannungen in den Gurten der Stütze (Feldmitte) beim Verfahren SIGMA+

Bei analoger Vorgehensweise ergibt sich für eine Stütze aus S355 Folgendes:

$$\sigma_{x,S} = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} \cdot y = \frac{-863}{54,4} - \frac{-1964}{1334} \cdot (-8,75) = -15,86 - 12,88 = -28,74 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Sigma \min \sigma_x = -28,74 - 6,75 = -35,49 \text{ kN/cm}^2$$

$$|\Sigma \min \sigma_x| = 35,49 \text{ kN/cm}^2 < 35,5 \text{ kN/cm}^2 = f_{y,S355} / \gamma_M$$

Für $F_x = 863 \text{ kN}$ ergibt sich ein Verzweigungslastfaktor von $\alpha_{cr} = 1106/863 = 1,28$. Er ist kleiner als 1,5, sodass mit Abschnitt 12.6.4 durch die Berücksichtigung kleiner Fließzonen keine größere Belastung als 863 kN ermittelt werden kann. Bei der Stütze aus S235 ergibt sich für $\max N = 673 \text{ kN}$ $\alpha_{cr} = 1,64 > 1,5$, sodass eine geringfügig größere Belastung berechnet werden könnte.

12.8.2 Berechnungsbeispiel Träger

Als Beispiel wird der 7 m lange Einfeldträger in Bild 12.1b, der durch eine Gleichstreckenlast q_z am Obergurt belastet wird (s. Abschnitt 12.1) gewählt und das Walzprofil wird durch den in Bild 12.33 dargestellten geschweißten Dreiblechquerschnitt ersetzt. Seine Fläche ($156,0 \text{ cm}^2$) ist etwas kleiner als beim Walzprofil HEA 400 ($A = 159,0 \text{ cm}^2$). Das geschweißte I-Profil besteht aus thermisch geschnittenen Blechen, die durch Schweißnähte $a = 4 \text{ mm}$ verbunden werden.

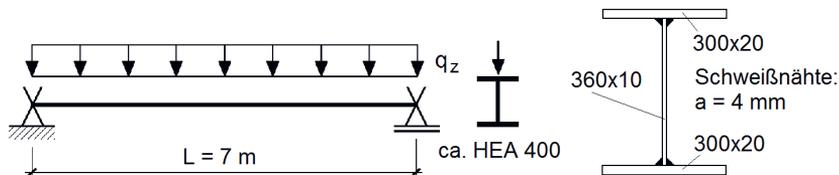


Bild 12.33 Träger aus einem geschweißten I-Profil (ca. HEA 400)

Gemäß Tabelle 12.6 führen die Berechnungen nach der FZT zu den größten Tragfähigkeiten. Die Ergebnisse der Näherungsverfahren erfüllen daher die Bedingung, dass ihre Ergebnisse im Vergleich zur FZT auf der sicheren Seite liegen. Wenn man das ESV mit dem Verfahren SIGMA+ vergleicht, ist erkennbar, dass beim ESV im gedrückten Obergurt eine kleine Fließzone (S235) bzw. keine Fließzone (S355) auftritt. Der geringste Zeitaufwand für Nachweise wird benötigt, wenn man das EIV und für die Berechnungen FE-STAB verwendet. Die Berechnungen und Nachweise mit den vier Nachweisverfahren (ESV, EIV, FZT und SIGMA+) werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 12.6 Geschweißter Träger in Bild 12.33 ($L = 7$ m, ca. HEA 400)

Stahl	S235		S355	
	max M_y	Vergleich	max M_y	Vergleich
ESV (mit $\chi_{LT,mod}$)	414,7 kNm	100 %	521,0 kNm	100 %
EIV mit $v_0 = L/150$	428,7 kNm	103,4 %	551,2 kNm	105,8 %
FZT (Grenzlast)	478,4 kNm	115,4 %	631,7 kNm	121,2 %
SIGMA+ (s. Text)	398,1 kNm	96,0 %	571,5 kNm	109,7 %
Biegedrillknickmoment $M_{cr,y} = 825,9$ kNm (Feldmitte); $q_z = \max M_y \cdot 8/L^2$				

Wenn man das **Ersatzstabverfahren** anwendet, ist es zweckmäßig, die erforderlichen Berechnungen mit dem Programm FE-STAB durchzuführen, da damit alle Querschnittswerte und auch das plastische Biegemoment $M_{pl,y}$ ermittelt werden können (s. Blatt Q-Typ 3). Das ideale BDk-Moment $M_{cr,y}$ wird mit dem Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,y}$ berechnet, indem eine Gleichstreckenlast q_z eingegeben wird, die die kritische Belastung nicht überschreitet. Für einen Träger aus S235 können die Berechnungen wie folgt durchgeführt werden:

$$\max M_y = 414,7 \text{ kNm} = 41470 \text{ kNcm (s. Tabelle 12.6)}$$

$$q_z = \max M_y \cdot 8/L^2 = 41470 \cdot 8/700^2 = 0,6771 \text{ kN/cm}$$

$$M_{pl,y} = 61194 \text{ kNcm (mit FE-STAB, Blatt Q-Typ 3, } \gamma_M = 1,0)$$

$$\alpha_{cr,y} = 1,9915 \text{ (mit FE-STAB, s. Blatt Ausgabe)}$$

$$M_{cr,y} = \alpha_{cr,y} \cdot \max M_y = 1,9915 \cdot 41470 = 82588 \text{ kNcm}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors mit Abschnitt 6.4.1:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{M_{pl,y}/M_{cr,y}} = \sqrt{61194/82588} = 0,861$$

$$\chi_{LT,mod} = 0,746 \text{ (BDK-Linie c, mit } k_c = 0,94)$$

Damit ergibt sich folgender Nachweis:

$$\frac{\max M_y}{\chi_{LT,mod} \cdot M_{pl,y}/\gamma_{MI}} = \frac{41470}{0,746 \cdot 61194/1,1} = 0,999 < 1$$

Für einen Träger aus S355 erhält man:

$$\frac{\max M_y}{\chi_{LT,mod} \cdot M_{pl,y}/\gamma_{MI}} = \frac{52100}{0,620 \cdot 92442/1,1} = 1,000 = 1$$

Die Berechnungen mit dem **Ersatzimperfektionsverfahren** werden in Abschnitt 12.4 für den Träger in Bild 12.1b (HEA 400) ausführlich erläutert. Für den geschweißten Träger in Bild 12.33 wird gemäß Tabelle 7.2 eine geometrische Ersatzimperfektion von $v_0 = L/150 = 4,67$ cm angesetzt. Bei der Schnittgrößenermittlung mit FE-STAB ergeben sich in Feldmitte nach Theorie II. Ordnung bemessungsrelevante Nachweisschnittgrößen M_y , M_z und M_ω . Für Gleichstreckenlasten q_z infolge $\max M_y$ gemäß Tabelle 12.6 ermittelt das Programm mit dem TSV maximale plastische Querschnittstragfähigkeiten von 0,998 (S235) bzw. 0,992 (S355), sodass der Nachweis $E_d/R_d < 1$ erfüllt ist.

Die **maximale Tragfähigkeit** kann mit Berechnungen nach der **Fließzonentheorie** ermittelt werden. Bei den Berechnungen mit FE-STAB-FZ werden geometrische Imperfektionen mit $v_0 = L/1000 = 0,7$ cm (s. Bild 12.10) und die Schweißeigenspannungen gemäß Bild 12.15b für Profile aus thermisch geschnittenen Blechen angesetzt. Für Schweißnahtdicken von $a = 4$ mm erhält man mit Gl. (12.1):

$$a_{f,t} = t_w + 5 \cdot a = 10 + 5 \cdot 4 = 30 \text{ mm} < 0,2 \cdot b = 60 \text{ mm}$$

Der Bereich mit Zugeigenspannungen in der Mitte der Gurte ist 3,0 cm breit. Mit Gl. (12.3) ergeben sich die Druckeigenspannungen wie folgt:

$$\sigma_{f,c} = -\frac{b/16 + a_{f,t}}{b - b/8 - a_{f,t}} \cdot f_y \cdot \varepsilon = -\frac{30/16 + 3,0}{30 - 30/8 - 3,0} \cdot f_y \cdot \varepsilon = -0,2097 \cdot f_y \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_{f,c} = -0,2097 \cdot 23,5 \cdot 1,0 = -4,93 \text{ kN/cm}^2 \text{ (S235)}$$

$$\sigma_{f,c} = -0,2097 \cdot 35,5 \cdot 0,814 = -6,06 \text{ kN/cm}^2 \text{ (S355)}$$

Mit diesen Imperfektionen berechnet FE-STAB-FZ für die Stahlsorte **S235** eine Grenztragfähigkeit von $\max M_y = 478,4$ kNm. Darüber hinaus ergeben sich in Feldmitte die Schnittgrößen $M_z = -22,31$ kNm und $M_\omega = 3,648$ kNm² und die in Bild 12.34 dargestellten Fließzonen. In Feldmitte ist die Querschnittstragfähigkeit zu ca. 84 % ausgenutzt. Die Grenztragfähigkeit wird erreicht, weil der Verzweigungslastfaktor (Eigenwert) des teilplastizierten Systems $\alpha_{cr,FZ} = 1,00$ ist. Die Last-Verfor-

mungs-Kurve hat an ihrem Ende eine horizontale Tangente. Wie zu erwarten, ergeben sich im Untergurt Fließzonen durch Zugspannungen infolge von M_y , M_z und M_{ω} sowie durch Zugeigenspannungen. Im gedrückten Obergurt entstehen auf der rechten Seite ausgeprägte Fließbereiche.

Für einen Träger aus **S355** erhält man als Grenztragfähigkeit $\max M_y = 631,7 \text{ kNm}$. Die Fließzonen ähneln den in Bild 12.34 dargestellten, sind aber etwas kürzer und die maximale Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit beträgt ca. 75 %.

Die Berechnungen nach der FZT führen zu Verschiebungen v und w sowie Torsionsverdrehungen ϑ . In Bild 12.35 sind die Last-Verformungs-Kurven für die Verschiebungen $v_0 + v$ in Feldmitte dargestellt, damit ersichtlich ist, dass geometrische Imperfektionen $v_0 = L/1000 = 0,7 \text{ cm}$ angesetzt worden sind. Da sich die Lastfaktoren der vertikalen Achsen auf das Ergebnis mit der ESV beziehen, sind die Unterschiede zur FZT und zum Verfahren SIGMA+ unmittelbar erkennbar. Bild 12.35 zeigt, dass die seitlichen Verschiebungen v klein sind. Die Last-Verformungs-Kurven für das EIV liegen, ähnlich wie in Bild 12.30, weiter rechts. Sie sind nicht dargestellt, weil die Verformungen beim EIV keine baupraktische Bedeutung haben.

Fließzonen im Träger aus S235:

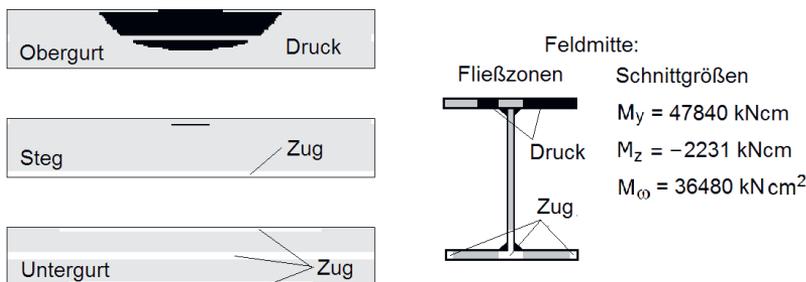


Bild 12.34 Fließzonen im geschweißten Profil des Trägers in Bild 12.33 (S235)

Beim Verfahren **SIGMA+** werden dieselben Schweißzugspannungen wie bei der FZT angesetzt. Dies gilt auch für die Annahme der geometrischen Imperfektion $v_0 = L/1000 = 0,7 \text{ cm}$. Da der Untergurt des Trägers durch große Zugspannungen beansprucht wird und dort gemäß Bild 12.15b (Bleche thermisch geschnitten) teilweise auch hohe Schweißzugspannungen vorhanden sind, wird der Querschnitt in geeigneter Weise reduziert. Wie in Bild 12.22c dargestellt, sind davon der Steg am unteren Ende ($0,1 \cdot h_w = 3,6 \text{ cm}$) und der Untergurt im Bereich der Schweißnähte ($a_{ft} = 3,0 \text{ cm}$) betroffen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Randbereiche des Untergurts auf $b_f/16 = 30,0/16 = 1,87 \text{ cm}$ durch hohe Zugspannungen beansprucht werden und dass somit örtliche Fließzonen entstehen. Dort werden daher die Blechdicken so reduziert, dass die Zugeigenspannungen ($f_y \cdot \varepsilon$ bzw. $0,5 \cdot f_y \cdot \varepsilon$) gemäß Bild 12.15 von außen liegenden Bereichen der Bleche aufgenommen werden. Diese Vorgehensweise führt zu den in Bild 12.36 dargestellten Querschnitten mit reduzierten Blechdicken t , die den Berechnungen zugrunde gelegt werden.

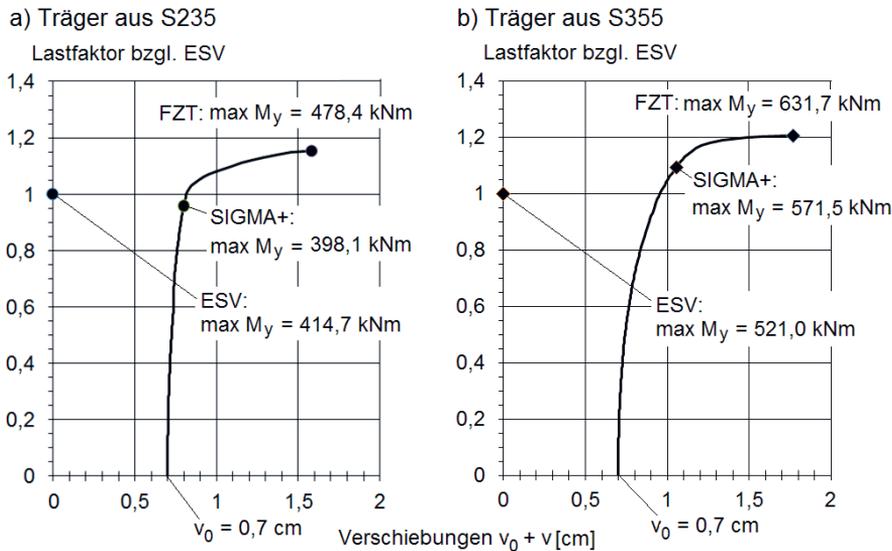
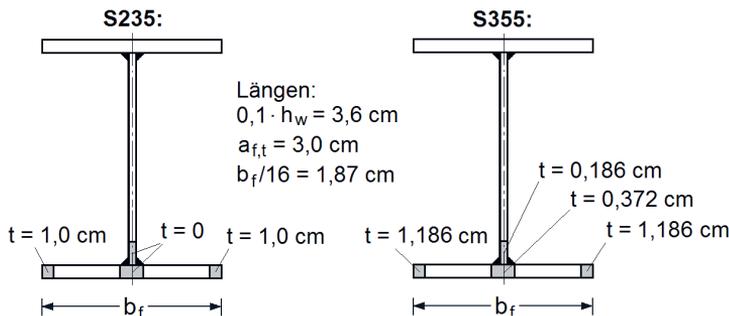


Bild 12.35 Last-Verformungs-Kurven für den Träger in Bild 12.33 aus S235 und S355

Bild 12.36 Blechdicken t im Bereich der Querschnittsreduktionen

Da die Tragfähigkeit des Trägers in Bild 12.33 beim Verfahren SIGMA+ mit den in Bild 12.36 dargestellten Querschnitten untersucht wird, ist es zweckmäßig, zunächst die Querschnittswerte mit dem Programm QSW-Bleche zu ermitteln, weil damit die reduzierten Blechdicken problemlos berücksichtigt werden können. Anschließend werden die Querschnittswerte in FE-STAB (Blatt Q-Typ 1) eingegeben und die Schnittgrößen werden mit $v_0 = 0,7$ cm nach Theorie II. Ordnung berechnet. Damit erhält man die maßgebenden Schnittgrößen M_y , M_z und M_ω in Feldmitte. Diese Schnittgrößen werden in das Programm QSW-Bleche übertragen und damit die Normalspannungen σ_x berechnet.

Bei den Berechnungen mit FE-STAB ergeben sich Verzweigungslastfaktoren von $\alpha_{cr} = 2,010$ (S235) und $1,404$ (S355). Beide Faktoren sind größer als eins, sodass sich beide Träger im stabilen Gleichgewicht befinden. Da den Berechnungen die Quer-