

# Der Ingenieurbau

## ■ Bemessung

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

## Verzeichnis der Verfasser

## Bemessung im Betonbau

1	Einleitung . . . . .	1
2	Materialverhalten (engl.: material properties) . . . . .	2
2.1	Beton (engl.: concrete) . . . . .	2
2.2	Stahl (engl.: steel) . . . . .	13
2.2.1	Betonstahl (engl.: reinforcement, steel) . . . . .	13
2.2.2	Spannstahl (engl.: prestressing steel) . . . . .	17
2.3	Zusammenwirken von Beton und Stahl (Verbund; engl.: bond) . . . . .	20
2.3.1	Phänomenologische Beschreibung des Zusammenwirkens von Beton und Stahl (engl.: bond behaviour) . . . . .	20
2.3.2	Mechanische Zusammenhänge für den mittig beanspruchten, symmetrisch bewehrten Stahlbetonstab (engl.: response of members subjected to axial load) . . . . .	21
2.3.2.1	Ungerissener Beton (engl.: uncracked concrete) . . . . .	21
2.3.2.2	Rißbildung (engl.: cracking) . . . . .	22
3	Schnittgrößen und Nachweis der Funktionsfähigkeit von Bauwerken und Bauteilen. Allgemeine Bemessungsgrundlagen . . . . .	28
4	Vorspannung von Tragwerken (engl.: prestressing of structures) . . . . .	40
4.1	Zur Vorspannung von Tragwerken insbesondere im Betonbau . . . . .	40
4.2	Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen aus Vorspannung bei äußerlich statisch bestimmten Systemen . . . . .	46
4.2.1	Zentrisch vorgespannter Stab . . . . .	46
4.2.1.1	Spannen vor dem Erhärten des Betons . . . . .	46
4.2.1.2	Spannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .	50
4.2.1.3	Einige Bemerkungen zur Vorbemessung . . . . .	52
4.2.1.4	Einige Bemerkungen zu den Querschnittswerten . . . . .	54
4.2.1.5	Zahlenbeispiele . . . . .	55
4.2.1.5.1	Zentrisch vorgespannte Stütze, Spannbeton mit sofortigem Verbund . . . . .	55
4.2.1.5.2	Zentrisch vorgespannte Stütze, Spannbeton mit nachträglichem Verbund . . . . .	56
4.2.2	Vorspannen des Biegebalkens . . . . .	60
4.2.2.1	Spannen vor dem Erhärten des Betons . . . . .	60
4.2.2.2	Spannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .	63
4.2.2.3	Einfluß des Reibungswiderstands beim Vorspannen . . . . .	69
4.2.2.4	Zahlenbeispiele . . . . .	73
4.2.2.4.1	Biegebalken, Spannen vor dem Erhärten des Betons . . . . .	73
4.2.2.4.2	Biegebalken, Spannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .	80

4.3	Schnittgrößen aus Vorspannung bei statisch unbestimmten Systemen . . . .	85
4.3.1	Statisch Unbestimmte und elastische Formänderungen aus Vorspannung beim statisch unbestimmt gelagerten, zentrisch vorgespannten System . . .	85
4.3.2	Der Lastfall Vorspannung bei gekrümmt geführten Spanngliedern in statisch unbestimmten Systemen . . . . .	89
4.3.3	Zahlenbeispiel . . . . .	97
4.4	Kriechen und Schwinden des Betons (engl.: creep and shrinkage of concrete) . . . . .	102
4.4.1	Zeitabhängige Spannungen und Verzerrungen infolge Kriechen und Schwinden des Betons . . . . .	102
4.4.1.1	Das erweiterte Hookesche Gesetz für den bewehrten Konstruktionsbeton	102
4.4.1.2	Betonverzerrungen unter konstanten Spannungen . . . . .	104
4.4.1.2.1	Anteile der Betonverzerrung . . . . .	104
4.4.1.2.2	Ermittlung der Kriech- und Schwindmaße nach DIN 4227–Teil 1, Ausgabe 1988 . . . . .	105
4.4.1.3	Betonverzerrungen unter veränderlichen Betonspannungen . . . . .	108
4.4.2	Spannkraftverlust infolge Kriechen und Schwinden des Betons bei äußerlich statisch bestimmten Systemen . . . . .	121
4.4.2.1	Der zentrisch vorgespannte Stab . . . . .	121
4.4.2.1.1	Spannkraftverlust . . . . .	121
4.4.2.1.2	Zahlenbeispiel . . . . .	123
4.4.2.2	Biegebalken . . . . .	124
4.4.2.2.1	Vorspannung mit sofortigem Verbund . . . . .	124
4.4.2.2.2	Vorspannung mit nachträglichem Verbund . . . . .	128
4.4.2.2.3	Zahlenbeispiel . . . . .	130
4.4.2.3	Ermittlung der Spannkraftverluste mit Hilfe der c-Werte . . . . .	135
4.4.2.4	Näherungsweise Ermittlung der Spannkraftverluste . . . . .	136
4.4.2.5	Mehrsträngige Vorspannung . . . . .	138
4.4.3	Spannkraftverluste infolge Kriechen und Schwinden des Betons bei äußerlich statisch unbestimmten Systemen . . . . .	140
4.4.3.1	Allgemeines . . . . .	140
4.4.3.2	Ableitung der Beziehungen anhand des in Abschnitt 4.3.1 behandelten einhüftigen Rahmens . . . . .	140
4.4.3.3	Zahlenbeispiel . . . . .	147
4.4.4	Schnittgrößenumlagerung bei Systemänderungen infolge Behinderung der Kriechverzerrung des Betons . . . . .	151
4.4.4.1	Einführende Betrachtungen . . . . .	151
4.4.4.2	Schnittgrößenumlagerung infolge Behinderung der Kriechverzerrungen bei Zusammenfügen zweier gleich alter Fertigteilträger zu einem Zweifeldträger . . . . .	152
4.4.4.3	Schnittgrößenumlagerung bei affin zum Kriechen verlaufenden Systemänderungen am Beispiel einer langsamen Senkung der Innenstütze eines Zweifeldträgers . . . . .	155
4.4.4.4	Schnittgrößenumlagerung bei plötzlichen Systemänderungen am Beispiel einer plötzlichen Senkung der Innenstütze eines Zweifeldträgers . . . . .	159
4.4.4.5	Schnittgrößenumlagerungen bei abschnittweisem Bauen . . . . .	161
4.5	Einleitung konzentrierter Kräfte . . . . .	168
4.5.1	Allgemeine Betrachtungen . . . . .	168
4.5.2	Verankerung einer einzelnen Ankerkraft . . . . .	170
4.5.2.1	Ergebnisse aus der Scheibentheorie . . . . .	170

4.5.2.1.1	Grundgleichungen	170
4.5.2.1.2	Halbscheibe unter Teilstreckenlast	172
4.5.2.1.3	Halbscheibe unter Einzellast	176
4.5.2.1.4	Halbstreifen	177
4.5.2.2	Einfache Ersatzmodelle	181
4.5.2.3	Geneigte Spanngliedverankerung am Trägerende	184
4.5.3	Verankerung mehrerer Spannglieder	185
4.5.4	Spaltzugwirkung senkrecht zur Mittelebene des Trägersteges	186
4.5.5	Einleitung von Spannkraften und Auflagerkräften am Balkenende	187
4.5.6	Einleitung von Kräften im Innern eines Bauteils	189
4.5.7	Vorspannung und Koppelung von Spanngliedern an Bauabschnittsgrenzen	196
4.5.7.1	Allgemeine Betrachtungen	196
5	Stabförmige, mittig beanspruchte, bewehrte Druckglieder ohne Knickgefahr	199
5.1	Bügelbewehrte Stahlbetonstützen	200
5.2	Umschnürte (wendelbewehrte) Druckglieder	205
6	Zugglieder	209
6.1	Allgemeines	209
6.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	210
6.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	212
7	Beanspruchung durch Biegung und Längskraft	215
7.1	Grenzzustände der Tragfähigkeit	215
7.1.1	Allgemeines	215
7.1.2	Voraussetzungen	216
7.1.3	Überwiegende Biegung, Querschnitte mit rechteckiger Druckzone	218
7.1.4	Bemessungshilfen für überwiegende Biegung mit Längskraft für Querschnitte mit rechteckiger Druckzone	225
7.1.4.1	Allgemeines	225
7.1.4.2	Allgemeines Bemessungsdiagramm	225
7.1.4.3	$k_d$ -Verfahren	228
7.1.4.4	Verwendung von Bemessungstabellen mit dimensionslosen Beiwerten für Querschnitte mit rechteckiger Druckzone	235
7.1.4.4.1	Einfache Bewehrung	235
7.1.4.4.2	Querschnitte mit Zug- und Druckbewehrung	237
7.1.5	Interaktionsdiagramme für symmetrisch bewehrte Rechteckquerschnitte	241
7.1.6	Plattenbalken	251
7.1.6.1	Tragverhalten und mitwirkende Plattenbreite	251
7.1.6.2	Bemessung für negative Momente bei oben liegender Druckplatte	256
7.1.6.3	Bemessung von Plattenbalken mit oben liegender Druckplatte für positive Momente	256
7.1.7	Einfluß der Vordehnung des Spannstahls bei Vorspannung mit Verbund	261
7.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	262
8	Beanspruchung durch Querkraft	262
8.1	Allgemeines	262
8.2	Biegung mit Längs- und Querkraft für den homogenen, isotropen Balken	264
8.3	Biegung mit Längs- und Querkraft für den gerissenen Stahlbetonträger	267
8.3.1	Allgemeines	267
8.3.2	Tragfähigkeit von Bauteilen ohne Schubbewehrung	268
8.3.3	Tragfähigkeit von Bauteilen mit Schubbewehrung	270
8.3.3.1	Phänomenologische Beschreibung	270

8.3.3.2	Fachwerkmodell	272
8.4	Nach dem EC2, T.1-1 zu führende Nachweise	275
8.4.1	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft	275
8.4.2	Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft	276
8.4.2.1	Standardverfahren	276
8.4.2.2	Verfahren mit veränderlicher Druckstrebenneigung	277
8.5	Anforderungen für die Schubbewehrung an die konstruktive Durchbildung	278
9	Beanspruchung durch Torsion und kombinierte Beanspruchungen	280
9.1	Phänomenologische Betrachtungen	280
9.2	Tragglieder aus Konstruktionsbeton	282
9.2.1	Ermittlung der Torsionsbewehrung	282
9.2.1.1	Kastenmodell	283
10	Nachweise für die Grenzzustände der Tragfähigkeit am verformten System (Theorie II. Ordnung; Biegeknicksicherheitsnachweise; Sicherheit gegen Auskippen)	285
10.1	Phänomenologische Betrachtungen	285
10.2	Eulersche Knicklasten	287
10.3	Ausmittig gedrückter Stab	291
10.4	Biegeknicksicherheitsnachweis nach EC2, T.1-1	295
10.4.1	Allgemeine Grundsätze	295
10.4.2	Einzeldruckglieder	299
10.4.2.1	Schlankheit und Ausmitte	299
10.4.2.2	Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Theorie II. Ordnung	302
10.4.3	Biege- und Torsionssteifigkeit	304
10.5	Näherungsverfahren zur Ermittlung der Kippstabilität (Exzentrisches Kippen) gabelgelagerter Träger unter Gleichstreckenlast $q_z$	310
10.6	Modellstützenverfahren als Näherungsverfahren zum Nachweis der Biegeknicksicherheit	314
11	Ergänzungen zu den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und zu Anforderungen zur konstruktiven Durchbildung	315
11.1	Grundsätzliches	315
11.2	Konstruktive Anforderungen an die bauliche Durchbildung	316
11.3	Beschränkung der Rißbreiten	321
11.4	Verankerungslängen	324
12	Bezeichnungen	326
13	Literatur	328

## Plastizitätstheorie im Betonbau

1	Grundlagen der Plastizitätstheorie	333
1.1	Materialverhalten	333
1.2	Grenzwertsätze der Plastizitätstheorie	334
1.3	Nachweis und Bemessung: Baustatische Lösungsverfahren	340
2	Balken und Scheiben	344
2.1	Einführung	344
2.2	Stahlbetonbalken	344
2.3	Träger unter Torsionsbeanspruchung	351
2.4	Konsolen	353

2.5	Rahmenknoten .....	353
2.6	Wände .....	357
3	Platten .....	359
3.1	Bemessung nach dem statischen Grenzwertsatz .....	359
3.2	Nachweis nach dem kinematischen Grenzwertsatz .....	363
4	Literatur .....	366

## **Bemessung im Mauerwerksbau**

1	Einleitung .....	367
1.1	Stand und Entwicklung .....	367
1.2	Mauerwerksnormen .....	368
1.3	Neue Teile 1 und 2 der DIN 1053 .....	371
2	Grundlagen .....	372
2.1	Allgemeines .....	372
2.2	Baustoffe .....	372
2.2.1	Vorbetrachtung .....	372
2.2.2	Mauersteine .....	372
2.2.3	Mörtel .....	376
2.3	Mauerwerk .....	376
2.4	Druckfestigkeit .....	378
2.4.1	Bruchmechanismus von Mauerwerk .....	378
2.4.2	Festlegungen in DIN 1053-1 .....	379
2.4.2.1	Allgemeines .....	379
2.4.2.2	Mauerwerk nach Eignungsprüfung .....	379
2.4.2.3	Rezeptmauerwerk .....	381
2.4.3	Eurocode 6 .....	381
2.5	Zugfestigkeit .....	383
2.5.1	Allgemeines .....	383
2.5.2	Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge .....	383
2.5.3	Zugfestigkeit rechtwinklig zur Lagerfuge .....	386
2.6	Schubfestigkeit .....	386
2.7	Spannungs-Dehnungs-Verlauf .....	392
2.8	Sicherheitskonzept .....	395
3	Bemessung .....	397
3.1	Allgemeines .....	397
3.2	Schnittgrößen infolge von Lasten .....	399
3.2.1	Auflagerkräfte aus Decken .....	399
3.2.2	Knotenmomente .....	399
3.2.3	Wind .....	400
3.3	Wand-Decken-Knoten .....	400
3.3.1	Vorbetrachtung .....	400
3.3.2	Knoten- und Wandmomente .....	400
3.3.3	Ausmitten .....	404
3.4	Knicksicherheitsnachweis .....	408
3.4.1	Grundlagen .....	408
3.4.1.1	Stabilitätstheorie .....	408
3.4.1.2	Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden .....	408

3.4.1.3	Voraussetzungen in den Mauerwerksnormen	410
3.4.1.4	Wandverformungen nach Theorie II. Ordnung	410
3.4.2	Halterung der Wände	414
3.4.3	Knicklängen	416
3.4.4	Grenzbreiten	419
3.4.5	Schlankheit	420
3.5	Vereinfachtes und genaueres Berechnungsverfahren	421
3.6	Abminderungsfaktoren	423
3.6.1	Allgemeines	423
3.6.2	Abminderungsfaktoren nach den Normen	424
3.6.2.1	DIN 1053-1, genaueres Berechnungsverfahren	424
3.6.2.2	DIN 1053-1, vereinfachtes Berechnungsverfahren	424
3.6.2.3	Eurocode 6	426
3.7	Nachweise für Mauerwerk	427
3.7.1	Nachweis auf Druck	427
3.7.1.1	Allgemeines	427
3.7.1.2	Nachweis nach DIN 1053-1	429
3.7.1.3	Waagerechte Belastung rechtwinklig zur Außenwand	433
3.7.1.4	Weitere Nachweise nach DIN 1053-1	433
3.7.1.5	Nachweis nach EC 6	434
3.7.2	Nachweis auf Zug	435
3.7.2.1	Nachweis nach DIN 1053-1	435
3.7.2.2	Nachweis nach EC 6	436
3.7.3	Schubnachweis	436
3.7.3.1	Allgemeines	436
3.7.3.2	Nachweis nach DIN 1053-1	438
3.7.3.3	Nachweis nach EC 6	440
3.8	Aussteifung und Gesamtstabilität	442
3.8.1	Vorbemerkungen	442
3.8.2	Gesamtstabilität	442
3.8.3	Horizontallasten	443
3.8.3.1	Allgemeines	443
3.8.3.2	Windlast	443
3.8.3.3	Lotabweichung	444
3.8.3.4	Haltekräfte nach Theorie II. Ordnung	444
3.8.4	Bauwerksaussteifung	445
3.8.4.1	Raumstabilität	445
3.8.4.2	Querschnitte von Aussteifungswänden	447
3.8.4.3	Wahl der Aussteifungswände	448
3.8.4.4	Unregelmäßigkeiten der Aussteifung	449
3.8.4.5	Aussteifung niedriger Bauwerke	449
3.8.5	Aussteifungswand	450
3.8.5.1	Aufteilung der Horizontallasten	450
3.8.5.2	Nachweis des Wandquerschnittes	454
3.8.5.3	Forderung zur Bauwerksaussteifung in den Normen	454
3.8.6	Kriterien zur Beurteilung der Bauwerksaussteifung	456
3.8.6.1	Allgemeines	456
3.8.6.2	Herleitung des Kriteriums	456
3.8.6.3	Entfallen des Windnachweises	458
3.8.6.4	Schubspannungen	458

3.8.6.5	Kriterium für einfache niedrige Mauerwerksbauten	460
3.9	Auflagerpressungen unter Einzellasten	461
3.9.1	Allgemeines	461
3.9.2	Nachweis nach den Normen	461
3.10	Nachweis von Kelleraußenwänden	462
3.10.1	Grundlagen und statisches System	462
3.10.2	Belastung	463
3.10.3	Ermittlung der Schnittgrößen	464
3.10.3.1	Einachsig gespannte Wand	464
3.10.3.2	Zweiachsig gespannte Wand	465
3.10.4	Nachweis nach den ermittelten Schnittgrößen	466
3.10.4.1	Einachsig gespannte Wand	466
3.10.4.2	Zweiachsig gespannte Wand	468
3.10.4.3	Sonderfall Wandkopf mit heruntergeführter Verblendschale	468
3.10.5	Nachweis nach der Norm	469
3.10.5.1	Einachsig gespannte Wand	469
3.10.5.2	Zweiachsig gespannte Wand	470
3.10.6	Kelleraußenwand mit geringer Auflast bei voller Erdanschüttung	471
3.10.6.1	Vorbemerkung	471
3.10.6.2	Besondere Konstruktionen und Nachweise	471
3.10.7	Berechnungshilfen	473
3.10.7.1	Allgemeines	473
3.10.7.2	Diagramme und Tabellen	473
3.11	Plattenbeanspruchung von Mauerwerk	475
3.12	Vergleich zwischen DIN 1053 und EC 6	476
4	Beispiele	477
4.1	Allgemeines	477
4.2	Beispiel 1: Hochbelastete Innenwand	478
4.3	Beispiel 2: Gering belastete Außenwand	484
4.4	Beispiel 3: Aussteifungswand	491
4.5	Beispiel 4: Kelleraußenwand	496
4.6	Ergebnis	500
5	Literatur	500

## Bemessung im Holzbau

1	Holz als Baustoff	505
1.1	Einführung	505
1.2	Vollholz, Brettschichtholz, Holzwerkstoffe: Begriffe, Gestaltung, Aufbau	505
1.2.1	Vollholz (VH)	505
1.2.2	Brettschichtholz (BSH)	506
1.2.3	Holzwerkstoffe	508
1.3	Mechanische und physikalische Eigenschaften	508
1.3.1	Elastizitätsmoduln, Schubmoduln, Torsionsmoduln	508
1.3.1.1	Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Torsionsmoduln von Voll- und Brettschichtholz	508
1.3.1.2	Elastizitätsmoduln und Schubmoduln von Bau-Furniersperrholz (BFU) nach DIN 68705 T 3 und T 5	509



1.3.1.3	Elastizitätsmoduln und Schubmoduln von Flachpreßplatten (FPP) nach DIN 68 763 .....	510
1.3.2	Feuchte und Schwind- bzw. Quellmaße .....	511
1.3.3	Kriechverformungen .....	514
1.3.3.1	Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen .....	514
1.3.3.2	Ermittlung der Kriechverformungen .....	514
1.3.4	Einfluß von Temperaturänderungen .....	515
1.4	Zulässige Spannungen .....	516
1.4.1	Zulässige Spannungen für Voll- und Brettschichtholz .....	516
1.4.2	Zulässige Spannungen für Holzwerkstoffe .....	519
1.4.3	Zulässige Spannungen bei wechselbeanspruchten Bauteilen .....	521
1.4.4	Zulässige Spannungen bei Stahlteilen und anderen Baustoffen .....	521
1.5	Lastannahmen .....	521
1.6	Mindestquerschnitte und Mindestdicken .....	522
1.7	Querschnittsschwächungen .....	522
2	Biegebeanspruchte Bauteile .....	525
2.1	Allgemeines .....	525
2.1.1	Einführende Beschreibung .....	525
2.1.2	Stützweiten und Auflagerkräfte .....	525
2.1.3	Durchbiegung und Überhöhung .....	527
2.2	Ausklinkungen und Zapfen bei Biegeträgern mit Rechteckquerschnitt aus Nadelholz (Voll- und Brettschichtholz) .....	529
2.2.1	Allgemeines .....	529
2.2.2	Unten ausgeklinkte Träger .....	530
2.2.2.1	Definition „unten ausgeklinkt“ .....	530
2.2.2.2	Rechtwinklige Ausklinkung ohne Verstärkung .....	530
2.2.2.3	Rechtwinklige Ausklinkung mit Verstärkung .....	531
2.2.2.4	Schräge Ausklinkung .....	534
2.2.3	Oben ausgeklinkter bzw. abgeschrägter Träger .....	534
2.2.4	Zapfen .....	536
2.3	Durchbrüche bei Biegeträgern aus BSH mit Rechteckquerschnitt .....	536
2.3.1	Allgemeines .....	536
2.3.2	Durchbrüche ohne Verstärkung .....	536
2.3.3	Durchbrüche mit Verstärkung .....	538
2.4	Spannungskombination (Trägerrand $\neq$ Faserrichtung) .....	539
2.5	Spannungsverläufe bei gekrümmten Trägern und im Firstquerschnitt von Satteldachträgern aus BSH mit Rechteckquerschnitt .....	541
2.6	Biegeträger aus Voll- und Brettschichtholz .....	546
2.6.1	Allgemeines .....	546
2.6.2	Einachsige Biegung .....	550
2.6.2.1	Spannungsnachweise beim geraden Parallelträger .....	550
2.6.2.2	Spannungsnachweis bei Trägern mit veränderlicher Höhe .....	550
2.6.2.3	Nachweis der Spannungskombination am angeschnittenen Trägerrand ...	551
2.6.2.4	Spannungsnachweis bei gekrümmten Trägern und im Firstquerschnitt von Satteldachträgern aus BSH mit Rechteckquerschnitt .....	554
2.6.3	Zweiachsige Biegung .....	555
2.6.4	Querkraft und Abscherbelastung .....	555
2.6.4.1	Querkraft .....	555
2.6.4.2	Abscherbelastung .....	557
2.6.5	Torsion .....	557

2.6.6	Torsion und Querkraft	558
2.6.7	Auflagerpressung	558
2.6.8	Durchbiegung	559
2.6.9	Stabilisierung	561
2.6.9.1	Näherungsnachweise	561
2.6.9.2	Nachweis nach Spannungstheorie II. Ordnung	565
2.7	Biegeträger aus starr oder nachgiebig zusammengesetzten Querschnittsteilen	568
2.7.1	Allgemeines	568
2.7.2	Einachsige Biegung	568
2.7.3	Querkraft	573
2.7.3.1	Nachweis der Verbindungsmittel	573
2.7.3.2	Schubspannungsnachweis	574
2.7.4	Torsion	575
2.7.4.1	Nachweis der Schubspannungen aus Torsion	575
2.7.4.2	Nachweis der Verbindungsmittel	577
2.7.5	Torsion und Querkraft	577
2.7.5.1	Nachweis der Schubspannungen aus Torsion und Querkraft	577
2.7.5.2	Nachweis der Verbindungsmittel	577
2.7.6	Auflagerpressung	578
2.7.7	Durchbiegung	578
2.7.8	Stabilisierung	580
2.7.8.1	Näherungsnachweis	580
2.7.8.2	Nachweis nach Spannungstheorie II. Ordnung	581
2.7.9	Beulen des Steges	284
2.8	Fachwerkträger	584
2.8.1	Trägerformen und -systeme, Bemessungshinweise	584
2.8.2	Durchbiegungsnachweis	589
2.8.2.1	Allgemeines	589
2.8.2.2	Näherungsberechnung	589
2.8.2.3	Genauere Berechnung	590
2.8.3	Stabilität	593
2.9	Sparrenpfetten	593
2.9.1	Allgemeines	593
2.9.2	Einfeldpfetten	594
2.9.3	Durchlaufpfetten	594
2.9.4	Gelenkpfetten (Gerberpfetten)	594
2.9.5	Koppelpfetten	596
3	Zugbeanspruchte Stäbe	599
3.1	Allgemeines	599
3.2	Mittig beanspruchte Zugstäbe	599
3.3	Ausmittig beanspruchte Zugstäbe (Zug und Biegung)	601
3.3.1	Allgemeines	601
3.3.2	Zug mit planmäßig einachsiger Biegung	602
3.3.3	Zug mit planmäßig zweiachsiger Biegung (Doppelbiegung)	602
4	Stäbe und Stabsysteme unter Druck oder kombinierter Beanspruchung aus Druck und Biegung	603
4.1	Allgemeines	603
4.2	Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren ( $\omega$ -Verfahren)	603
4.2.1	Allgemeines	603

4.2.2	Knickzahlen $\omega$ . . . . .	604
4.2.3	Knicklängen $s_k$ . . . . .	608
4.2.4	Zulässige Schlankheitsgrade $\lambda$ . . . . .	614
4.2.5	Knicknachweis für einteilige Stäbe unter planmäßig mittigem Druck . . . .	614
4.2.6	Knicknachweis für einteilige Stäbe unter planmäßig ausmittigem Druck (Druck und Biegung) . . . . .	615
4.2.7	Knicknachweis für mehrteilige Stäbe unter planmäßig mittigem Druck . .	621
4.2.7.1	Nicht gespreizte mehrteilige Stäbe . . . . .	621
4.2.7.2	Gespreizte mehrteilige Stäbe (Rahmen- und Gitterstäbe) . . . . .	628
4.2.8	Knicknachweis für mehrteilige Stäbe unter planmäßig ausmittigem Druck (Druck und Biegung) . . . . .	630
4.2.8.1	Nichtgespreizte mehrteilige Stäbe . . . . .	630
4.2.8.2	Gespreizte mehrteilige Stäbe (Rahmen- und Gitterstäbe) . . . . .	631
4.3	Tragsicherheitsnachweis nach Spannungstheorie II. Ordnung . . . . .	632
4.3.1	Allgemeines . . . . .	632
4.3.2	Zum Berechnungsablauf . . . . .	633
4.3.2.1	Bedingungen nach DIN 1052 T 1 . . . . .	633
4.3.2.2	Berechnungshinweise . . . . .	633
4.3.2.3	Ablaufdiagramm zur praktischen Berechnung nach Spannungstheorie II. Ordnung . . . . .	639
4.3.3	Berechnung unter Einbeziehung von Verformungen senkrecht zur Systemebene . . . . .	643
5	Verbände, Scheiben, Abstützungen . . . . .	645
5.1	Allgemeines . . . . .	645
5.2	Hallenbauten . . . . .	645
5.3	Einzelabstützungen, kontinuierliche Abstützungen, Bemessungshinweise für Tragglieder . . . . .	650
5.3.1	Einzelabstützungen zur Unterteilung der Knicklänge . . . . .	650
5.3.2	Kontinuierliche Abstützungen gegen nachgiebige Verbände, Scheiben und Träger . . . . .	651
5.3.2.1	Allgemeines . . . . .	651
5.3.2.2	Seitenlasten $q_s$ aus Druckgurten von Fachwerkträgern . . . . .	653
5.3.2.3	Seitenlasten $q_s$ aus Druckgurten von Biegeträgern mit Rechteckquerschnitt	656
5.3.3	Belastung von Verbänden, Scheiben, Trägern und Pfetten sowie konstruktive Hinweise . . . . .	658
5.3.3.1	Gleichzeitige Wirkung von Wind- und Seitenlasten . . . . .	658
5.3.3.2	Anordnung von Horizontal-Traggliedern (horizontale Verbände, Scheiben oder Träger) und Verteilung von Wind- und Seitenlasten . . . . .	659
5.3.3.3	Beanspruchung der Sparrenpfetten aus Wind- und Seitenlasten . . . . .	660
5.3.3.4	Abgeknickte Horizontalverbände: Berechnung der Verbände und der vertikalen Zusatzlasten . . . . .	662
5.3.3.5	Scheiben . . . . .	663
5.3.3.6	Scheiben aus Holztafeln . . . . .	665
5.3.3.7	Abstützungen durch Dachlatten und Schalung . . . . .	666
5.4	Hausdächer . . . . .	668
5.4.1	Sparren- und Kehlbalkendächer . . . . .	668
5.4.2	Pfettendächer . . . . .	673
6	Verbindungen, Anschlüsse, Stöße . . . . .	675
6.1	Verbindungsmittel . . . . .	675
6.1.1	Einführung . . . . .	675

6.1.2	Mechanische Verbindungsmittel . . . . .	675
6.1.2.1	Allgemeines . . . . .	675
6.1.2.2	Übersichtstabellen für mechanische Verbindungsmittel: Bezeichnungen, zuständige Normen, Kurzangaben auf den Ingenieurplänen . . . . .	678
6.1.2.3	Bemessungs- und Konstruktionstabellen für Nägel, Klammern, Holz- schrauben, Stabdübel, Paßbolzen, Bolzen, Rechteckdübel und Dübel besonderer Bauart . . . . .	684
6.1.2.4	Bemessungs- und Konstruktionstabellen – Ergänzende Angaben für Nägel Klammern, Holzschrauben, Stabdübel, Paßbolzen, Bolzen, Rechteckdübel und Dübel besonderer Bauart . . . . .	698
6.1.2.5	Verbindungen mit Stahlteilen . . . . .	713
6.1.3	Leim . . . . .	715
6.1.3.1	Allgemeines . . . . .	715
6.1.3.2	Leimarten . . . . .	716
6.1.3.3	Längsstöße . . . . .	716
6.1.3.4	Nagelpreßleimung . . . . .	717
6.2	Verbindungen und Anschlüsse . . . . .	717
6.2.1	Zugstöße . . . . .	717
6.2.2	Queranschlüsse mit Querzugbeanspruchung . . . . .	720
6.2.3	Druckstöße . . . . .	726
6.2.4	Queranschlüsse mit Querdruckbeanspruchung und Versätze . . . . .	727
6.2.5	Biegesteife Verbindungen . . . . .	730
6.2.5.1	Allgemeines . . . . .	730
6.2.5.2	Genagelter Trägerstoß . . . . .	730
6.2.5.3	Rahmenecken mit Dübelkreis-Verbindung . . . . .	734
6.2.5.4	Rahmenecke mit Keilzinkenverbindung . . . . .	738
6.2.5.5	Geknickter Trägerstoß unter positivem Biegemoment . . . . .	739
6.2.6	Federsteifigkeiten, Verschiebungen und Verdrehungen der Verbindungen	743
6.2.6.1	Allgemeines . . . . .	743
6.2.6.2	Längs-Federsteifigkeiten $C_{Lä}$ und Längsverschiebungen $\Delta f_j$ . . . . .	744
6.2.6.3	Dreh-Federsteifigkeiten $C_d$ und Drehwinkel $\Delta \varphi$ . . . . .	745
6.2.6.4	Verschiebungen und Drehwinkel infolge Kriechens . . . . .	746
7	Literatur . . . . .	746

## Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen

1	Kunststoff – ein Gattungsbegriff . . . . .	751
1.1	Plastomere . . . . .	751
1.2	Elastomere . . . . .	752
1.3	Duromere . . . . .	753
2	Informationen aus Versuchen . . . . .	753
2.1	Der Kurzzeitversuch . . . . .	753
2.2	Der Einfluß erhöhter Temperaturen . . . . .	757
2.3	Der Umgebungseinfluß . . . . .	757
2.4	Einfluß der Belastungsdauer . . . . .	760
2.4.1	Kriechen . . . . .	760
2.4.2	Zeitstandfestigkeit . . . . .	763
2.4.3	Restfestigkeiten . . . . .	763
2.5	Kombinierte Beanspruchungen . . . . .	764

3	Dimensionierungsmodelle .....	766
3.1	Allgemeine Grundlagen .....	766
3.2	Bemessung gegen Festigkeitsversagen .....	768
3.3	Dehnungsbezogene Bemessung .....	768
3.4	Ermittlung von Verformungen .....	769
3.5	Bemessung auf Stabilität .....	769
3.6	Überlagerungen von verschiedenen Einwirkungen .....	768
3.7	Bruchhypothesen .....	770
4	Literatur .....	770

### **Bemessung von Tragwerken aus Faser-Kunststoff-Verbund**

1	Formelzeichen und Indizes .....	773
1.1	Formelzeichen .....	773
1.2	Hochgestellte Indizes .....	774
1.3	Tiefgestellte Indizes .....	774
1.4	Über den Zeichen .....	774
2	Verbunde mit Fasern und Ausgangswerkstoffe faserverstärkter Kunststoffe .....	775
2.1	Allgemeine Verbunde mit Fasern .....	775
2.2	Faser und Grenzfläche .....	779
2.2.1	Verstärkungsfasern .....	779
2.2.2	Grenzfläche zwischen Faser und Matrix .....	784
2.3	Kunststoffmatrix .....	784
2.3.1	Allgemeines .....	784
2.3.2	Duromere Kunststoffe; Reaktionsharze .....	785
2.3.3	Thermoplastische Kunststoffmatrizes .....	787
2.4	Prepreg .....	788
2.5	Andere Ausgangswerkstoffe .....	789
2.5.1	Stützkernwerkstoffe .....	789
2.5.2	Liner .....	789
2.6	Herstellverfahren .....	790
2.6.1	Manuelle Verfahren .....	791
2.6.2	Bandlegen .....	792
2.6.3	Wickeln .....	792
2.6.4	Schleudern .....	794
2.6.5	Pressen .....	794
2.6.6	Sondertechniken .....	795
2.6.7	Verbindungen (Kraftüberleitung in Fügstellen) .....	797
3	Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden .....	797
3.1	Ausgangswerkstoffe .....	797
3.2	Einzelschichten .....	801
3.3	Typisches Verhalten bei mechanischer Belastung .....	806
3.3.1	Grundsätzliches Verhalten .....	806
3.3.2	Ruhende Kurzzeitbelastung .....	806
3.3.3	Ruhende Langzeitbelastung .....	807
3.3.4	Veränderliche Langzeitbelastung .....	807
3.3.5	Hybridfaser-Schichtenverbunde .....	808
3.3.6	Unkonventionelle mechanische Belastung .....	808

3.4	Auswirkungen von Feuchtigkeit und Temperatur . . . . .	808
3.4.1	Verformungen bei Temperaturänderungen . . . . .	808
3.4.2	Verformungen bei Feuchtigkeitsänderungen . . . . .	809
3.4.3	Eigenschaftsänderungen unter Temperatureinfluß . . . . .	810
3.4.4	Eigenschaftsänderungen unter Feuchtigkeitseinfluß . . . . .	810
3.4.5	Eigenschaftsänderungen bei gleichzeitiger Einwirkung von Temperatur, Feuchtigkeit und mechanischer Belastung . . . . .	810
3.5	Sonstige Einflüsse . . . . .	811
4	Besonderheiten bei der Bemessung von Faser-Kunststoff-Verbunden . . . . .	812
4.1	Modellvorstellungen . . . . .	812
4.2	Was einen Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) von einem Stahl-Beton-Ver- bund (SBV) unterscheidet . . . . .	812
4.3	Koordinaten der Anisotropie . . . . .	814
4.4	Elastizitätstheoretische Grundlagen . . . . .	816
4.4.1	Allgemeines . . . . .	816
4.4.2	Stoffverhalten . . . . .	816
4.4.3	Berechnung der Ingenieurkonstanten aus den Koeffizienten $C_{ij}$ . . . . .	819
4.4.4	Rückrechnung der $C_{ij}$ aus den Ingenieurkonstanten . . . . .	820
4.5	Transformation . . . . .	820
4.5.1	Transformation von Spannungen und Verzerrungen . . . . .	820
4.5.2	Transformation von Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen . . . . .	822
4.6	Unterscheidungen Stoffkontinuum und Flächentragwerk . . . . .	825
4.7	Interlaminare Beanspruchungen . . . . .	826
5	Einzelschichten im Querschnitt eines FKV-Bauteils . . . . .	828
5.1	Allgemeines . . . . .	828
5.1.1	Einzelschichtmodell . . . . .	828
5.1.2	E-Modul und Stoffsteifigkeit . . . . .	829
5.1.3	Interpretation von Versuchsergebnissen . . . . .	829
5.2	Mikromechanische Methode . . . . .	831
5.2.1	Mögliche Methoden zur Bestimmung von ES-Kennwerten . . . . .	831
5.2.2	Mikromechanische Modelle . . . . .	832
5.3	Verformungsverhalten einer Einzelschicht . . . . .	839
5.3.1	Ebener Spannungs- oder ebener Verzerrungszustand – Betrachtung in Richtung der Stoffhauptachsen (on-axis) . . . . .	839
5.3.2	Ebener Spannungszustand – Betrachtung in beliebiger Richtung (off-axis) . . . . .	841
5.3.3	Invariante und quasi-isotrope Konstante als Entwurfshilfen . . . . .	843
5.3.4	Veranschaulichbare Bestandteile von Koeffizienten der Nachgiebigkeits- matrix, welche Ingenieurkonstanten genannt werden . . . . .	844
5.3.5	Ingenieurkonstanten der ES im SV-KOS . . . . .	846
5.3.6	Hygrothermische Verformungen . . . . .	847
5.3.7	Hinweis auf die Problematik einer G-ES-Berechnung . . . . .	847
5.3.8	Langzeitverhalten einer Einzelschicht . . . . .	847
5.4	Festigkeit einer Einzelschicht . . . . .	848
5.4.1	Allgemeines . . . . .	848
5.4.2	Kriterien der maximalen Hauptspannungen und -verzerrungen . . . . .	849
5.4.3	Tensor-Polynom-Kriterium . . . . .	850
5.4.4	Beanspruchungsfaktor . . . . .	853
5.4.5	Spezielle Versagenskriterien . . . . .	853
5.4.6	Modifiziertes Tensor-Polynom-Kriterium . . . . .	855

6	Der allgemeine Schichtenverbund	855
6.1	Allgemeines	855
6.2	Klassische „Laminat“-Theorie (CLT)	857
6.2.1	Voraussetzungen	857
6.2.2	Verformungsverhalten	858
6.2.3	Bemerkungen zu speziellen Schichtenverbunden	862
6.2.4	Dämpfungsverhalten – komplexe Gesamtsteifigkeit	864
6.2.5	SV-Analyse des Gebrauchszustandes	864
6.3	SDT	865
6.3.1	Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen (Stoffgesetz)	865
6.3.2	Spannungsergebnisse	865
6.4	Scherkorrekturfaktoren	866
6.5	Festigkeit des Schichtenverbundes	867
6.5.1	Nachweisführung: Schichtenverbund-Analyse der Traglastgrenzzustände	868
6.5.2	Bewertung der SV-Analyse nach dem Sicherheitskonzept	869
6.5.3	Beanspruchung über den FPF hinaus	870
6.6	Nichtmechanische Beanspruchung (Temperatur und Feuchte)	870
6.7	EDV-Programme	873
7	Symmetrischer Schichtenverbund – LAM	875
7.1	Die Bedeutung des Sonderfalls LAM	875
7.2	Beanspruchung in der Ebene des LAM	876
7.3	Beanspruchung des LAM auf reine Biegung	878
7.3.1	Allgemeines	878
7.3.2	Balkenbiegung	879
7.3.3	FKV-Profil	879
7.4	GFK-LAM mit flächiger Verstärkung	881
8	Bemessung	882
8.1	Zielvorstellungen	882
8.2	Beanspruchungsermittlung	882
8.2.1	Voraussetzungen zur Beanspruchungsermittlung	882
8.2.2	Die zu wählende Berechnungsebene	884
8.2.3	Zur Beanspruchungsermittlung selbst	886
8.3	Zuverlässigkeit	888
8.3.1	Grundlagen	888
8.3.2	Stochastische Modelle für den FKV-Widerstand	889
8.3.3	Grundsätzliche Beurteilung der Sicherheit von FKV-Bauteilen durch einen Zuverlässigkeitsnachweis	893
8.3.4	Semiprobabilistisches Vorgehen	895
8.3.5	Vereinfachtes Vorgehen	897
8.3.6	Bisherige deterministische Ansätze für LAM	897
8.4	Nachweis durch Berechnung	898
8.4.1	Allgemeines zu FKV-Bauteilen	898
8.4.2	Auslegen des Verbundwerkstoffes	899
8.4.3	Auslegung des Schichtenaufbaues	899
8.4.4	Übliche Bemessungsnachweise bei einfachen Laminaten	899
8.5	Hinweise auf Stabilitätsuntersuchungen	900
8.5.1	FKV-Scheibe unter Normalkraftbeanspruchung	900
8.5.2	Langzeitbelastung von Scheiben	902
8.5.3	Achsaldruckbeulen eines FKV-Zylinders	902
8.5.4	Außendruckbeulen infolge Erdbettung oder Unterdruck	903

8.5.5	Das Knittern der Sandwich-Deckschicht aus FKV .....	904
8.6	Nachweis durch Versuche aus Bauteilen und Komponenten .....	905
8.6.1	Einleitung .....	905
8.6.2	Versuchsgrundlagen und -planung .....	905
8.6.3	Versuchsdurchführung (Werkstoffversuche) .....	905
8.6.4	Komponentenversuch .....	906
8.6.5	Bauteilversuch .....	906
8.6.6	Versuchsauswertung, Versuchsbericht .....	907
8.6.7	Prüfungsmethoden zur Schadens- bzw. Fehlererkennung .....	907
8.7	Einflüsse von Fertigung und Bearbeitung .....	908
8.8	Beachtung entstehender Kosten .....	913
8.9	Qualitätssicherung .....	914
9	Anwendung von FKV im Betonbau .....	915
9.1	Allgemeines zum Einsatz von FKV im Bauwesen .....	915
9.2	Relevante Werkstoffeigenschaften von FKV-Spanngliedern .....	915
9.3	FKV-Spannglieder im Vergleich mit Stahl-Spanngliedern und im Zusammenwirken mit dem Betonstahl .....	918
9.4	Bemessung .....	919
9.4.1	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	919
9.4.2	Nachweis des rechnerischen Bruchzustandes .....	919
9.4.3	Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung .....	921
9.4.4	Erhöhte Spannkraftverluste im Kopplungsbereich .....	921
9.5	Verankerung und zulässige Vorspannkkräfte .....	922
9.6	Ausblick .....	923
10	Literatur .....	923

## Bemessung im Stahlbau

1	Einleitung .....	925
2	Werkstofforientierte Berechnungsverfahren .....	925
2.1	Primäre mechanische Werkstoffkenngrößen .....	925
2.2	Berechnungen für einmalige Belastung .....	930
2.3	Berechnungen für wiederholte Belastung .....	936
3	Geschweißte Verbindungen .....	944
3.1	Auswirkungen des Arbeitsvorganges Schweißen .....	944
3.2	Berechnungsbeispiele .....	949
4	Geschraubte Verbindungen .....	956
4.1	Beanspruchung der Schraube rechtwinklig zur Schraubenachse .....	956
4.2	Beanspruchung der Schraube in Richtung der Schraubenachse .....	964
5	Bemessung von Zugstäben .....	967
5.1	Anschlüsse am Zugstab .....	967
5.2	Schlankheitsbegrenzung von Zugstäben .....	969
6	Bemessung von Druckstäben .....	972
6.1	Elastische Versagensgrenze an druckbeanspruchten Stäben .....	972
6.2	Ersatzstabverfahren für Standsicherheitsnachweis druckbeanspruchter Stäbe	978
6.3	Konstruktionshinweise .....	982
7	Bemessung von Biegeträgern .....	989
7.1	Momentenbeanspruchung nach technischer Elastizitätstheorie .....	989



7.2	Querkraftbeanspruchung nach technischer Elastizitätstheorie . . . . .	994
7.3	Momentenbeanspruchung nach technischer Plastizitätstheorie . . . . .	996
7.4	Querkraftbeanspruchung nach technischer Plastizitätstheorie . . . . .	1003
7.5	Hinweise für Bemessung und Konstruktion . . . . .	1005
8	Bemessung von Torsionsträgern . . . . .	1012
8.1	Schnittgröße Torsionsmoment . . . . .	1012
8.2	Schubspannungen infolge Torsion bei geschlossenen Querschnitten . . . . .	1015
8.3	Schubspannungen infolge Torsion bei offenen Querschnitten . . . . .	1019
8.4	Normalspannungen infolge Torsion . . . . .	1021
8.5	Differentialgleichung der Wölbkrafttorsion . . . . .	1024
8.6	Hinweise für Bemessung und Konstruktion . . . . .	1028
9	Literatur . . . . .	1031

### Stichwortverzeichnis

Stichwörter zu	
Bemessung im Betonbau . . . . .	1035
Plastizitätstheorie im Betonbau . . . . .	1040
Bemessung im Mauerwerksbau . . . . .	1041
Bemessung im Holzbau . . . . .	1047
Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen . . . . .	1054
Bemessung von Tragwerken aus Faser-Kunststoff-Verbund . . . . .	1055
Bemessung im Stahlbau . . . . .	1057