
Handbuch Brückenbau

**Entwurf, Konstruktion, Berechnung,
Bewertung und Ertüchtigung**

Karsten Geißler

Inhaltsverzeichnis

1	Brückenentwurf	1
1.1	Zur geschichtlichen Entwicklung des Brückenbaus	1
1.1.1	Bogenbrücken als erste bedeutende Tragwerke	1
1.1.2	Frühe Hängebrücken	3
1.1.3	Erste Blechträger- und Fachwerkbrücken	3
1.1.4	Bogenbrücken aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts	4
1.1.5	Die Weiterentwicklung der Vollwandträgerbrücken	5
1.1.6	Hängebrücken des 20. Jahrhunderts	6
1.1.7	Schrägseilbrücken	7
1.1.8	Bewegliche Brücken	8
1.2	Grundlagen für den Brückenentwurf	8
1.2.1	Allgemeines	8
1.2.2	Planungsphasen und Regelwerke für den Entwurf	10
1.2.3	Ziele für den Brückenentwurf	13
1.2.4	Baukulturelle sowie ästhetische Anforderungen	16
1.2.4.1	Bauwerksgestaltung durch optimales Formverhältnis des Tragsystems	16
1.2.4.2	Bauwerksgestaltung durch gute Detailausbildung	18
1.2.5	Anforderungen aus der Funktionalität sowie der Statik und Konstruktion des Tragwerks	19
1.2.5.1	Systeme zum wirtschaftlichen Lastabtrag	19
1.2.5.2	Erforderlicher (Nutz-)Querschnitt	24
1.2.5.3	Randbedingungen für Bau- und Konstruktionshöhen	41
1.2.5.4	Spezifische Anforderungen für Fußgängerbrücken	45
1.2.5.5	Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Konstruktion	46
1.2.6	Technische Anforderungen aus der Herstellung	48
1.2.7	Herstellkosten und Nachhaltigkeit	49
1.3	Entwurfsvarianten für das Haupttragwerk	53
1.3.1	Vorbemerkungen	53
1.3.2	Balkenbrücken – Vollwandträger	53
1.3.2.1	Tragwirkung, Anwendungsbereiche	53
1.3.2.2	Querschnittsausbildung	55
1.3.2.3	Aktuelle Beispiele	62
1.3.3	Rahmen, integrale und semiintegrale Bauwerke	72
1.3.3.1	Tragwirkung, Anwendungsbereiche	72
1.3.3.2	Querschnittsausbildung	74
1.3.3.3	Aktuelle Beispiele	75
1.3.4	Balkenbrücken – Fachwerkträger	80
1.3.4.1	Zur Tragwirkung	80
1.3.4.2	Anwendungsbereich	80
1.3.4.3	Querschnittsausbildung	83
1.3.4.4	Aktuelle Beispiele	84
1.3.5	Bogenbrücken	88
1.3.5.1	Zur Tragwirkung	88
1.3.5.2	Anwendungsbereich	90
1.3.5.3	Querschnittsausbildung	91
1.3.5.4	Aktuelle Beispiele	93

1.3.6	Stabbogenbrücken	97
1.3.6.1	Zum Tragverhalten	97
1.3.6.2	Anwendungsbereich	98
1.3.6.3	Querschnittsausbildung	98
1.3.6.4	Aktuelle Beispiele	100
1.3.7	Netzwerkbogenbrücken	103
1.3.7.1	Zur Entwicklung dieser Bauweise	103
1.3.7.2	Zum Tragverhalten	104
1.3.7.3	Anwendungsbereich	106
1.3.7.4	Querschnittsausbildung	106
1.3.7.5	Aktuelle Beispiele	107
1.3.8	Schrägseilbrücken	111
1.3.8.1	Zum grundsätzlichen Tragverhalten	111
1.3.8.2	Anwendungsbereich	118
1.3.8.3	Querschnittsausbildung	118
1.3.8.4	Pylone	125
1.3.8.5	Schrägseile und Verankerungen	126
1.3.8.6	Aktuelle Beispiele	129
1.3.9	Hängebrücken	132
1.3.9.1	Zum Tragverhalten	132
1.3.9.2	Anwendungsbereich	133
1.3.9.3	Querschnittsausbildung	133
1.3.9.4	Aktuelle Beispiele	135
1.3.10	Sonstige Tragsysteme	138
1.3.10.1	Zügelgurbrücken	138
1.3.10.2	Spannbandbrücken	138
1.4	Entwurf des Lagerungssystems	141
1.4.1	Grundsätze für das Lagerungssystem	141
1.4.2	Lagerung für im Grundriss gekrümmte Überbauten	142
1.4.3	Elastische Lagerung	143
1.4.4	Lagerung auf Betongelenken	144
1.4.5	Verzicht auf Lager – integrale Brücken	145
1.5	Entwurfsgrundlagen für die Unterbauten	146
1.5.1	Pfeiler und Stützen	146
1.5.1.1	Grundsätze für die Anordnung	146
1.5.1.2	Anordnung und Form aus gestalterischer Sicht	146
1.5.1.3	Ableitung der Vertikal- und Horizontallasten	149
1.5.1.4	Platzbedarf für technische Ausstattungen	153
1.5.1.5	Herstellung der Pfeiler	153
1.5.2	Widerlager	155
1.5.2.1	Funktion und grundsätzliche Ausbildung	155
1.5.2.2	Konstruktion der Widerlagerwand	157
1.5.2.3	Konstruktion der Flügelwände	160
1.5.2.4	Hinterfüllung und Entwässerung	161
1.5.3	Gründungen für Pfeiler und Widerlager	162
1.5.3.1	Allgemeines	162
1.5.3.2	Flachgründungen	162
1.5.3.3	Tiefgründungen	163

2	Allgemeine Bemessungsgrundlagen	167
2.1	Baurecht und anerkannte Regeln der Technik	167
2.1.1	Für den Brückenbau relevante Gesetzlichkeiten in Deutschland	167
2.1.2	Anerkannte Regeln der Technik und Normen im Brückenbau	168
2.2	Sicherheitskonzept der normativen Regelungen für den Brückenbau	170
2.2.1	Allgemeine Bemerkungen zum Sicherheitskonzept	170
2.2.2	Zuverlässigkeitstheoretische Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Bemessungswerte	173
2.2.3	Charakteristische Werte, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte	175
2.2.4	Beispiele zur Ermittlung der Bemessungswerte, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte	178
2.2.4.1	Ermittlung der Bemessungswerte und Teilsicherheitsfaktoren „per Hand“ am Beispiel eines Zugstabes mit zwei normalverteilten Basisvariablen	178
2.2.4.2	Ermittlung der Bemessungswerte und Teilsicherheitsfaktoren am Beispiel eines Fachwerkträgers mit nicht normalverteilten Basisvariablen	179
2.2.4.3	Ermittlung der Bemessungswerte und Teilsicherheitsfaktoren am Beispiel eines Stahlbetonträgers	183
2.2.4.4	Kombinationsbeiwerte	186
2.2.5	Einwirkungskombinationen für den Brückenbau	189
2.3	Einwirkungen für Straßen-, Eisenbahn- und Fußgängerbrücken	190
2.3.1	Ständige Einwirkungen	190
2.3.2	Zeitveränderliche Einwirkungen aus Verkehr auf der Brücke – Verkehrslasten	192
2.3.2.1	Verkehrslasten für Straßenbrücken	193
2.3.2.1.1	Vertikale Straßenverkehrslasten	193
2.3.2.1.2	Horizontale Straßenverkehrslasten	206
2.3.2.1.3	Verkehrslasten auf Geh- und Radwegen – Lastfall Menschengedränge	207
2.3.2.1.4	Lasten auf Hinterfüllungen und Widerlager	208
2.3.2.1.5	Verkehrslastgruppen	208
2.3.2.1.6	Lastmodell für Ermüdungsberechnungen	208
2.3.2.1.7	Außergewöhnliche Einwirkungen infolge Straßenverkehrs	211
2.3.2.2	Verkehrslasten für Eisenbahnbrücken	216
2.3.2.2.1	Vertikale Verkehrslasten	216
2.3.2.2.2	Horizontale Verkehrslasten	231
2.3.2.2.3	Lastannahmen für Hinterfüllungen	235
2.3.2.2.4	Verkehrslastgruppen	235
2.3.2.2.5	Lastmodell für Ermüdungsberechnungen	235
2.3.2.2.6	Aerodynamische Einwirkungen aus Zugverkehr	238
2.3.2.2.7	Einwirkungen an den Befestigungsstellen für Oberleitungen und Signalmaste	240
2.3.2.2.8	Außergewöhnliche Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr	241
2.3.2.3	Verkehrslasten für Fußgängerbrücken	246
2.3.2.4	Sonstige außergewöhnliche Einwirkungen	248
2.3.3	Windeinwirkungen	248
2.3.3.1	Erläuterungen zur mittleren Windgeschwindigkeit und Böenüberhöhung	248
2.3.3.2	Normative Windlastansätze für den Brückenbau	252
2.3.4	Temperatureinwirkungen	261
2.3.4.1	Allgemeines	261
2.3.4.2	Konstanter Temperaturanteil	262
2.3.4.3	Vertikale Temperaturdifferenz	264
2.3.4.4	Horizontale Temperaturdifferenz	269

2.3.4.5	Überlagerung von konstantem Temperaturanteil und Temperaturdifferenz	270
2.3.4.6	Temperaturdifferenz zwischen benachbarten Bauteilen in Querrichtung	270
2.3.5	Schneelasten	270
2.3.6	Einwirkungen während der Bauzustände	270
2.3.6.1	Einwirkungen aus den Bauzuständen und Bauhilfsmaßnahmen	270
2.3.6.2	Korrespondierende klimatische Einwirkungen – Temperatureinwirkungen	271
2.3.6.3	Korrespondierende klimatische Einwirkungen – Windlasten	273
2.3.6.4	Korrespondierende klimatische Einwirkungen – Schneelasten	273
2.3.6.5	Anheben zum Auswechseln von Lagern	274
2.3.7	Einwirkungen infolge Erdbeben	274
2.3.7.1	Erdbebenzonen und Baugrundverhältnisse	275
2.3.7.2	Elastisches Antwortspektrum	275
2.3.7.3	Beispiel	280
2.3.7.4	Inelastisches Tragwerksverhalten	282
2.3.7.5	Regelungen für Pfeiler und Gründungen	283
2.3.7.6	Regelungen bei Lagerung des Überbaus mit Elastomeren	285
2.4	Normative Einwirkungskombinationen	285
2.4.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit ($E_d \leq R_d$)	285
2.4.1.1	Einwirkungskombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte	285
2.4.1.2	Einwirkungskombinationen für Straßenbrücken	289
2.4.1.3	Einwirkungskombinationen für Fußgänger- und Radwegbrücken	291
2.4.1.4	Einwirkungskombinationen für Eisenbahnbrücken	291
2.4.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ($E_d \leq C_d$)	291
2.4.3	Bewegungen und Horizontalkräfte zur Bemessung von Lagern und Übergangskonstruktionen	294
2.4.3.1	Einwirkungen	294
2.4.3.2	Festlegungen bei schwimmender Lagerung	294
2.4.3.3	Reaktionskräfte an Festpunkten aus dem Widerstand des Lagerungssystems	295
2.4.3.4	Bemessungswerte und Einwirkungskombinationen für die Lagerkräfte und Bewegungen	296
3	Massivbrücken – Entwurf, Konstruktion und Bemessung	301
3.1	Detaillierung der Entwurfsgrundlagen für Überbauten von Massivbrücken	301
3.1.1	Mögliche Querschnittsausbildungen für Deckbrücken	301
3.1.1.1	Allgemeines	301
3.1.1.2	Plattenbalkenquerschnitte	301
3.1.1.3	Plattentragwerke	310
3.1.1.4	Spannbetonhohlkästen	317
3.1.2	Spannbetonbauwerke – Konstruktion und Dimensionierung der Vorspannung	326
3.1.2.1	Vorspannarten	326
3.1.2.1.1	Allgemeines	326
3.1.2.1.2	Vorspannung mit sofortigem Verbund	327
3.1.2.1.3	Vorspannung mit nachträglichem Verbund	328
3.1.2.1.4	Vorspannung ohne Verbund	335
3.1.2.2	Schnittkräfte infolge der Vorspannung	342
3.1.2.2.1	Schnittkraftermittlung für statisch bestimmte Systeme	342
3.1.2.2.2	Schnittkraftermittlung für statisch unbestimmte Systeme	343

3.1.2.2.3	Beispiel – Vorbemessung eines vorgespannten Zweifeldträgers	349
3.1.2.3	Dimensionierung der erforderlichen Vorspannkraft	358
3.1.2.3.1	Mittelwert der Vorspannkraft $P_{m,t}$	358
3.1.2.3.2	Beispiel Zweifeldträger – Vorbemessung der erforderlichen Vorspannung über den Dekompressionsnachweis	361
3.1.2.3.3	Genauere Ermittlung der Spannkraftverluste aus Reibung und Keilschlupf	364
3.1.2.3.4	Spannkraftverluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation	369
3.1.2.3.5	Ermittlung der Spannwege	372
3.1.2.3.6	Beispiel Zweifeldträger – Genauere Ermittlung des Verlaufes der Vorspannkraft	373
3.2	Konstruktion und Bemessung von Massivbrücken	381
3.2.1	Baustoffkennwerte	381
3.2.1.1	Beton	381
3.2.1.2	Betonstahl	388
3.2.1.3	Spannstahl	390
3.2.2	Querschnittseigenschaften	391
3.2.2.1	Mitwirkende Plattenbreite	391
3.2.2.2	Querschnittseigenschaften unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens von Beton	393
3.2.3	Schnittgrößenermittlung	394
3.2.3.1	Berechnungsverfahren, Momentenumlagerung und Berücksichtigung der Rissbildung	394
3.2.3.2	Berechnung der Querverteilung der Verkehrslasten	396
3.2.3.2.1	Zweistegiger Plattenbalken, unendlich steife Fahrbahnplatte	396
3.2.3.2.2	Zweistegiger Plattenbalken, biegeeweiche Fahrbahnplatte	397
3.2.3.2.3	Beispiel Zweifeldträger – Querverteilung	398
3.2.3.3	Zusätzliche Querbeanspruchungen beim Hohlkasten	400
3.2.3.4	Schnittgrößenermittlung für Bereiche ohne lineare Dehnungsverteilung (D-Bereiche)	405
3.2.3.5	Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung – geometrische Nichtlinearitäten	406
3.2.3.6	Einfluss von zeitabhängigen Verformungen des Betons	406
3.2.3.7	Nichtlineare Verfahren zur Schnittgrößenermittlung	415
3.2.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	420
3.2.4.1	Bemessung für Biegung und Längskraft	420
3.2.4.1.1	Allgemeines zum Nachweis	420
3.2.4.1.2	Vorgehensweise zur Biegebemessung	422
3.2.4.1.3	Robustheitsbewehrung	425
3.2.4.1.4	Konstruktive Grundsätze	426
3.2.4.1.5	Beispiel Zweifeldträger – Bemessung für Biegung und Längskraft im GZT	432
3.2.4.2	Bemessung für Querkraft	440
3.2.4.2.1	Allgemeines	440
3.2.4.2.2	Rechnerischer Nachweis der Querkrafttragfähigkeit	440
3.2.4.2.3	Konstruktive Grundsätze	446
3.2.4.2.4	Bemessung von Druck- und Zuggurten profilierter Querschnitte	448
3.2.4.2.5	Bemessung auf Durchstanzen	449
3.2.4.3	Bemessung für Torsion	450
3.2.4.4	Beispiel Zweifeldträger – Bemessung für Querkraft und Torsion im GZT	454
3.2.4.5	Bemessung druckbeanspruchter Bauteile	459
3.2.4.6	Bemessung auf der Basis einer nichtlinearen Schnittgrößenermittlung	460
3.2.4.7	Bemessung mithilfe von Stabwerksmodellen	461

3.2.4.8	Spezielle Bemessungsprobleme	461
3.2.4.8.1	Konzentrierte Lasteinleitung und Kopplung der Vorspannkkräfte	461
3.2.4.8.2	Quervorspannung der Fahrbahnplatte	471
3.2.4.8.3	Nachweis der Teilflächenbelastung	471
3.2.4.8.4	Bemessungs- und konstruktive Regeln für Konsolen	472
3.2.4.8.5	Bemessungs- und konstruktive Regeln für Fertigteilbrücken	474
3.2.5	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	478
3.2.5.1	Allgemeines, Festlegungen zum Anforderungsniveau	478
3.2.5.2	Nachweise zur Spannungsbegrenzung, Dekompressionsnachweis	479
3.2.5.2.1	Spannungsermittlung	482
3.2.5.2.2	Begrenzung der Betondruckspannungen	482
3.2.5.2.3	Begrenzung der Betonzugspannungen (außer Dekompression)	483
3.2.5.2.4	Begrenzung der Betonstahlspannungen	483
3.2.5.2.5	Begrenzung der Spannstahlspannungen	484
3.2.5.2.6	Nachweis der Dekompression	484
3.2.5.2.7	Beispiel Zweifeldträger – Spannungsnachweise	485
3.2.5.3	Nachweise zur Begrenzung der Rissbreiten	493
3.2.5.3.1	Theoretischer Hintergrund	493
3.2.5.3.2	Normativer Nachweis nach EC 2-2	497
3.2.5.3.3	Beispiel Zweifeldträger – Nachweis der Rissbreitenbegrenzung	507
3.2.5.4	Nachweise zur Begrenzung der Verformungen	509
3.2.5.5	Begrenzung dynamischer Auswirkungen	512
3.2.6	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	513
3.2.6.1	Allgemeines	513
3.2.6.2	Beanspruchungen für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis	513
3.2.6.3	Ermüdungsfestigkeit	516
3.2.6.4	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für Beton- bzw. Spannstähle	518
3.2.6.4.1	Vereinfachter Nachweis	518
3.2.6.4.2	Nachweis auf der Basis von schadensäquivalenten Spannungsdifferenzen	519
3.2.6.4.3	Nachweis der akkumulierten Schadenssumme	522
3.2.6.4.4	Beispiel Zweifeldträger – Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Spannstahl ..	524
3.2.6.5	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit des Betons	525
3.2.7	Dauerhaftigkeit und sonstige konstruktive Regelungen zur baulichen Durchbildung	528
3.2.7.1	Allgemeines zur Dauerhaftigkeit	528
3.2.7.2	Ergänzende konstruktive Regelungen zur baulichen Durchbildung	532
3.3	Bemerkungen zu den Bauverfahren für die Überbauten	537
3.3.1	Herstellung des Überbaus auf Traggerüst	537
3.3.2	Herstellung des Überbaus durch Taktschieben	540
3.3.3	Herstellung des Überbaus durch Freivorbau	542
3.3.3.1	Klassischer Ortbeton-Freivorbau	542
3.3.3.2	Freivorbau mit Segment-Fertigteilen	544
3.3.4	Herstellung des Überbaus mit (über die ganze Spannweite konzipierten) Fertigteilen	544
3.4	Bemessung und Konstruktion der Bauteile der Unterbauten	545
3.4.1	Stützen und Pfeiler	545
3.4.1.1	Kriterien für die Notwendigkeit der Schnittkraftberechnung nach Theorie II. Ordnung	545
3.4.1.2	Einfluss von Imperfektionen und Kriechen auf die Berechnung nach Theorie II. Ordnung	545

3.4.1.3	Erfassung von Baugrundbewegungen und den Horizontalkräften aus den Lagern für die Berechnung nach Theorie II. Ordnung	547
3.4.1.4	Nachweisverfahren	548
3.4.1.5	Konstruktive Grundsätze für stabförmige Druckglieder	552
3.4.1.6	Konstruktive Grundsätze für Stahlbetonwände	553
3.4.1.7	Bemessung für Anpralllasten	554
3.4.1.8	Beispiel für Bemessung druckbeanspruchter Bauteile – Innenstütze des Zweifeldträgers	556
3.4.2	Widerlager	566
3.4.2.1	Allgemeine Beschreibung des Tragverhaltens	566
3.4.2.2	Bemerkungen zur Modellbildung	566
3.4.2.3	Einwirkungen und erforderliche Nachweise	568
3.4.2.4	Beanspruchung und Konstruktion der einzelnen Bauteile	570
3.4.2.5	Beispiel – Kastenwiderlager einer Eisenbahnbrücke	578
3.4.3	Gründungen	598
3.4.3.1	Allgemeines zu den geotechnischen Nachweisen	598
3.4.3.2	Hinweise zu den Berechnungsverfahren zur Beanspruchungsermittlung von Flachgründungen	600
3.4.3.3	Nachweise der äußeren Standsicherheit für Flachgründungen	601
3.4.3.4	Hinweise zu Bemessung und Konstruktion von Tiefgründungen	603
4	Überbauten von Stahl- und Stahlverbundbrücken – Entwurf, Konstruktion und Bemessung	609
4.1	Detaillierte Entwurfsgrundlagen – Tragsysteme, Querschnitts- ausbildung, Konstruktionsgrundsätze	609
4.1.1	Tragsysteme	609
4.1.2	Konstruktionsgrundsätze für vollwandige Balkenbrücken	609
4.1.2.1	Hauptträger	609
4.1.2.2	Querschnittsausbildung	611
4.1.2.3	Herstellung	617
4.1.2.4	Konstruktive Hinweise für Balkenbrücken in Stahl- oder Stahlverbundbauweise	620
4.1.3	Konstruktionsgrundsätze für Walzträger in Beton (WIB-Bauweise)	627
4.1.3.1	„Klassische“ WIB-Bauweise	627
4.1.3.2	Sonderfall Preflex-Bauweise	630
4.1.4	Konstruktionsgrundsätze für vollwandige Rahmenbrücken	631
4.1.4.1	Hauptträger	631
4.1.4.2	Querschnittsausbildung	633
4.1.4.3	Herstellung	634
4.1.5	Konstruktionsgrundsätze für Fachwerkbrücken	636
4.1.5.1	Hauptträger	636
4.1.5.2	Querschnittsausbildung	640
4.1.5.3	Herstellung	643
4.1.5.4	Ergänzende konstruktive Hinweise	644
4.1.6	Konstruktionsgrundsätze für Stabbogenbrücken	646
4.1.6.1	Hauptträger	646
4.1.6.2	Querschnittsausbildung	647
4.1.6.3	Herstellung	650
4.1.6.4	Ergänzende konstruktive Hinweise	652

4.1.7	Konstruktionsgrundsätze für Netzwerkbogenbrücken	661
4.1.7.1	Hauptträger	661
4.1.7.2	Hinweise zum Entwurf bzw. der Optimierung des Hängernetzes	664
4.1.7.3	Querschnittsausbildung	667
4.1.7.4	Herstellung	669
4.1.7.5	Ergänzende konstruktive Hinweise	671
4.1.8	Konstruktionsgrundsätze für Schrägseilbrücken	674
4.1.8.1	Hauptträger	674
4.1.8.2	Querschnittsausbildung	674
4.1.8.3	Aeroelastische Anregung	677
4.1.8.3.1	Allgemeines	677
4.1.8.3.2	Galloping	678
4.1.8.3.3	Flattern	678
4.1.8.4	Pylone	682
4.1.8.5	Herstellung	683
4.1.8.6	Ergänzende konstruktive Hinweise	683
4.2	Allgemeine Regeln zur Bemessung und baulichen Durchbildung von Stahlbrücken	692
4.2.1	Allgemeine Regeln zur Sicherstellung ausreichender Dauerhaftigkeit	692
4.2.2	Konstruktion und Bemessung orthotroper Fahrbahnplatten	693
4.2.2.1	Elemente und Lastabtrag	694
4.2.2.2	Empfehlungen für die Konstruktion der orthotropen Fahrbahnplatte von Straßenbrücken	696
4.2.2.3	Empfehlungen für die Konstruktion der orthotropen Fahrbahnplatte von Eisenbahnbrücken	699
4.3	Konstruktion und Bemessung von Stahlbrücken	703
4.3.1	Baustoffkennwerte	703
4.3.1.1	Baustahl	703
4.3.1.2	Verbindungsmitel	706
4.3.1.3	Lagerbauteile	707
4.3.2	Querschnitseigenschaften	707
4.3.2.1	Querschnittsklassen	707
4.3.2.2	Mitwirkende Gurtbreite	710
4.3.3	Schnittgrößenermittlung	713
4.3.3.1	Berechnungsverfahren	713
4.3.3.2	Berechnung nach Theorie II. Ordnung	713
4.3.3.3	Ermittlung der Quereinflusslinie (Querverteilungslinie)	717
4.3.3.4	Ermittlung der Querbiegemomente aus der Einleitung asymmetrischer Lasten in einen Hohlkastenquerschnitt	725
4.3.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	726
4.3.4.1	Nachweise der Querschnittstragfähigkeit	726
4.3.4.1.1	Nachweis für Zugbeanspruchung	726
4.3.4.1.2	Nachweis für Druckbeanspruchung	727
4.3.4.1.3	Nachweis für Biegung	727
4.3.4.1.4	Nachweis für Biegung und Normalkraft	727
4.3.4.1.5	Nachweis für Querkraft	728
4.3.4.1.6	Nachweis für Biegung und Querkraft	728
4.3.4.1.7	Beispiel – Stählerne Eisenbahnbrücke als Zweifeldträger	730
4.3.4.2	Stabilitätsnachweise (Knicken, Biegedrillknicken, Beulen)	751

4.3.4.2.1	Biegeknicken	751
4.3.4.2.2	Biegedrillknicken von Trägern	756
4.3.4.2.3	Beulen	773
4.3.4.3	Konstruktion und Tragfähigkeit der Verbindungen	819
4.3.4.3.1	Verbindungsarten	819
4.3.4.3.2	Schweißverbindungen	820
4.3.4.3.3	Schraubverbindungen	847
4.3.4.3.4	Nietverbindungen	856
4.3.4.3.5	Bolzenverbindungen	856
4.3.5	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	858
4.3.5.1	Nachweise zur Spannungsbegrenzung	858
4.3.5.2	Begrenzung der Plattenschlankheit von Stegblechen	859
4.3.5.3	Begrenzung der Verformungen	860
4.3.5.4	Begrenzung von dynamischen Auswirkungen	862
4.3.6	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	863
4.3.6.1	Allgemeines	863
4.3.6.2	Beanspruchungen für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis	866
4.3.6.3	Ermüdungsfestigkeit	871
4.3.6.3.1	Wöhlerlinien	871
4.3.6.3.2	Bezugswöhlerlinien	875
4.3.6.3.3	Wöhlerlinien nach EC 3 – Kerbfallkatalog	879
4.3.6.4	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	891
4.3.6.4.1	Vereinfachter Nachweis	892
4.3.6.4.2	Nachweis mithilfe schadensäquivalenter Spannungsdifferenzen	892
4.3.6.4.3	Beispiel zweifeldrige Eisenbahnbrücke – normierter Ermüdungsfestigkeitsnachweis	897
4.3.6.4.4	Nachweis über eine direkte Schadensakkumulationsberechnung	909
4.3.6.4.5	Ermüdungsnachweis bei resonanter Erregung	912
4.3.7	Spezielle Bemessungsprobleme	912
4.3.7.1	Bemessung von Seilen	912
4.3.7.1.1	Allgemeines	912
4.3.7.1.2	Fiktiver Elastizitätsmodul	913
4.3.7.1.3	Dynamische Anregung	914
4.3.7.2	Zum Nachweis des Schwingungsverhaltens zugbeanspruchter Bauteile (z. B. Hänger von Stabbogenbrücken)	916
4.3.7.2.1	Wirbelerregte Querschwingungen	916
4.3.7.2.2	Galloping und Flattern	920
4.3.7.2.3	Beispiel – Nachweis wirbelerregter Querschwingungen und Galloping an einem Flachstahlhänger einer Eisenbahnbrücke	925
4.3.7.2.4	Regen-Wind-induzierte Schwingungen	929
4.3.7.2.5	Maßnahmen gegen Schwingungen von Brückenhängern	931
4.4	Bemessung von Stahlverbundbrücken	935
4.4.1	Allgemeines	935
4.4.2	Baustoffe	935
4.4.2.1	Baustahl	935
4.4.2.2	Beton	935
4.4.2.3	Betonstahl/Spannstahl	937
4.4.2.4	Verbundmittel	937
4.4.3	Konstruktive Regelungen zur baulichen Durchbildung	937

4.4.4	Querschnittseigenschaften	938
4.4.4.1	Querschnittsklassen	938
4.4.4.2	Mittragende Breite	940
4.4.4.3	Steifigkeiten des ideellen Querschnitts – Betonplatte in der Druckzone	940
4.4.4.4	Beispiel Zweifeldträger mit Stützweiten von jeweils 35 m	944
4.4.4.5	Steifigkeit des Querschnitts infolge Rissbildung im Beton	948
4.4.4.5.1	Bereich „Zustand I“	948
4.4.4.5.2	Zustand der „Erstrissbildung“	950
4.4.4.5.3	Zustand mit „abgeschlossener Rissbildung“	951
4.4.4.5.4	Beispiel – Ermittlung der Steifigkeit im Stützenbereich	952
4.4.4.6	Torsionssteifigkeit von Kastenquerschnitten	954
4.4.5	Schnittgrößenermittlung	956
4.4.5.1	Berechnungsverfahren	956
4.4.5.2	Einfluss der Rissbildung in der Betonplatte	956
4.4.5.2.1	Methoden zur Schnittkraftermittlung für Durchlaufträger	956
4.4.5.2.2	Beispiel – Zweifeldträger	958
4.4.5.2.3	Schnittkraftermittlung von Tragwerken mit einer zentrisch zugbeanspruchten Stahlbetonplatte	961
4.4.5.3	Einfluss von Kriechen und Schwinden	962
4.4.5.4	Einfluss der Herstellungs- und Belastungsgeschichte	963
4.4.5.5	Theorie II. Ordnung-Berechnung	967
4.4.5.6	Nichtlineare Schnittgrößenermittlung	967
4.4.5.7	Beispiel Zweifeldträger – Einwirkungen und Schnittgrößen	967
4.4.6	Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	969
4.4.6.1	Allgemeines	969
4.4.6.2	Nachweise der Querschnittstragfähigkeit	971
4.4.6.2.1	Momententragfähigkeit	972
4.4.6.2.2	Querkrafttragfähigkeit	976
4.4.6.2.3	Beispiel – Zweifeldträger	977
4.4.6.3	Stabilitätsnachweise (Knicken, Biegedrillknicken, Beulen)	981
4.4.6.3.1	Biegeknicken infolge von zentrischem Druck	981
4.4.6.3.2	Biegedrillknicken	981
4.4.6.3.3	Beulen	990
4.4.6.4	Nachweise der Tragfähigkeit der Verbundfuge	990
4.4.6.4.1	Ermittlung der Längsschubkräfte	991
4.4.6.4.2	Tragfähigkeit der Verdübelung, Nachweis der Verbundsicherung	994
4.4.6.4.3	Konstruktive Festlegungen für die Verdübelung	997
4.4.6.4.4	Querbewehrung	998
4.4.6.4.5	Beispiel – Zweifeldträger	1002
4.4.7	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	1006
4.4.7.1	Erforderliche Nachweise, Ermittlung der Beanspruchungen	1006
4.4.7.2	Nachweise zur Spannungsbegrenzung	1007
4.4.7.2.1	Grenzwerte	1007
4.4.7.2.2	Beispiel – Zweifeldträger	1008
4.4.7.3	Nachweis gegen Stegblechatmen	1013
4.4.7.4	Nachweise zur Rissbreitenbegrenzung	1013
4.4.7.4.1	Nachweis der Mindestbewehrung	1014
4.4.7.4.2	Nachweis der Rissbreitenbegrenzung	1015
4.4.7.4.3	Beispiel für den Nachweis der Rissbreitenbegrenzung (Zweifeldträger)	1017
4.4.7.4.4	Rissbreitenbegrenzung für zentrisch zugbeanspruchte Stahlbetonbauteile	1020

4.4.7.5	Verformungsbegrenzungen	1021
4.4.7.6	Begrenzung der dynamischen Auswirkungen	1022
4.4.8	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	1022
4.4.8.1	Beanspruchungsermittlung	1022
4.4.8.2	Ermüdungsfestigkeit und Nachweis	1026
4.4.8.3	Beispiel Zweifeldträger – Ermüdungsfestigkeitsnachweise	1028
4.4.9	Regelungen für spezifische Bauweisen	1034
4.4.9.1	Bauweise mit teilweise einbetonierten Stahlträgern (WIB-Bauweise)	1034
4.4.9.2	Verbundplatten	1038
4.4.9.3	Fahrbahnplatten mit Betonfertigteilen	1039
5	Baustoffunabhängige Grenzkriterien und spezielle Nachweise	1041
5.1	Grenzkriterien für die Verformungsnachweise	1041
5.1.1	Straßen- und Fußgängerbrücken	1041
5.1.2	Eisenbahnbrücken	1041
5.1.2.1	Nachweis der maximalen Vertikaldurchbiegung	1041
5.1.2.2	Nachweis der maximalen Verwindung des Überbaus	1042
5.1.2.3	Nachweis des Endtangentialwinkels des Überbaus bei Gleisen mit Schotterbett	1043
5.1.2.4	Grenzwerte der maximalen horizontalen Verformung für Überbauten von Eisenbahnbrücken	1044
5.1.2.5	Nachweis der Differenzverformungen am Überbauende bei Fester Fahrbahn ...	1044
5.1.2.6	Zusammenstellung der Verformungsgrenzwerte	1048
5.2	Grenzkriterien für dynamische Auswirkungen bei Eisenbahnbrücken	1050
5.2.1	Vertikale Beschleunigungen für Eisenbahnbrücken	1050
5.2.2	Nachweis der maximalen horizontalen Beschleunigung der Überbauten stählerner Eisenbahnbrücken	1050
5.3	Nachweis der resonanten Erregung für Eisenbahnbrücken	1051
5.3.1	Grundlagen des Nachweises	1051
5.3.2	Abgrenzungskriterien für den Ausschluss der Resonanz	1052
5.3.3	Vereinfachter Nachweis	1054
5.3.4	Detaillierte Berechnungen	1054
5.3.4.1	Geschwindigkeiten und auszuwertende Frequenzen	1054
5.3.4.2	Einwirkungen für die dynamische Berechnung	1056
5.3.4.3	Tragsystem – Modellbildung	1061
5.3.4.4	Nachweise und Grenzkriterien	1063
5.3.4.5	Dynamische Nachrechnung bestehender Eisenbahnbrücken	1068
5.3.4.6	Beispiele	1071
5.3.4.6.1	EÜ in WIB-Bauweise	1071
5.3.4.6.2	Allgemeine Betrachtungen zu gegliederten Stahlbrücken am Beispiel von Stabbogenbrücken	1072
5.4	Schwingungsnachweis für Fußgängerbrücken	1080
5.4.1	Mögliche Anregungen durch Personen	1080
5.4.2	Zur Berechnung	1082
5.4.3	Grenzwerte	1083
5.4.4	Maßnahmen zur Vermeidung von Schwingungen	1083

5.5	Gleis-Tragwerks-Interaktion bei Eisenbahnbrücken, Schienenspannungsberechnung	1084
5.5.1	Vereinfachte Berücksichtigung der Gleis-Tragwerks-Interaktion für die Verteilung der Horizontallasten aus Bremsen/Anfahren	1084
5.5.1.1	Randbedingungen für die Näherungsansätze	1084
5.5.1.2	Näherungsansätze für die Mindeststeifigkeit der Unterbauten	1085
5.5.1.3	Ursprüngliches vereinfachtes Verfahren (nach DIN-Fb 101)	1087
5.5.1.4	Vereinfachtes Nachweisverfahren nach EC 1-2	1087
5.5.2	Vereinfachte Erfassung der Horizontalkräfte im Überbau aufgrund temperaturabhängiger Zwängungen durch die Gleis-Tragwerks-Interaktion	1088
5.5.2.1	Temperaturabhängige Zwängungen im System	1088
5.5.2.2	Vereinfachte Erfassung der Horizontalkräfte infolge Temperatur, Grenzstützweiten	1089
5.5.3	Detaillierte Gleis-Tragwerks-Berechnung bzw. Schienenspannungsberechnung	1091
5.5.3.1	Zur Modellbildung	1091
5.5.3.2	Zur Berechnung	1094
5.5.3.3	Grenzwerte	1094
5.5.3.4	Beispiel für eine Schienenspannungsberechnung unter Berücksichtigung der Gleis-Tragwerks-Interaktion	1098
5.5.4	Konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der Schienenspannungen	1102
5.5.4.1	Anordnung hydraulischer Kriechkopplungen (Dämpfer)	1102
5.5.4.2	Anordnung von RSB-Stäben	1102
5.5.4.3	Anordnung von Steuerstabsystemen	1102
6	Brückenausstattung	1105
6.1	Allgemeines	1105
6.2	Lager	1105
6.2.1	Allgemeine konstruktive Hinweise	1105
6.2.2	Lagertypen	1106
6.2.2.1	Elastomerlager	1106
6.2.2.2	Kalottenlager	1108
6.2.2.3	Topflager	1111
6.2.2.4	Führungslager	1111
6.2.2.5	Rollen- und Kipplager	1111
6.2.3	Hinweise für die Planung und Bemessung der Lager	1112
6.2.3.1	Hinweise zur Planung	1112
6.2.3.2	Zur Bemessung der Elastomerlager	1112
6.2.3.3	Zur Bemessung der Kalottenlager	1114
6.2.3.4	Zur Bemessung der Festhaltekonstruktionen	1115
6.3	Fugen- und Übergangskonstruktionen	1116
6.3.1	Fahrbahnübergangskonstruktionen für Straßenbrücken	1116
6.3.2	Konstruktion der Fugen- und Übergangskonstruktionen für Eisenbahnbrücken	1119
6.3.3	Bemessung der Übergangskonstruktionen	1119

6.4	Sonstige Brückenausstattungen	1122
6.4.1	Kappen	1122
6.4.2	Geländer und deren Befestigung	1125
6.4.3	Schallschutzwände und deren Befestigung	1128
6.4.4	Schutzeinrichtungen auf Straßenbrücken	1130
6.4.5	Brückenentwässerung	1132
7	Bewertung und Ertüchtigung der Bestandsbauwerke	1135
7.1	Systematisierung der Bestandsbauwerke	1135
7.1.1	Allgemeines	1135
7.1.2	Typische Tragsysteme älterer Stahlbrücken	1137
7.1.2.1	Eisenbahnbrücken	1137
7.1.2.2	Straßenbrücken	1145
7.1.3	Bogenbrücken aus Mauerwerk	1150
7.1.4	Typische Tragsysteme älterer Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke	1153
7.1.4.1	Überbauten in Stahlbetonbauweise	1153
7.1.4.2	Überbauten in Spannbetonbauweise	1153
7.2	Bewertung bestehender Brücken	1157
7.2.1	Vorgehensweise bei der Bewertung	1157
7.2.2	Bauwerksprüfung und Zustandsbewertung	1159
7.2.2.1	Bauwerksprüfung	1159
7.2.2.2	Zustandsbewertung auf der Basis der Bauwerksprüfung	1159
7.2.2.3	Bauwerksdaten	1162
7.2.3	Materialkennwerte	1162
7.2.3.1	Eisen und (Bau-)Stahl	1163
7.2.3.2	Beton, Betonstahl, Spannstahl	1172
7.2.3.3	Mauerwerk aus natürlichen oder künstlichen Steinen	1180
7.2.3.4	Baugrundverhältnisse und Bodenkenngößen	1184
7.2.4	Belastungsentwicklung	1184
7.2.4.1	Entwicklung der Eisenbahnverkehrslasten und der entsprechenden Lastmodelle	1184
7.2.4.2	Entwicklung der Straßenverkehrslasten und der entsprechenden Lastmodelle	1189
7.2.5	Nachweiskonzepte	1191
7.2.5.1	Entwicklung der Nachweiskonzepte	1191
7.2.5.2	Normative Regelungen zur Bewertung / Nachrechnung bestehender Eisenbahnbrücken	1193
7.2.5.2.1	Allgemeines zum Nachweiskonzept	1193
7.2.5.2.2	Einwirkungen, Teilsicherheitsbeiwerte	1194
7.2.5.2.3	Schnittgrößenermittlung	1196
7.2.5.2.4	Materialkennwerte	1198
7.2.5.2.5	Nachweise der Tragfähigkeit	1198
7.2.5.2.6	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	1211
7.2.5.2.7	Ermüdungs- bzw. Restnutzungsdauernachweise	1212
7.2.5.2.8	Hinweise zur Bewertung am Beispiel der Eisenbahnhochbrücke über den Nord-Ostsee-Kanal in Rendsburg	1220

7.2.5.3	Normative Regelungen zur Bewertung / Nachrechnung bestehender Straßenbrücken	1225
7.2.5.3.1	Allgemeines zum Nachweiskonzept	1225
7.2.5.3.2	Einwirkungen, Teilsicherheitsbeiwerte	1228
7.2.5.3.3	Stahl- und Stahlverbundbrücken – Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	1230
7.2.5.3.4	Stahlbeton- bzw. Spannbetonbrücken – Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	1233
7.2.5.3.5	Gewölbebrücken – Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	1239
7.2.5.3.6	Ermüdungs- bzw. Restnutzungsdauernachweise	1239
7.2.5.4	Statische und dynamische Bauwerksmessungen – messwertgestützte Bewertung	1254
7.3	Möglichkeiten zur Bauwerksertüchtigung	1267
7.3.1	Bauwerkserhaltung bzw. -verstärkung	1267
7.3.2	Verstärkung von Stahlbrücken	1267
7.3.2.1	Verstärken von einzelnen Bauteilen durch zusätzliche Bleche	1267
7.3.2.2	Systemänderungen	1275
7.3.2.3	Nachträgliche externe Vorspannung	1276
7.3.2.4	Teilersatz	1277
7.3.2.5	Sanierung bzw. Verstärkung der Fahrbahnplatte	1278
7.3.3	Verstärkung von Massivbrücken	1280
7.3.3.1	Allgemeine Verfahren	1280
7.3.3.2	Verstärkung durch Querschnittsergänzungen mit Beton	1280
7.3.3.3	Verstärkung der Bewehrung durch aufgeklebte CFK-Lamellen in Längs- und in Querrichtung	1280
7.3.3.4	Verstärkung mit zusätzlichen externen Spanngliedern	1281
7.3.4	Ertüchtigung von Bogenbrücken aus Mauerwerk	1284
8	Beispielverzeichnis	1287
9	Brückenverzeichnis	1289
10	Literaturverzeichnis	1295
11	Stichwortverzeichnis	1321