

1 Einleitung und Übersicht

1.1 Einführung

Die Stabilitätsfälle Biegeknicke, Drillknicke, Biegedrillknicke und Plattenbeulen werden durch **Druck**beanspruchungen verursacht. Hinzu kommt beim Biegedrillknicken ein exzentrischer Lastangriff, der die Stabilitätsgefahr erhöhen kann. Beim Plattenbeulen ergibt sich der Stabilitätsverlust infolge von **Druck-** und/oder **Schubspannungen**.



Bild 1.1 Zeigestock bei Zug- und Druckbeanspruchung

Mit einem kleinen Experiment lässt sich anschaulich nachweisen, dass **Druck**beanspruchungen wesentlich kritischer als **Zug**beanspruchungen sind. Man benötigt nur einen normalen Zeigestock, der jedoch wie allgemein üblich dünn und schlank sein sollte. Aus welchem Werkstoff er besteht, ist in diesem Zusammenhang zweitrangig. In Bild 1.1 links wird mit beiden Händen an den Enden des Zeigestocks **gezogen**. Trotz größter Anstrengungen gelingt es nicht, den Zeigestock sichtbar zu verlängern. Wenn dagegen, wie in Bild 1.1 rechts, der Zeigestock gegen die Wand **gedrückt** wird, können ohne große Kraftanstrengungen Verformungen erzeugt werden. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass man dem Zeigestock eine kleine Auslenkung geben muss, sofern er ideal gerade ist. Alternativ dazu kann man einen etwas krummen, d. h. „imperfekten“ Zeigestock verwenden. Was hier einführend am Beispiel des Zeigestocks anschaulich erläutert wird, kann beispielsweise mithilfe von Bild 11.1 vertieft werden. Das Bild und der begleitende Text enthalten grundlegende Erläuterungen zum Biegeknicke einer druckbeanspruchten Stütze, die an der Bauhaus-Universität Weimar experimentell untersucht wurde.

Damit sind die zentralen Themen des Buches bereits weitgehend umrissen: Die Stabilitätsfälle und die Berechnung von Verformungen und Beanspruchungen nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung von Imperfektionen. Das sind natürlich keine neuen Themen, schließlich hat die klassische Stabilitätstheorie schon eine lange Tradition! Was neu ist, betrifft die Berechnungsmethoden und die Denkweise, die sich im Laufe der Zeit grundsätzlich verändert hat und die in der Lehre und den Lehrbüchern entsprechend vermittelt werden muss. Bild 1.2 veranschaulicht wesentliche

Unterschiede. Beim Fall a, der Vorgehensweise nach der **klassischen Stabilitätstheorie**, geht man von einem ideal geraden Druckstab aus und nimmt an, dass die Kraft genau mittig eingeleitet wird. Mit Aufbringen und Erhöhen der Last wird der Stab zusammengedrückt und bleibt, da er sich im **stabilen Gleichgewicht** befindet, zunächst gerade. Bei $N = N_{cr}$, der Verzweigungslast, tritt indifferentes Gleichgewicht auf und der Druckstab ist „unschlüssig“, ob er gerade bleiben oder ausknicken soll. Fachlich präziser ausgedrückt, nennt man den Übergang zum labilen Gleichgewicht „indifferentes Gleichgewicht“ und spricht auch von der „Verzweigung des Gleichgewichts“. So weit die klassische Stabilitätstheorie.

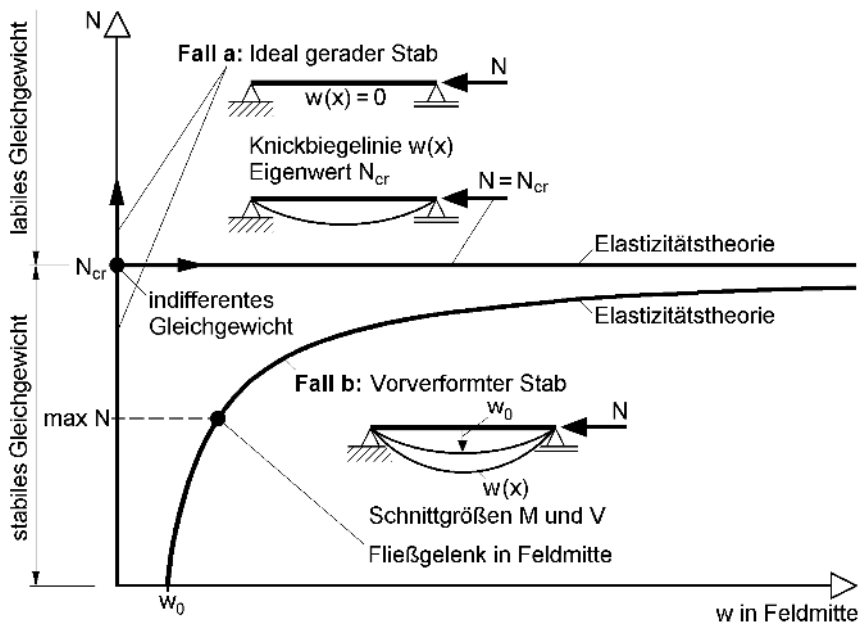


Bild 1.2 Stabilität (Verzweigung des Gleichgewichts) eines Druckstabes und Theorie II. Ordnung mit w_0

Mittlerweile hat sich die Denkweise geändert und man geht wie im Fall b von einem imperfekten (vorgekrümmten) Druckstab aus. Dabei weist der Druckstab von Anfang an gewisse Auslenkungen auf und **nach Theorie II. Ordnung** ergibt sich die dargestellte nichtlineare Last-Verformungs-Beziehung. Sofern die Imperfektionen klein sind und man unbegrenzt elastisches Tragverhalten voraussetzt, nähert sich die Kurve asymptotisch der horizontalen Geraden durch $N = N_{cr}$. Darüber hinaus zeigt die Kurve, dass die Auslenkungen mit wachsendem N überproportional größer werden, was auch für die Biegemomente und Querkräfte gilt.

Da der Werkstoff nicht unbegrenzt elastisch ist, wird die maximale Normalkraft erreicht, wenn in Feldmitte infolge N und M ein **Fließgelenk** entsteht. Bei dieser Vorgehensweise müssen mit der Vorverformung w_0 ersatzweise alle Imperfektionen erfasst werden, die im Hinblick auf die Tragfähigkeit von Bedeutung sind. Natürlich gilt dies

auch für den Fall, dass man die Verzweigungslast N_{cr} verwendet und die maximale Normalkraft $N = \chi \cdot N_{pl,Rd}$ mit dem Abminderungsfaktor χ bestimmt, s. Abschnitte 2.7 und 3.2.

Die in Bild 1.2 dargestellten Methoden (Fälle a und b) sind Näherungsverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit. Realitätsnäher (genauer) sind Nachweise nach der Fließzonentheorie. Dabei werden als Imperfektionen Vorverformungen (Vorkrümmungen) und Eigenspannungen angesetzt und darüber hinaus Fließzonen berücksichtigt, die im Verlauf der schrittweisen Lasterhöhung entstehen. Abschnitt 2.7 enthält dazu ein einführendes Berechnungsbeispiel mit Erläuterungen zum Verständnis. Stabilitätsnachweise mit der FZT sind zurzeit in der Baupraxis noch nicht üblich, sie werden sich in den kommenden Jahren aber mehr und mehr verbreiten.

Die Veränderung der Denk- und Vorgehensweisen steht in engem Zusammenhang mit den alten und neuen Nachweismethoden. Früher, d. h. nach der alten Stabilitätsnorm DIN 4114 [6], hat man den Stabilitätsnachweis fast immer mit der Bedingung

$$\omega \cdot \frac{S}{F} \leq \sigma_{zul} \quad (1.1)$$

geführt (Druckkraft S , Fläche F) und für die Ermittlung der Knickzahlen ω wurde die Knicklänge, die sich aus der Verzweigungslast ergibt, verwendet. Natürlich waren in den Knickzahlen ω (s. Bild 3.13) die Einflüsse von Imperfektionen und infolge Theorie II. Ordnung enthalten. Dies war jedoch nicht in den Köpfen der Ingenieure verankert, sodass viele bei Einführung der DIN 18800 [4] glaubten, dass die Theorie II. Ordnung eine Erfindung der Normenmacher sei. Ein zu Gl. (1.1) vergleichbarer Nachweis ist mit

$$\frac{N}{\kappa \cdot N_{pl,d}} \leq 1 \quad (1.2)$$

auch in DIN 18800 Teil 2 enthalten. Der Unterschied zu früher besteht darin, dass heutzutage alle in der Praxis tätigen Ingenieure wissen, was die Abminderungsfaktoren χ (vergleichbar mit κ und $1/\omega$) abdecken. Darüber hinaus werden heutzutage häufig Nachweise geführt, bei denen die Berechnungen nach Theorie II. Ordnung unmittelbar erkennbar sind.

Aufgrund der über 40-jährigen Erfahrung im Stahlbau hat der Verfasser die o. g. Stabilitätsnormen häufig verwendet und darüber hinaus an der Erstellung der DIN 18800 Teil 2 als Mitglied des Normenausschusses mitgewirkt. Man sollte sich stets bewusst sein, dass Normen kein Lehrbuchwissen vermitteln und man daher auf gute Lehrbücher angewiesen ist. In diesem Zusammenhang hat der Autor zahlreiche Lehrbücher und Veröffentlichungen herangezogen und damit das entsprechende Wissen kontinuierlich erarbeitet. Einige Bücher hatten eine außergewöhnliche Bedeutung und sollen aufgrund der besonderen Wertschätzung nachfolgend genannt werden:

- Pflüger: Stabilitätsprobleme der Elastostatik [55]
- Roik/Carl/Lindner: Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe [56]

- Roik: Vorlesungen über Stahlbau [60]
- Wlassow: Dünnwandige elastische Stäbe [71]
- Bürgermeister/Steup/Kretschmar: Stabilitätstheorie [3]
- Petersen: Stahlbau [53], Statik und Stabilität der Baukonstruktionen [54]

1.2 Grundsätzliches

Zentrales Thema des vorliegenden Buches sind die Stabilität von Stabtragwerken und Berechnungen nach Theorie II. Ordnung. Da dabei die lineare Stabtheorie die Basis bildet, sind einige grundlegende Erläuterungen zu den üblichen Annahmen, Methoden und Vorgehensweisen sowie Hinweise zu grundlegenden Aspekten der Stabilität und Theorie II. Ordnung sinnvoll.

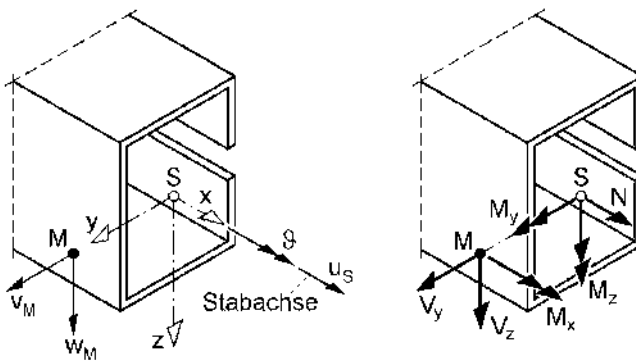


Bild 1.3 Stabquerschnitt im Koordinatensystem mit Verschiebungs- und Schnittgrößen

Stäbe werden in einem **x-y-z-Koordinatensystem** gemäß Bild 1.3 beschrieben, bei dem die **x-Achse die Stabachse** ist. Sie verläuft durch den **Schwerpunkt S** und **y und z sind die Hauptachsen** des Querschnitts. In diesem Koordinatensystem wird auch der **Schubmittelpunkt M**(y_M , z_M) angegeben. Bild 1.3 zeigt beispielhaft einen Sonderfall mit $y_M \neq 0$ und $z_M = 0$.

Zur Ermittlung der Punkte S und M sowie der Richtungen von y und z sind entsprechende Berechnungen durchzuführen. Sie werden in [21] ausführlich erläutert und die erforderlichen Vorgehensweisen hergeleitet. Bei **Querschnitten mit Symmetrieeigenschaften** vereinfachen sich die Berechnungen und bei Querschnitten mit mindestens zwei Symmetrieachsen entfallen sie gänzlich, weil S und M im Schnittpunkt der Symmetrieachsen liegen und die Richtungen von y und z den Symmetrieachsen entsprechen. Bild 1.4 zeigt dazu einige Beispiele.

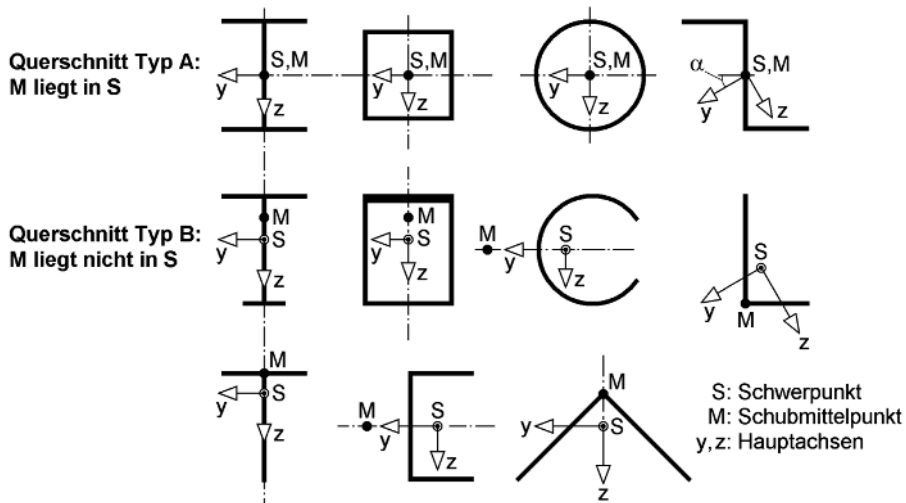
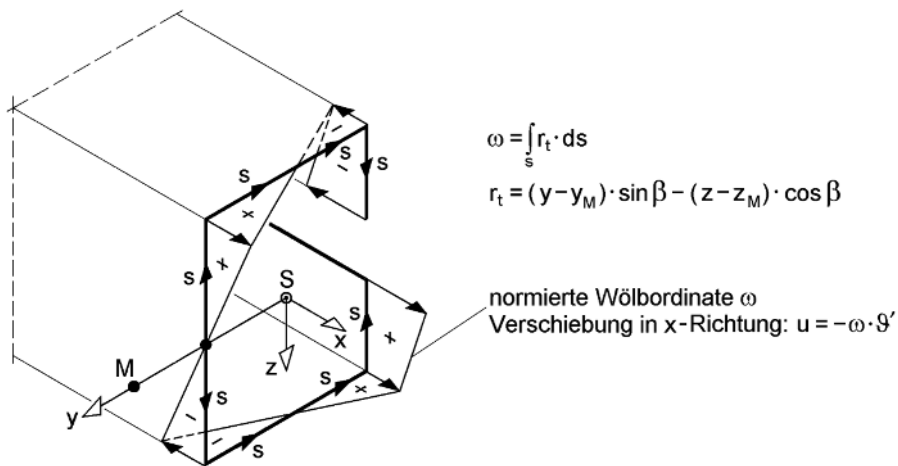


Bild 1.4 Richtung der Hauptachsen sowie Lage von S und M

Bei einigen Problemstellungen wird auch eine **Profilordinate** s und eine **normierte Wölbordinate** ω benötigt, siehe Bild 1.5 und [21].

Bild 1.5 Profilordinate s und Wölbordinate ω

Zur Erläuterung weiterer Grundlagen und Prinzipien wird der Kragträger in Bild 1.6 betrachtet, der am freien Ende durch Einzellasten F_x , F_y und F_z belastet wird. Da F_y außermittig zum Schubmittelpunkt angreift, tritt auch Torsion auf, sodass hier der allgemeine Beanspruchungsfall „zweiachsigte Biegung mit Normalkraft und Torsion“ vorliegt, s. Abschnitt 1.4.

Verformungen

Es versteht sich von selbst, dass die Verschiebungen u , v und w die Differenz zwischen der verformten Lage und der Ausgangslage sind. Die Richtungen von u , v und w entsprechen den Richtungen der Koordinaten x , y und z in der **unverformten Ausgangslage**. Wichtig ist, dass sich auch die Verdrehungen φ_x , φ_y und φ_z auf diese Richtungen beziehen, s. auch Bild 1.7. Dies gilt auch für die im Folgenden verwendeten Verdrehungen $\vartheta \cong \varphi_x$, $w'_M \cong -\varphi_y$ und $v'_M \cong \varphi_z$. Der Index M bei w'_M und v'_M kennzeichnet, dass es sich um die Verdrehungen um den Schubmittelpunkt handelt, s. auch Bild 1.3.

Lasten

Es ist eine wesentliche Grundlage der Stabtheorie, dass Lasten bei der Verformung eines Tragwerks ihre Richtung beibehalten. Die Indizes x , y und z beziehen sich daher auf die **unverformte Ausgangslage**. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Lasten mit dem Tragwerk **fest verbunden** sind und sie daher wie ihr Angriffspunkt verschoben werden (s. Bild 1.6). Daraus resultiert auch, dass sich am verformten System (Theorie II. Ordnung) zusätzliche Beanspruchungen ergeben.

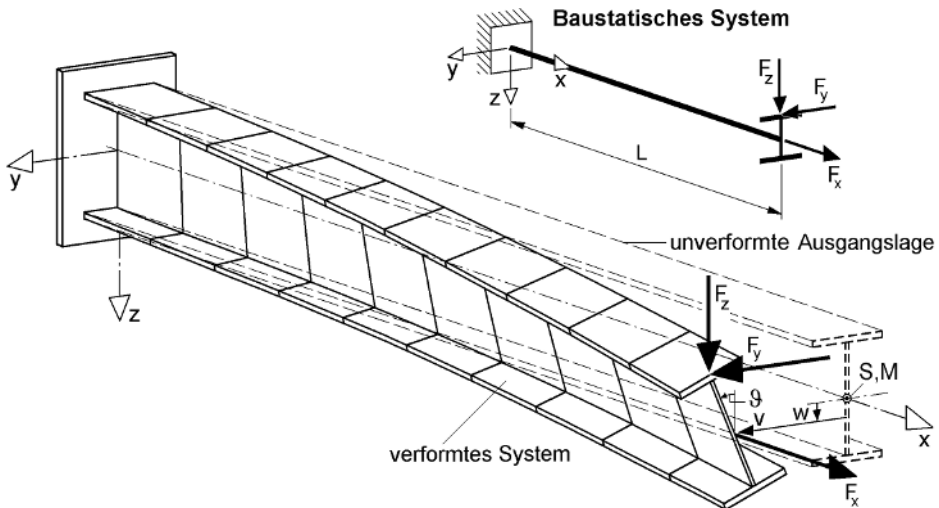


Bild 1.6 Grundsatzbeispiel Kragträger

Koordinatensysteme

Alle Verformungs- und Lastgrößen werden auf das x - y - z -System in der **unverformten Ausgangslage** des Stabes bezogen (siehe oben). Bei einer Verformung des Stabes geht das Koordinatensystem mit, weil es wie die Lasten fest mit dem Stab verbunden ist. Eigentlich müsste man das „mitgehende“ x - y - z -Koordinatensystem zwecks Unterscheidung anders bezeichnen. Dies hat sich aber nicht allgemein durchgesetzt, weil damit auch gewisse Nachteile verbunden sind.

Spannungen

Natürlich kann man Spannungen in beliebigen Koordinatensystemen angeben. Sinnvoll ist das aber nicht, weil damit die Tragfähigkeit von Querschnitten beurteilt werden soll. Es ist daher offensichtlich, dass sich die Richtungen der Spannungen auf das **mitgehende** x-y-z-Koordinatensystem beziehen. Die Normalspannung σ_x , die wichtigste Spannung bei Stäben, hat daher die gleiche Richtung wie die **verformte** Stabachse. Bei der Spannungsermittlung bestehen zwischen Theorie I. und II. Ordnung keine Unterschiede und man kann daher die üblichen Berechnungsformeln verwenden. Es kommt nur darauf an, den Einfluss der Theorie II. Ordnung bei den Schnittgrößen zu berücksichtigen und die Spannungen mit den „richtigen“ **Schnittgrößen**, den sogenannten Nachweisschnittgrößen, zu berechnen.

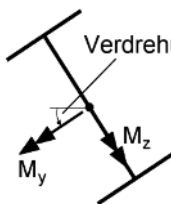
Schnittgrößen

Schnittgrößen werden in englischsprachigen Ländern häufig „stress resultants“, also Spannungserresultierende, genannt. Bei Stäben werden Spannungen σ_x , τ_{xy} und τ_{xz} in der Querschnittsebene gemäß Tabelle 1.1 zu „resultierenden“ Normalkräften, Querkraften, Biegemomenten, Torsionsmomenten und Wölbbimomenten, also

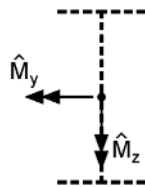
$$N, V_y, V_z, M_y, M_z, M_x \text{ und } M_\omega,$$

zusammengefasst. Da sie sich aus den Spannungen ergeben, beziehen sich die Schnittgrößen auf das „**mitgehende**“ x-y-z-Koordinatensystem, d. h. auf Querschnitte in der **verformten Lage**. Diese Schnittgrößen werden im Folgenden **Nachweisschnittgrößen** genannt, wenn eine Klarstellung zweckmäßig ist. Teilweise ist es sinnvoll, die Schnittgrößen auf andere Richtungen zu beziehen, beispielsweise auf das x-y-z-Koordinatensystem in der **unverformten Ausgangslage**. Zwecks Unterscheidung werden sie **Gleichgewichtsschnittgrößen** genannt. Zur Erläuterung ist in Bild 1.7 die Ermittlung der Nachweisschnittgrößen M_y und M_z aus den Gleichgewichtsschnittgrößen dargestellt, wenn sich der Querschnitt um den Winkel ϑ verdreht hat (Torsion). Für die Beurteilung der Querschnittstragfähigkeit müssen die Nachweisschnittgrößen verwendet werden.

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:

$$\cos \vartheta \approx 1, \sin \vartheta \approx \vartheta$$

$$M_y \approx \hat{M}_y + \hat{M}_z \cdot \vartheta$$

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

Bild 1.7 Nachweisschnittgrößen M_y und M_z

Stabilitätsuntersuchungen und Tragfähigkeit

Bei Stabilitätsuntersuchungen sind gemäß Abschnitt 1.5 homogene Gleichungssysteme der Ausgangspunkt der Berechnungen und es werden Eigenwerte (Verzweigungslasten N_{cr} , M_{cr}) sowie bei Bedarf Eigenformen (Knickbiegelineien) ermittelt. Wie bei den Berechnungen nach Theorie II. Ordnung müssen in einem ersten Rechenschritt die Schnittgrößen N , M_y , M_z und M_ω bestimmt werden. Die Tragfähigkeit stabilitätsgefährdeter Tragwerke kann gemäß Kapitel 2 mit den folgenden Verfahren nachgewiesen werden (s. Tabelle 2.10):

- Ersatzstabverfahren (ESV) mit Abminderungsfaktoren χ bzw. χ_{LT}
- Ersatzimperfektionsverfahren (EIV) mit w_0 oder v_0
- Fließzonentheorie (FZT) mit w_0 oder v_0 und Eigenspannungen

1.3 Bezeichnungen und Annahmen

Koordinaten, Ordinaten und Bezugspunkte, s. Bild 1.8

x	Stablänsrichtung
y, z	Hauptachsen in der Querschnittsebene
ω	normierte Wölbordinate
s	Profilordinate
S	Schwerpunkt
M	Schubmittelpunkt

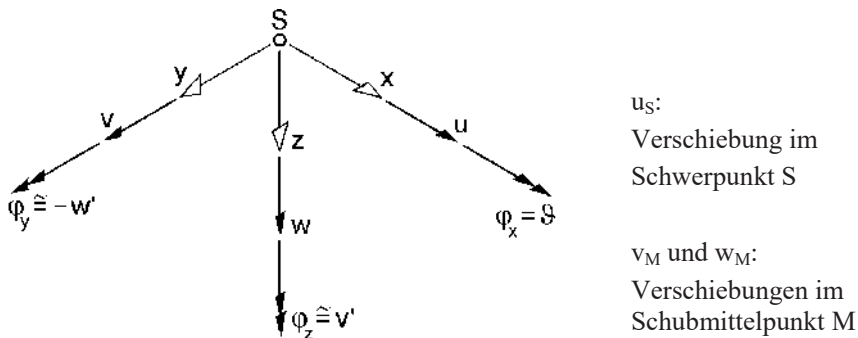


Bild 1.8 x-y-z-KOS und Definition der positiven Verschiebungsgrößen

Bei Stäben ist die **x-Achse stets die Stabachse** und die Achsen **y** und **z** bilden die Querschnittsebene, s. Bilder 1.3 bis 1.5. In Bild 1.4 sind einige Querschnitte dargestellt. Dort werden beispielhaft die Lage der Bezugspunkte S und M sowie die Richtung der **Hauptachsen y und z** gezeigt. Die Profilordinate **s** und die Wölbordinate ω werden in Bild 1.5 an einem Beispiel erläutert.

Verschiebungsgrößen, s. Bild 1.8

u, v, w	Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung
$\varphi_x = \vartheta$	Verdrehung um die x-Achse
$\varphi_y \cong -w'$	Verdrehung um die y-Achse
$\varphi_z \cong v'$	Verdrehung um die z-Achse
$\psi \cong \vartheta'$	Verdrillung der x-Achse

Einwirkungen, Lastgrößen, s. Bild 1.9

q_x, q_y, q_z	Streckenlasten
F_x, F_y, F_z	Einzellasten
m_x	Streckentorsionsmoment
M_{xL}	Lasttorsionsmoment
M_{yL}, M_{zL}	Lastbiegemomente
$M_{\omega L}$	Lastwölbbimoment

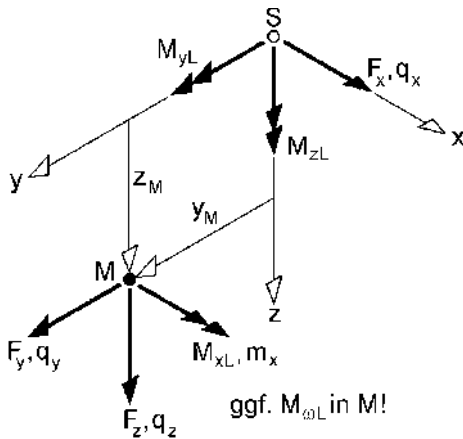


Bild 1.9 Positive Wirkungsrichtungen und Angriffspunkte der Lastgrößen

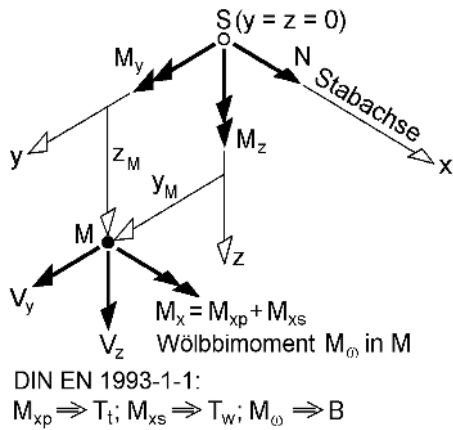


Bild 1.10 Schnittgrößen an der positiven Schnittfläche eines Stabes

Schnittgrößen, s. Bild 1.10

N	Längskraft, Normalkraft
V_y, V_z	Querkräfte
M_y, M_z	Biegemomente
M_x	Torsionsmoment
M_{xp}	primäres Torsionsmoment

DIN EN 1993-1-1:

T
 T_t

M_{xs}	sekundäres Torsionsmoment	T_w
M_ω	Wölbbimoment	B
Index el	Grenzschnittgrößen nach der Elastizitätstheorie	
Index pl	Grenzschnittgrößen nach der Plastizitätstheorie	
Index Rd	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit	
Index Ed	Bemessungswert der Beanspruchung	

Spannungen, s. Bild 1.11

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Schubspannungen
σ_v	Vergleichsspannung

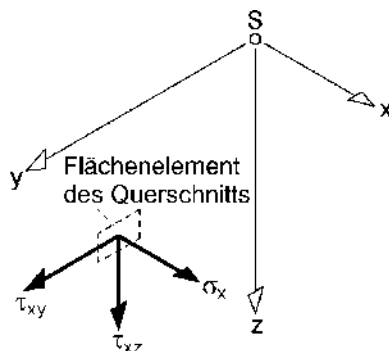


Bild 1.11 Spannungen an der positiven Schnittfläche eines Stabes

Die Spannungen werden gemäß Tabelle 1.1 zu resultierenden Schnittgrößen zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Normalkraft und die Biegemomente im Schwerpunkt wirken, die Querkräfte, die Torsionsmomente und das Wölbbimoment dagegen im Schubmittelpunkt, vgl. Bild 1.10.

Tabelle 1.1 Schnittgrößen als Resultierende der Spannungen

Bedingung	Schnittgröße	Definition
$\sum F_x = 0$	Normalkraft	$N = \int_A \sigma_x \cdot dA$
$\sum V_y = 0$	Querkraft	$V_y = \int_A \tau_{xy} \cdot dA$
$\sum V_z = 0$	Querkraft	$V_z = \int_A \tau_{xz} \cdot dA$
$\sum M_x = 0$	Torsionsmoment	$M_x = \int_A [\tau_{xz} \cdot (y - y_M) - \tau_{xy} \cdot (z - z_M)] \cdot dA = M_{xp} + M_{xs}$
$\sum M_y = 0$	Biegemoment	$M_y = \int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA$
$\sum M_z = 0$	Biegemoment	$M_z = - \int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA$
	Wölbbimoment	$M_\omega = \int_A \sigma_x \cdot \omega \cdot dA$

Querschnittskennwerte

A	Fläche
I_y, I_z	Hauptträgheitsmomente
I_{ω}, I_T	Wölbwiderstand, Torsionsträgheitsmoment
W_y, W_z	Widerstandsmomente
S_y, S_z	statische Momente
$i_M, r_y, r_z, r_{\omega}$	Größen für Theorie II. Ordnung und Stabilität, s. Tabelle 9.2
$i_p = \sqrt{\frac{I_y + I_z}{A}}$	polarer Trägheitsradius

Biegeknicken (BK) und Biegedrillknicken (BDK)

N_{cr}	ideale Drucknormalkraft (Verzweigungslast, Eigenwert)
L_{cr}	Knicklänge für Biegeknicken
α_{cr}	Verzweigungslastfaktor des Systems (Eigenwert)
$M_{cr,y}$	ideales Biegedrillknickmoment (Eigenwert)
$\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_{LT}$	bezogene Schlankheitsgrade
χ, χ_{LT}	Abminderungsfaktoren (LT: lateral torsional buckling)
λ_1	Bezugsschlankheitsgrad
w_0, v_0	Vorkrümmungen (Imperfektionen)
φ_0	Vorverdrehung, Schiefstellung (Imperfektion)
ε	Stabkennzahl für Biegeknicken

Plattenbeulen

σ_E	Bezugsspannung
k_{σ}, k_{τ}	Beulwerte
σ_{cr}, τ_{cr}	ideale Beulspannungen (Eigenwerte)
$\bar{\lambda}_p$	bezogener Schlankheitsgrad
ρ, χ	Abminderungsfaktoren

Werkstoffkennwerte für Stahl, s. Bild 2.1 und Abschnitt 2.3

E	Elastizitätsmodul	$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
G	Schubmodul	$G = E/(2 \cdot (1 + \nu)) \approx 8100 \text{ kN/cm}^2$
ν	Poissonsche Zahl	$\nu = 0,3$ (Querkontraktion)
ρ	Dichte	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
f_y	Streckgrenze	
τ_R	$= f_y / \sqrt{3}$	
f_u, ε_u	Zugfestigkeit, Bruchdehnung	

Teilsicherheitsbeiwerte/Bemessungswerte

γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsgrößen (M aterial)
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen (F orce)
ψ	Kombinationsbeiwert
E_d, R_d	Bemessungswerte der Beanspruchungen bzw. der Beanspruchbarkeiten

Abkürzungen

BDK	Biegedrillknicken
DGL	Differentialgleichung
ESV	Ersatzstabverfahren mit Abminderungsfaktoren χ bzw. χ_{LT} , s. Kapitel 3 bis 6
EIV	Ersatzimperfektionsverfahren mit w_0, v_0 bzw. φ_0 , s. Kapitel 7
FEM	Finite Elemente Methode
FZT	Fließzonentheorie mit w_0, v_0 bzw. φ_0 und Eigenspannungen, s. Kapitel 11
GMNIA	Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections
TSV	Teilschnittgrößenverfahren, s. Abschnitt 7.5.5

Fließkriterium

$$\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}{f_y^2} - \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_y \cdot \sigma_z}{f_y^2} + 3 \cdot \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}{f_y^2} \leq 1$$

Vergleichsspannung

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_y \cdot \sigma_z) + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \leq f_y$$

Sofern nicht anders angegeben, gelten folgende **Annahmen** und **Voraussetzungen**:

- Es wird linearelastisches-idealplastisches Werkstoffverhalten gemäß Bild 2.1 vorausgesetzt.
- Verformungen sind so klein, dass geometrische Beziehungen linearisiert werden können, s. Tabelle 2.1.
- Die Querschnittsform eines Stabes bleibt bei Belastung und Verformung erhalten.
- Für zweiachsige Biegung mit Normalkraft wird die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte vorausgesetzt und der Einfluss von Schubspannungen infolge von Querkraften auf die Verformungen vernachlässigt (schubstarre Stäbe).
- Bei der Wölbkrafttorsion wird die Wagner-Hypothese vorausgesetzt und der Einfluss von Schubspannungen infolge des sekundären Torsionsmomentes auf die Verdrehung vernachlässigt.

1.4 Grundlegende Beziehungen nach Theorie I. Ordnung

Bei der Stabtheorie wird in der Regel von den folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- y und z sind die Hauptachsen des Querschnitts.
- Die Stabachse verläuft durch den Schwerpunkt S .
- Einige Lasten, Verformungen und Schnittgrößen werden auf den Schwerpunkt S bezogen, andere auf den Schubmittelpunkt M (s. Bilder 1.3, 1.4, 1.9 und 1.10).
- ω ist die normierte Wölbordinate.
- Die Querschnittskennwerte beziehen sich auf die Hauptachsen und die Punkte S bzw. M .

Aufgrund dieser Vorgehensweise können bei der linearen Stabtheorie (Theorie I. Ordnung) beliebige Beanspruchungsfälle in vier voneinander entkoppelte Teilprobleme aufgeteilt werden:

Normalkraft, Biegung um die z -Achse, Biegung um die y -Achse und Torsion

In Tabelle 1.2 sind die grundlegenden Beziehungen für die vier Teilprobleme der linearen Theorie schubstarrer Stäbe zusammengestellt. Die Tabelle enthält eine Zuordnung der Lastgrößen, Verformungen und Schnittgrößen sowie Angaben zum Gleichgewicht am Stabelement und zur Normalspannung σ_x .

Tabelle 1.2 Vier Teilprobleme bei der linearen Stabtheorie nach [21]

	„Normal- kraft“	„Biegung um die z -Achse“	„Biegung um die y -Achse“	„Torsion“
Lastgrößen	$q_x; F_x$	$q_y; F_y; M_{zL}$	$q_z; F_z; M_{yL}$	$m_x; M_{xL}; M_{\omega L}$
Verformun- gen	$u = u_S$	$v = v_M$ $u = -y \cdot v'_M$	$w = w_M$ $u = -z \cdot w'_M$	ϑ $u = -\omega \cdot \vartheta'$ $v = -(z - z_M) \cdot \vartheta$ $w = (y - y_M) \cdot \vartheta$
Schnitt- größen	N	M_z V_y	M_y V_z	M_ω $M_x = M_{xp} + M_{xs}$
Gleich- gewicht	$N' = -q_x$	$M'_z = -V_y$ $V'_y = -q_y$	$M'_y = V_z$ $V'_z = -q_z$	$M'_\omega = M_{xs}$ $M'_x = -m_x$
Spannung $\sigma_x =$	$\frac{N}{A}$ $= E \cdot u'_S$	$-\frac{M_z}{I_z} \cdot y$ $= -E \cdot y \cdot v''_M$	$\frac{M_y}{I_y} \cdot z$ $= -E \cdot z \cdot w''_M$	$\frac{M_\omega}{I_\omega} \cdot \omega$ $= -E \cdot \omega \cdot \vartheta''$

Als Beispiel für die Aufteilung in die vier Teilprobleme wird in Bild 1.12 ein Einfeldträger untersucht, der durch F_x , F_y , q_z und m_x belastet wird. Bei der **linearen Stabtheorie** (Theorie I. Ordnung) können die vier Teilprobleme getrennt voneinander untersucht werden. Bild 1.12 zeigt, welche Beanspruchungsfälle durch die einzelnen Lastgrößen entstehen und welche Verformungen und Schnittgrößen auftreten. Darüber hinaus verdeutlicht das Bild, welche Knotenfreiwerte bei der FEM zu dem jeweiligen Beanspruchungsfall gehören.

Für das Beispiel in Bild 1.12 wurden Berechnungen mit dem Programm FE-STAB durchgeführt und dabei der Träger in zehn gleich lange Stabelemente eingeteilt. Damit ist die Modellierung fein genug, dass die Funktionsverläufe für die Verformungen und Schnittgrößen vom Programm in zutreffender Weise dargestellt werden können. Im Hinblick auf die Rechengenauigkeit sind bei der Wölbkrafttorsion mindestens fünf Stabelemente erforderlich, s. Bild 3.9 in [29].

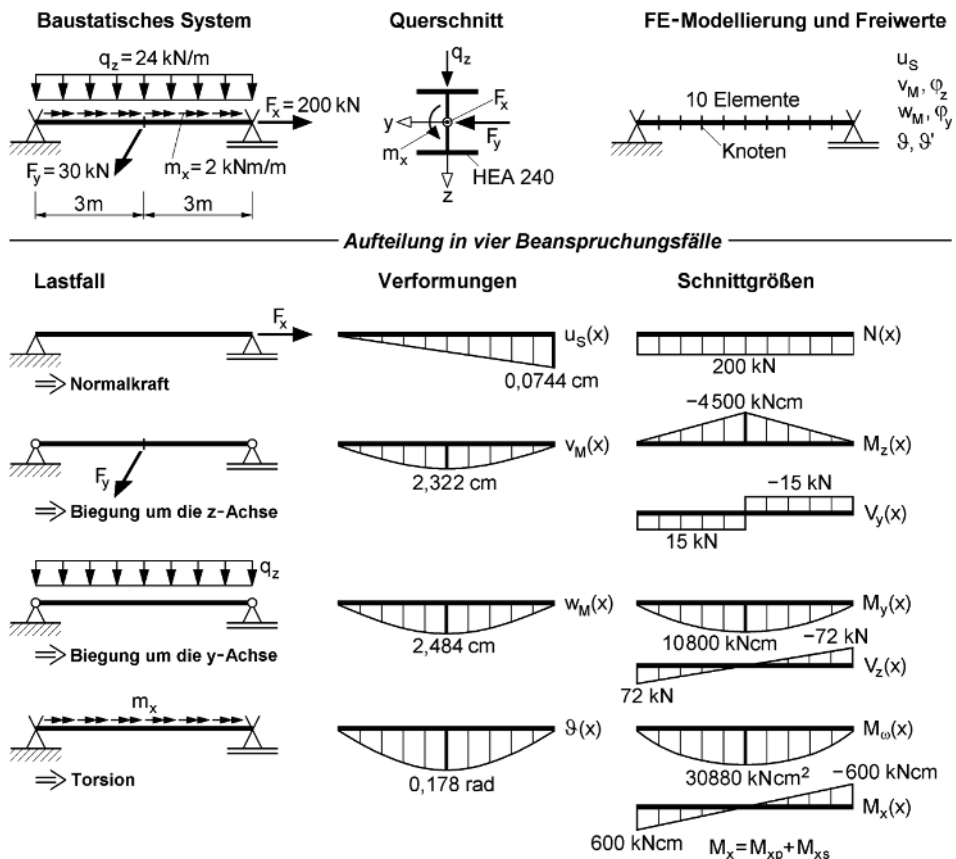


Bild 1.12 Beispiel zur Aufteilung in vier Beanspruchungsfälle und Ergebnisse bei der **linearen Stabtheorie**

1.5 Stabilität und Theorie II. Ordnung

Der Titel des vorliegenden Buches lautet „Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung“. Wie bereits mit Bild 1.1 anschaulich erläutert, geht es hauptsächlich um druckbeanspruchte Bauteile, oder, allgemeiner ausgedrückt, um die Tragfähigkeit von Stahlkonstruktionen, bei denen die Stabilitätsfälle Biegeknicken, Drillknicken, Biegedrillknicken und Plattenbeulen bemessungsrelevant sind.

Den Ausgangspunkt der Problemstellung bilden in der Regel die Schnittgrößen und Verformungen, die mit den üblichen Methoden der Statik für lineares Materialverhalten (Hooke'sches Gesetz) und der geometrisch linearen Theorie (s. Tabelle 2.1) berechnet werden. Bei einfachen baustatischen Systemen können die Berechnungen häufig mit Gleichgewichtsbedingungen, Formeln oder Tabellenwerken durchgeführt werden. Als Standardverfahren für beliebige Systeme wird in der Regel die Methode der Finiten Elemente (FEM) verwendet, die in [29] ausführlich behandelt wird.

Für Berechnungen nach der Elastizitätstheorie I. Ordnung ergibt sich in [29], Abschnitt 3.5, das Gleichungssystem

$$\underline{K} \cdot \underline{v} = \underline{p} \quad (1.3)$$

zur Bestimmung der unbekannten Verformungsgrößen \underline{v} . $\underline{K}(Q)$ ist die Gesamtsteifigkeitsmatrix, in die die Querschnittskennwerte („Q“) A , I_y , I_z , I_{ω} und I_T eingehen. Der Vektor \underline{p} enthält die Lastgrößen des Systems. Gl. (1.3) ist die Systemgleichung für die Ermittlung von Schnittgrößen und Verformungen nach Theorie I. Ordnung.

Für geometrisch nichtlineare Berechnungen nach Theorie II. Ordnung wird das Gleichungssystem um die geometrische Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{G} erweitert und durch einen Lastvektor, der die geometrischen Imperfektionen erfasst, ergänzt:

$$(\underline{K} + \underline{G}) \cdot \underline{v} = \underline{p} - \underline{p}_0 \quad \text{mit:} \quad \underline{p}_0 = \underline{G} \cdot \underline{v}_0 \quad (1.4)$$

In die geometrische Steifigkeitsmatrix $\underline{G}(S, F)$ gehen die Schnittgrößen („S“) N , M_y , M_z und M_{π} sowie außermittig angreifende Einzel- und Gleichstreckenlasten („F“) ein, s. Bild 8.8 und Tabelle 9.2. Gl. (1.4) ist die Systemgleichung für Berechnungen nach dem **Ersatzimperfektionsverfahren (EIV)**, also für Berechnungen nach Theorie II. Ordnung mit Ansatz von Vorkrümmungen v_0 bzw. w_0 oder Vorverformungen φ_0 . Bild 1.2 enthält als Beispiel einen vorverformten Druckstab (Fall b).

Aufgrund der Formulierung des Gleichgewichts am schwach verformten System und der damit verbundenen Linearisierung nach Theorie II. Ordnung (s. Tabelle 2.1) stellt Gl. (1.4) ein lineares Gleichungssystem dar, das sich mit zwei Rechenschritten lösen lässt. Da die Schnittgrößen, die in die geometrische Steifigkeitsmatrix eingehen, zu Beginn der Berechnungen nicht bekannt sind, wird zunächst das Gleichungssystem (1.3) gelöst und es werden damit die Schnittgrößen N , M_y , M_z und M_{π} nach Theorie I. Ordnung berechnet. Im zweiten Schritt kann das Gleichungssystem (1.4) gelöst wer-

den, wenn man die Schnittgrößen und die außermittigen Lasten in die Matrix $\underline{G}(S, F)$ einsetzt.

Als Ausgangspunkt zur Lösung von **Stabilitätsproblemen** werden stets **homogene Grundgleichungen** verwendet. Bei der FEM wird in Gl. (1.4) die rechte Seite gleich null gesetzt und vor der geometrischen Steifigkeitsmatrix ein Faktor $\alpha_{cr,r}$ ergänzt, sodass man die folgende **homogene** Matrixengleichung erhält:

$$(\underline{K} + \alpha_{cr,r} \cdot \underline{G}) \cdot \underline{v}_r = \underline{0} \quad (1.5)$$

In Gl. (1.5) sind $\alpha_{cr,r}$ **Eigenwerte** und \underline{v}_r **Eigenvektoren**, die die **Eigenformen** des baustatischen Systems beschreiben. Ein Gleichungssystem mit n Gleichungen, d. h. n unbekannten Knotenfreiwerten, hat stets n Eigenwerte und zugehörige Eigenvektoren, was durch den Index „r“ gekennzeichnet wird.

Häufig werden nur der kleinste Eigenwert und ggf. die zugehörige Eigenform benötigt. Manchmal muss auch der 2. oder 3. Eigenwert berechnet werden, wobei man höhere Eigenwerte und Eigenformen nur gelegentlich beim Plattenbeulen oder bei Schwingungsproblemen ermitteln muss. Zur Vereinfachung verzichtet man in Gl. (1.5) auf den Index „r“ und verwendet als homogenes Gleichungssystem:

$$(\underline{K} + \alpha_{cr} \cdot \underline{G}) \cdot \underline{v} = \underline{0} \quad (1.6)$$

Mit dem Faktor α_{cr} ist dann der kleinste (oder der gesuchte höhere) **Eigenwert** gemeint und \underline{v} ist der zugehörige **Eigenvektor**.

Bei den Stabilitätsfällen des Bauwesens wird der Eigenwert α_{cr} in der Regel **Verzweigungslastfaktor** genannt, weil, wie in Bild 1.2 dargestellt, von einer „Verzweigung des Gleichgewichts“ ausgegangen wird. Wenn man bei dem ideal geraden Druckstab (keine Imperfektionen, unbegrenzt elastisch) die Druckkraft schrittweise erhöht, ist der Stab zunächst im stabilen Gleichgewicht, bis bei $N = N_{cr}$ indifferentes Gleichgewicht auftritt. Da die Matrix \underline{G} eine Normalkraft N enthält, die mit Gl. (1.3) nach Theorie I. Ordnung berechnet worden ist, ergibt sich mit α_{cr} nach Gl. (1.6) $N_{cr} = \alpha_{cr} \cdot N$. Weitere Erläuterungen zum stabilen, indifferenten und labilen Gleichgewicht können Tabelle 4.1 und Bild 4.2 entnommen werden.

Bei den Stabilitätsfällen des Stahlbaus werden relativ viele unterschiedliche Bezeichnungen verwendet, die dem Leser das Verständnis erschweren. Tabelle 1.3 enthält daher eine Zusammenstellung, in der den mathematischen Begriffen Eigenwert und Eigenform entsprechende Bezeichnungen des Bauwesens zugeordnet werden. Die Tabelle zeigt auch, dass es schwierig ist, für alle Fälle zutreffende und prägnante Bezeichnungen festzulegen.

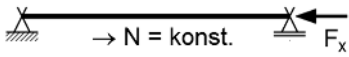
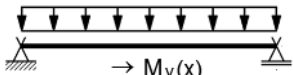
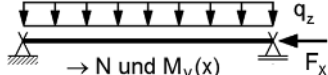
Beim Stabilitätsfall Biegeknicken nennt man die Eigenformen Knickbiegelineien. Die Last F_x führt zu einer konstanten Druckkraft N . Damit ergeben sich eine Verzweigungslast $F_{cr,x}$ und eine kritische Druckkraft N_{cr} . In DIN EN 1993-1-1 wird N_{cr} als „ideale Verzweigungslast“ bezeichnet. Das ist nicht ganz zutreffend, weil N keine Last, sondern eine Schnittgröße ist. Da der Index „cr“ eine Abkürzung für „critical“

ist (früher „ χ “ von kritisch), könnte man anstelle von Verzweigungslast auch den Begriff „kritische Druckkraft“ verwenden. Beim Biegedrillknicken ergibt sich infolge q_z eine Verzweigungslast $q_{cr,z}$ und daraus gemäß DIN EN 1993-1-1 ein ideales Biegedrillknickmoment $M_{cr,y}(x)$, das zu $M_y(x)$ affin ist. Eine ingenieurspezifische Bezeichnung für die Eigenform gibt es nicht.

Im Hinblick auf die zu führenden Tragfähigkeitsnachweise benötigt man Folgendes:

- N_{cr} für Nachweise mit Abminderungsfaktoren χ , s. Bedingung (3.1)
- $M_{cr,y}$ für Nachweise mit Abminderungsfaktoren χ_{LT} , s. Bedingung (5.1)
- α_{cr} für Nachweise nach Abschnitt 5.4 für Druck und Biegung sowie für Nachweise zum Plattenbeulen (Kapitel 12)
- Eigenformen für den Ansatz von geometrischen Ersatzimperfektionen beim EIV, s. Abschnitt 7.3
- Eigenformen für den Ansatz von geometrischen Imperfektionen bei der Fließzonentheorie, s. Abschnitt 11.3.3.1

Tabelle 1.3 Bezeichnungen bei den Stabilitätsfällen

Stabilitätsfall	Eigenwert	Eigenform
Biegeknicken	 $\rightarrow N = \text{konst.}$ Verzweigungslast $F_{cr,x}$, N_{cr} kritische Druckkraft N_{cr}	Knickbiegelines $w(x)$ oder $v(x)$
Drillknicken	s. Biegeknicken	Drillknickverdrehung $\vartheta(x)$
Biegedrillknicken	 $\rightarrow M_y(x)$ Verzweigungslast $q_{cr,z}$ Biegedrillknickmoment $M_{cr,y}(x)$	BDK-Verformungen $v(x)$ und $\vartheta(x)$ der Eigenform
Kombination Biegeknicken mit Biegedrillknicken	 $\rightarrow N$ und $M_y(x)$ Verzweigungslastfaktor α_{cr} Verzweigungslasten $q_{cr,z} = \alpha_{cr} \cdot q_z$ und $F_{cr,x} = \alpha_{cr} \cdot F_x$	Verformungen $w(x)$, $v(x)$ und $\vartheta(x)$ der Eigenform
Plattenbeulen	Verzweigungslastfaktor α_{cr} Ideale Beulspannungen $\sigma_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_x$; $\tau_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \tau$	Beulfläche $w(x,y)$ s. Bilder 2.5 und 2.6 sowie Kapitel 12

Anmerkung: In Kapitel 9 „Lösung von Eigenwertproblemen“ in [29] wird die Ermittlung von Eigenwerten und Eigenformen mithilfe des Matrizenzerlegungsverfahrens und der inversen Vektoriteration ausführlich behandelt und es werden zahlreiche baupraktische Anwendungshinweise gegeben.

1.6 Buchinhalt (Übersicht)

Die Gliederung des vorliegenden Buches ist mit den Kapitelüberschriften in Tabelle 1.4 zusammengestellt. Zur schnelleren Orientierung werden im Folgenden die Inhalte der Kapitel kurz erläutert. Abschnitt 1.7 enthält eine Übersicht über die im Buch enthaltenen Berechnungsbeispiele.

Tabelle 1.4 Themen der zwölf Kapitel des Buches

Kapitel	Überschrift
1	Einleitung und Übersicht
2	Tragverhalten, Berechnungs- und Nachweisverfahren
3	Nachweise zum Biegeknicken mit Abminderungsfaktoren χ
4	Stabilitätsproblem Biegeknicken
5	Nachweise für das Biegedrillknicken mit Abminderungsfaktoren χ_{LT}
6	Stabilitätsproblem Biegedrillknicken
7	Theorie II. Ordnung mit Ersatzimperfectionen
8	Theorie II. Ordnung für Biegung mit Normalkraft
9	Theorie II. Ordnung für beliebige Beanspruchungen
10	Aussteifung und Stabilisierung
11	Fließzonentheorie – Berechnungen, Tragverhalten und Nachweise
12	Stabilitätsproblem Plattenbeulen und Beulnachweise

Die ersten drei Abschnitte in **Kapitel 1** sind Einführung, Grundsätzliches sowie Bezeichnungen und Annahmen. Es folgen grundlegende Beziehungen nach Theorie I. Ordnung sowie zur Stabilität und Theorie II. Ordnung. Mit den Abschnitten 1.6 und 1.7 werden kurze Übersichten zu den Themen des Buches und zu den enthaltenen Berechnungsbeispielen gegeben.

Zwei besonders wichtige Abschnitte sind 1.8 „Downloads/Software“ und 1.9 „Hinweise zum Norm-Entwurf der DIN EN 1993-1-1:2020-08“. Wie in Abschnitt 1.8 ausgeführt, stehen einige EDV-Programme zum kostenlosen Download bereit, die für die Berechnungsbeispiele des Buches benötigt werden. In Abschnitt 1.9 wird auf neue Regelungen im Norm-Entwurf hingewiesen, die sich auf die Berechnungen und baupraktische Nachweise auswirken.

In **Kapitel 2** wird erläutert, welche Nachweisverfahren zur Verfügung stehen und was bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung und bei Stabilitätsuntersuchungen zu beachten ist. Es wird klargestellt, dass die Theorie II. Ordnung eine Näherung für die geometrisch nichtlineare Theorie ist, die für Baukonstruktionen zweckmäßig ist und zu sinnvollen Ergebnissen führt. Das Kapitel soll vermitteln, dass prinzipiell drei verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen:

- Nachweise mit Abminderungsfaktoren χ bzw. χ_{LT} unter Verwendung von Verzweigungslasten N_{cr} bzw. $M_{cr,y}$
- Berechnungen nach Theorie II. Ordnung mit Ersatzimperfektionen
- Fließzonentheorie mit Eigenspannungen und geometrischen Imperfektionen

Berechnungen nach der Fließzonentheorie (FZT) liefern die genauesten Ergebnisse, können aber ohne entsprechende EDV-Programme nicht durchgeführt werden. In der Baupraxis werden die Nachweise in der Regel mit Abminderungsfaktoren oder mit dem Ersatzimperfektionsverfahren geführt. Diese Nachweise sind im Vergleich zur FZT Näherungen. In Abschnitt 2.12 werden die drei Verfahren bezüglich ihrer Genauigkeit beurteilt.

Kapitel 2 enthält darüber hinaus zahlreiche Hinweise zum Tragverhalten stabilitätsgefährdeter Tragwerke und die Erläuterung der Berechnungsgrundlagen. Wegen seiner Bedeutung wird Abschnitt 2.11 hier besonders erwähnt. In diesem Abschnitt wird ein Zweigelenkrahmen als „**baupraktisches Lehrbeispiel**“ ausführlich behandelt. Dabei werden zahlreiche Aspekte zum Tragverhalten und zu den Nachweisen erläutert und darüber hinaus zahlreiche Bezüge zu anderen Abschnitten des Buches hergestellt.

In **Kapitel 3** sind die vereinfachten Nachweise für das **Biegeknicken** unter Verwendung von **Abminderungsfaktoren** χ zusammengestellt. Dabei geht es im Wesentlichen um die Anwendung der Nachweisbedingungen bei verschiedenen baupraktischen Systemen. Ergänzend dazu wird ein Bezug zu den Knickzahlen ω nach DIN 4114 hergestellt und es wird die Genauigkeit der Abminderungsfaktoren χ angesprochen.

Das **Stabilitätsproblem Biegeknicken** wird in **Kapitel 4** behandelt und es werden Methoden zur Ermittlung von Knicklängen und Verzweigungslasten vermittelt. Sie werden für die vereinfachten Nachweise in Kapitel 3 benötigt, können aber auch für die Vergrößerungsfaktoren in Kapitel 8 verwendet werden. Kapitel 4 ist ein zentrales Kapitel des Buches, da dort das stabile Gleichgewicht unterschiedlicher baustatischer Systeme eingehend untersucht und entsprechende Berechnungsmethoden vorgestellt werden.

Die vereinfachten Nachweise für das **Biegedrillknicken** unter Verwendung von **Abminderungsfaktoren** χ_{LT} werden in **Kapitel 5** behandelt. Es entspricht daher konzeptionell Kapitel 3, das die Nachweisbedingungen für das Biegeknicken enthält. Das Kapitel enthält Bemessungshilfen für das Biegedrillknicken von Einfeldträgern, den sogenannten Doppelnachweis für die Kombination von Biegeknicken mit Biegedrillknicken, ein allgemeines Nachweisverfahren für Bauteile, den Nachweis von Druckgurten als Druckstab sowie Hinweise zur Nachweisführung.

Das **Kapitel 6 „Stabilitätsproblem Biegedrillknicken“** entspricht prinzipiell Kapitel 4. Es werden Verzweigungslasten für das Biegedrillknicken berechnet, die für die Nachweise in Kapitel 5 benötigt werden. Im Vordergrund des Kapitels stehen die

Methoden zur Berechnung von $M_{cr,y}$ sowie die Herleitung und Verwendung von Berechnungsformeln für verschiedene baustatische Systeme.

In **Kapitel 7** wird erläutert, wie bei Berechnungen nach **Theorie II. Ordnung** unter Berücksichtigung von **Ersatzimperfektionen** vorzugehen ist. Dabei werden die Größe und der Verlauf der geometrischen Ersatzimperfektionen sowie die Ermittlung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung und der Nachweis ausreichender Querschnittstragfähigkeit behandelt. In Abschnitt 7.6 werden Tragfähigkeitsnachweise für zahlreiche Anwendungsbeispiele geführt.

Kapitel 8 „Theorie II. Ordnung für Biegung mit Normalkraft“ ist ein zentrales Grundlagenkapitel des Buches, das das Biegeknicken von Stäben und Stabwerken und darüber hinaus auch den Einfluss von Zugnormalkräften abdeckt. Es enthält alle erforderlichen Herleitungen, die im Übrigen auch für Kapitel 4 benötigt werden, und Lösungsverfahren für das Biegeknicken. Die Methoden und Verfahren sind für das Verständnis der Zusammenhänge und des Tragverhaltens von besonderer Bedeutung.

In **Kapitel 9** wird die **Theorie II. Ordnung für beliebige Beanspruchungen** behandelt. Da dabei die Verformungen $u(x)$, $v(x)$, $w(x)$ und $\vartheta(x)$ in einer beliebigen Kombination auftreten können, sind die Herleitungen gegenüber Kapitel 8 umfangreicher und auch deutlich „theorielastiger“. Als Erweiterung und Fortsetzung von Kapitel 8 dient es zur Lösung allgemeiner Problemstellungen bei Stäben und Stabwerken. Im Hinblick auf baupraktische Fragestellungen wird Folgendes behandelt: Nachweise mit Formeln, Einfluss der Querschnittsform, Biegedrillknicken mit planmäßiger Torsion, realistische Lastangriffspunkte und Einfluss von Trägerüberständen.

Die **Aussteifung** und **Stabilisierung** von Bauteilen und Tragwerken wird in **Kapitel 10** behandelt. Es wird gezeigt, welche Konstruktionen eine aussteifende Wirkung haben, wie sie die Stabilitätsgefahr verringern und welche Beanspruchungen in ihnen auftreten. Kapitel 10 steht in einem engen Zusammenhang mit den anderen Kapiteln des Buches, weil sich die Aussteifungen sowohl auf die Stabilität als auch auf die Theorie II. Ordnung auswirken. In Abschnitt 10.6 wird das „Ausführungsbeispiel Sporthalle“ unter Berücksichtigung eines Schubfeldes behandelt. Das „Ausführungsbeispiel Lagerhalle“ in Abschnitt 10.7 ist mit ca. 20 Seiten besonders umfangreich. Dort werden u. a. die Tragfähigkeitsnachweise für die Zweigelenkrahmen unter Berücksichtigung der Dach- und Wandverbände geführt.

In **Kapitel 11** werden neben einigen grundlegenden Erläuterungen und Hinweisen zur **Fließzonentheorie** die Auswirkungen von Fließzonen auf die Tragfähigkeit ausführlich untersucht. Anschließend werden Berechnungen mit dem Programm FE-STAB-FZ erläutert, weil die Anwendung der Fließzonentheorie nur mit EDV-Programmen möglich ist. Bei den entsprechenden Ausführungen geht es um die Anwendungsbereiche, den Ansatz von Imperfektionen (Vorkrümmungen, Eigenspannungen), die Erfassung der Fließzonen, die Durchführung der Systemberechnungen und die Kontrollen der Ergebnisse. Abschnitt 11.4 enthält zahlreiche Berechnungsbeispiele.

In **Kapitel 12** werden das **Stabilitätsproblem Plattenbeulen** und die entsprechenden **Beulnachweise** behandelt. Für das Verständnis ist es hilfreich, wenn man sich zunächst die Bilder 2.5 und 2.6 sowie Tabelle 2.10 ansieht, weil beim Plattenbeulen Nachweise mit Abminderungsfaktoren geführt werden, also wie beim Biegeknicken in den Kapiteln 3 und 4. In Kapitel 12 werden die Grundlagen für Beulnachweise und die Nachweise nach DIN EN 1993-1-1 erläutert. Darüber hinaus werden die Berechnungen und Nachweise für Beulfelder mit und ohne Steifen behandelt sowie wichtige Konstruktionsdetails und das überkritische Tragverhalten. Abschnitt 12.8 enthält umfangreiche Berechnungsbeispiele.

1.7 Berechnungsbeispiele (Übersicht)

Erfahrungsgemäß sucht man in Büchern häufig Berechnungsbeispiele, die als Vorlage für eigene Aufgabenstellungen herangezogen werden können. Die folgenden Tabellen erleichtern das Auffinden von relevanten Berechnungsbeispielen. Die entsprechenden Abschnittsnummern lassen erkennen, welches Thema im Vordergrund steht. Sofern das bspw. das Ersatzimperfektionsverfahren ist, werden häufig aber auch Ergebnisse nach anderen Verfahren mitgeteilt (Abminderungsfaktoren, FZT).

Tabelle 1.5 Baupraktisches Lehrbeispiel Zweigelenkrahmen

Abschnitt	Abschnittsüberschrift
2.11.1	Einleitung
2.11.2	Mögliche und sinnvolle Nachweisverfahren
2.11.3	Biegeknicken in der Rahmenebene
2.11.4	Biegedrillknicken und Biegeknicken um die schwache Achse
2.11.5	Rahmenecken – Konstruktion und Tragfähigkeit
2.11.6	Gabellager und Wölbbehinderungen in Rahmenecken
2.11.7.	Rahmennachweise mit Abminderungsfaktoren
2.11.8	Grenztragfähigkeit des Zweigelenkrahmens

Für das „baupraktische Lehrbeispiel Zweigelenkrahmen“ sind in Tabelle 1.5 die Überschriften der Abschnitte 2.11.1 bis 2.11.8 zusammengestellt, damit gezielt einzelne Themen ausgewählt werden können. Der Zweigelenkrahmen wird ausführlich als Beispiel für den Nachweis ausreichender Tragfähigkeit eines stabilitätsgefährdeten Tragwerks aus Baustahl behandelt. Die bewusst breit angelegten Ausführungen gehen weit über die üblichen Nachweise für einen Zweigelenkrahmen hinaus, weil sie die fachliche Basis für andere Tragwerke bilden und Bezüge zu anderen Kapiteln des Buches herstellen sollen.

Tabelle 1.6 Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 2 bis 6

Abschnitt	Beispiel
2.6	Vier Beispiele zu den Stabilitätsfällen bei Stäben
2.7	Nachweise mit Abminderungsfaktoren zum Biegeknicken, Biegedrillknicken und Plattenbeulen, s. Tabelle 2.11
2.7	Nachweise mit dem Ersatzimperfektionsverfahren zum Biegeknicken und Biegedrillknicken, s. Tabelle 2.12
2.7	Beispiel zur Fließzonentheorie, s. Bild 2.8
2.9	Biegeknicken eines Druckstabes im Versuch
2.10	Biegeknicken einer Stütze – geometrisch nichtlineare Berechnung
2.10	Biegedrillknicken eines Trägers – geometrisch nichtlineare Berechnung
3.2	Biegeknicken einer Stütze HEB 200
3.2	Biegeknicken einer unten eingespannten Rohrstütze
3.3	Druckstab HEB 120 mit Querbelaftung
3.3	Hohlprofilstütze mit zweiachsiger Biegung
3.4	Stütze mit veränderlicher Drucknormalkraft
3.4	Dreifeldträger mit einachsiger Biegung und Drucknormalkraft
4.9	Knicklänge eines Zweigelenkrahmens
4.10	Knicklänge eines Druckstabes mit einer Drehfeder am Stabende
4.10	Knicklänge eines Druckstabes mit drei Federn an den Stabenden
4.12	Druckgurt einer Vollwandträger-Trogbrücke
4.13	Aussteifungsverband einer Hallenwand (Pendelstützen)
5.2	Biegedrillknicken eines Trägers IPE 400
5.2	Biegedrillknicken von Einfeldträgern aus Walzprofilen (Diagramme)
5.3	Biegebeanspruchter Träger mit Druckkraft (Doppelnachweis)
5.4	Biegebeanspruchter Träger mit Druckkraft (Allgemeines Verfahren)
5.5	Laufsteg mit Verband am Obergurt
6.4	Biegedrillknicken eines Dreifeldträgers
6.8	Drillknicken einer Stütze HEA 140 mit unterschiedlichen Randbedingungen
6.8	Biegedrillknicken einer Stütze mit einfachsymmetrischem I-Querschnitt

Tabelle 1.7 Berechnungsbeispiele in Kapitel 7 (Ersatzimperfektionsverfahren)

Abschnitt	Beispiel
7.6.2	Stütze HEB 200
7.6.3	Stütze HEA 140 mit planmäßiger Biegung
7.6.4	Am Fußpunkt eingespannte Stütze IPE 300
7.6.5	Einfeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung
7.6.6	Zweifeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung
7.6.7	Träger HEB 220 mit planmäßiger Torsion
7.6.8	Träger mit einfachsymmetrischem I-Querschnitt
7.6.9	Träger aus einem UPE-Profil
7.6.10	Kragträger mit planmäßiger Biegung

Tabelle 1.8 Berechnungsbeispiele in den Kapiteln 8 bis 10

Abschnitt	Beispiel
8.5	Druckstab mit einseitiger Einspannung
8.5	Druckstab mit ungleichen Randmomenten
8.6	Einseitig eingespannter Druckstab mit Kragarm (FEM)
8.7	Druckstab mit symmetrischer Belastung durch q und F
8.7	Druckstab mit unsymmetrischer Belastung durch q und F
8.7	Eulerfall III mit Gleichstreckenlast
8.8	Eingespannte Stütze (iterative Lösung)
8.8	Zweistöckiger Rahmen (iterative Lösung)
8.9.2	Biegebeanspruchte Stäbe mit Druck- und Zugkräften
8.9.3	Druckstab mit Randmomenten
8.9.4	Zweifeldträger mit Druckkraft und planmäßiger Biegung
8.9.5	Seitlich verschieblicher Zweigelenkrahmen
8.9.6	Seitlich unverschieblicher Zweigelenkrahmen
8.10	Zweigelenkrahmen mit Pendelstütze (Ersatzbelastungsverfahren)
8.10	Zweistöckiger Rahmen (Ersatzbelastungsverfahren)
9.8.3	Biegedrillknicken eines Einfeldträgers, einfachsymmetrischer Querschnitt
9.8.4	Biegedrillknicken eines Einfeldträgers mit planmäßiger Torsion
9.8.6	Einfluss von Trägerüberständen auf das Biegedrillknicken
10.6	Ausführungsbeispiel Sporthalle
10.7	Ausführungsbeispiel Lagerhalle

Tabelle 1.9 Berechnungsbeispiele in Kapitel 11 (Fließzonentheorie)

Abschnitt	Beispiel
11.2.2	Tragfähigkeit nach Theorie I. Ordnung – Fließzonen
11.2.3	Biegeknicken um die starke Achse – Tragverhalten
11.2.4	Biegeknicken um die schwache Achse – Tragverhalten
11.2.5	Biegedrillknicken – Tragverhalten
11.2.6	Biegung und Torsion eines Versuchsträgers
11.2.7	Zweiachsig außermittig belastete Versuchsstütze HEB 200
11.2.8	Biegung und Torsion eines Versuchsträgers UPE 200
11.4.2	Stütze HEA 140 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung
11.4.3	Einfeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung
11.4.4	Zweifeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung
11.4.5	Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung
11.4.6	Stütze IPE 300 mit Einspannung am Stützenfuß
11.4.7	Zweifeldrige Giebelwandeckstütze
11.4.8	Zweifeldriger Kranbahnträger
11.4.9	Biegedrillknicken von Trägern aus S 235 und S 355

Tabelle 1.10 Berechnungsbeispiele in Kapitel 12 (Plattenbeulen)

Abschnitt	Beispiel
12.7	Überkritisches Tragverhalten einer druckbeanspruchten Platte
12.8.2	Geschweißter Träger mit I-Querschnitt
12.8.3	Geschweißter Hohlkastenträger
12.8.4	Bodenblech einer Geh- und Radwegbrücke
12.8.5	Stegblech eines Vollwandträgers mit Längssteifen

1.8 Downloads/Software

Auf www.kindmann.de wird Folgendes zum kostenlosen Download zur Verfügung gestellt:

- Buch „Kindmann/Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit“ [21]. Das Buch enthält zahlreiche weiterführende Informationen, insbesondere zum Teilschnittgrößenverfahren (TSV), s. Abschnitt 7.5.5.
- EDV-Programm FE-STAB-FZ
Das Programm wird für die Berechnungen nach der Fließzonentheorie benötigt, s. Kapitel 11.
- RUBSTAHL-Programme
Die Programme FE-STAB und FE-Rahmen werden für Systemberechnungen zur Stabilität und nach Theorie II. Ordnung benötigt. Mit FE-Beulen können Beulwerte und Beulflächen ermittelt werden. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Buches auch folgende Programme häufig verwendet:
QST-TSV-I (2002), QST-TSV-3Blech, QST-I-plastisch (2014), BDK-Nachweise EC3, QSW-3Blech, QSW-I-geschweißt

Auf www.cticm.com werden die Programme LTBeam (Biegedrillknicken von Trägern) und EBPlate (Plattenbeulen) zum kostenlosen Download zur Verfügung gestellt. Mit EBPlate können nicht nur die Beulwerte berechnet werden, sondern auch Beulflächen für mehrere Eigenwerte im Hinblick auf das Gesamtfeldbeulen optisch ausgewertet werden.

Alle Dissertationen, die am Bochumer Stahlbaulehrstuhl zwischen 2005 und 2016 entstanden sind (1. Bericht R. Kindmann), stehen zum kostenlosen Download auf www.rub.de/Stahlbau zur Verfügung:

- Dominik Jonczyk (2016): Plastische Grenztragfähigkeit von Hohlprofilen und Kastenquerschnitten
- Manfred Käsmaier (2015): Tragverhalten und Tragfähigkeiten von stabilitätsgefährdeten Trägern und Stützen bei kombinierter Beanspruchung
- Rebekka Ebel (2014): Systemabhängiges Tragverhalten und Tragfähigkeiten stabilitätsgefährdeter Stahlträger unter einachsiger Biegebeanspruchung
- Christian Ludwig (2013): Plastische Querschnittstragfähigkeit von doppelsymmetrischen I-Querschnitten – Tragfähigkeitsbedingungen, Genauigkeit, Nebeneffekte
- Jan Vette (2011): Tragverhalten von Stabanschlüssen und Fachwerkknoten mit ausgeschnittenen Knotenblechen
- Tobias Block (2010): Verdrehwiderstände bewehrter Elastomerlager
- Andreas Wöllhardt (2009): Tragmodelle für offene und geschlossene Stahlprofile im Einspannbereich von Stahlbetonkonstruktionen

- Alexandra Wehnert-Brigdar (2009): Zum Tragverhalten im Grundriss gekrümmter Verbundträger
- Judith Beier-Tertel (2008): Geometrische Ersatzimperfectionen für Tragfähigkeitsnachweise zum Biegedrillknicken von Trägern aus Walzprofilen
- Christian Wolf (2006): Tragfähigkeit von Stäben aus Baustahl – Nichtlineares Tragverhalten, Stabilität, Nachweisverfahren
- Frank Ensslen (2005): Zum Tragverhalten von Verbund-Sicherheitsglas unter Berücksichtigung der Alterung der Polyvinylbutyral-Folie
- Selcuk Güres (2005): Zum Tragverhalten von Ankerschienenbefestigungen unter nichtruhenden Beanspruchungen
- Aristidis Iliopoulos (2005): Zur rechnerischen Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens des Betons bei Verbundträgern
- Matthias Kraus (2005): Computerorientierte Berechnungsmethoden für beliebige Stabquerschnitte des Stahlbaus

1.9 Hinweise zum Norm-Entwurf DIN EN 1993-1-1:2020-08

In [48] wird über „Neue Entwicklungen in prEN 1993-1-1:2020“ berichtet. Darüber hinaus wurde im August 2020 vom NA 005 DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) eine Umfrage zum Norm-Entwurf DIN EN 1993-1-1:2020-08 [11] verschickt. Ergebnisse dieser Umfrage sind bei Fertigstellung des Buchmanuskriptes noch nicht bekannt, ebenso wenig wie der Entwurf eines Nationalen Anhangs (NA) für Deutschland. Im Hinblick auf die Inhalte des vorliegenden Buches sind die in Tabelle 1.11 zusammengestellten Themen im Hinblick auf Änderungen gegenüber [7] von Interesse.

Tabelle 1.11 Relevante Themen im Hinblick auf neue Entwicklungen in prEN 1993-1-1

Abschnitt	Thema	Abschn. in [11]
2.3	Werkstoff Stahl, f_y und f_u	5.2.1
2.4	Teilsicherheitsbeiwerte γ_M	8.1
2.5	Querschnittsklassen 1 bis 4	7.5.2
2.11.2	Nachweismethoden M0 bis M5 sowie EM	7.2.2
3.2	Abminderungsfaktoren Biegeknicken	8.3.1.3
5.2	Abminderungsfaktoren Biegedrillknicken	8.3.2.3
7.3.2	Schiefstellungen für die Tragwerksberechnung	7.3.2
7.3.2	Geometrische Ersatzimperfectionen Biegeknicken	7.3.3.1
7.3.3	Geometrische Ersatzimperfectionen Biegedrillknicken	7.3.3.2

Die in Tabelle 1.11 zusammengestellten Themen werden wie folgt kommentiert:

- Die Tabellen mit den **Streckgrenzen** f_y und der Zugfestigkeit f_u sind äußerlich stark verändert worden. Bei den Werten für S 235 und S 355 ist ein Wert geändert worden: $f_y = 325 \text{ N/mm}^2$ anstelle von 335 N/mm^2 für $40 \text{ mm} < t \text{ und } \leq 80 \text{ mm}$.
- Bei den **Teilsicherheitsbeiwerten** ist keine Änderung erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass im NA wie bisher $\gamma_{MI} = 1,1$ festgelegt wird.
- Bei den **Querschnittsklassen** zeichnen sich gewisse Änderungen mit kleineren Grenzwerten ab. Die Zahlen in Tabelle 2.6 sind wie folgt zu ersetzen:
72 – 33 – 83 – 38 – 124 – 38 durch 72 – 28 – 83 – 34 – 121 – 38
Darüber hinaus ändern sich auch die Formeln für auf Druck und Biegung beanspruchte Bauteile in Tabelle 2.6.
- Die **Nachweismethoden** M0 bis M5 und EM: s. Abschnitt 2.11.2
- Bei den **Abminderungsfaktoren** χ für das **Biegeknicken** haben sich keine Änderungen ergeben. Die Werte in Tabelle 3.2 können also auch nach [11] verwendet werden. Bei der Zuordnung der Querschnitte zu den Knicklinien ist Folgendes zu beachten: Die gewalzten I-Querschnitte sind für S 460 (bis zu S 700 einschließlich) teilweise herabgestuft worden. Bei L-Querschnitten werden gewalzte und geschweißte Querschnitte mit neuen Zuordnungen zu den Knicklinien unterschieden.
- Bei den **Abminderungsfaktoren** χ_{LT} für das **Biegedrillknicken** haben sich große Änderungen ergeben. Für gabelgelagerte Bauteile mit doppelsymmetrischen I- und H-Querschnitten darf der Abminderungsfaktor wie folgt berechnet werden:

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - f_M \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{jedoch } \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$\text{mit: } \Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + f_M \cdot \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 \cdot \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right]$$

Dabei sind:

- α_{LT} der Imperfektionswert nach Tabelle 8.5 in [11]
- $\bar{\lambda}_{LT}$ der bezogene Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken nach 8.3.2.2 [1]
- $\bar{\lambda}_z$ der zugehörige bezogene Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die schwache Achse nach 8.3.1.2 in [11] mit der Knicklänge $L_{cr,z}$, die den Abstand zwischen den diskreten seitlichen Lagern beschreibt
- f_M der Faktor, der den Einfluss der Biegemomentenverteilung zwischen den diskreten seitlichen Lagerungen berücksichtigt. Für Fälle, die nicht durch die Diagramme in Tabelle 8.6 [11] beschrieben werden, darf auf der konservativen Seite 1,0 angesetzt werden

Die Berechnung der neuen χ_{LT} -Werte ist deutlich aufwändiger als nach [7], s. Gln. (5.7) bis (5.9), sodass ein Tabellenkalkulationsprogramm für die Berechnung der Parameter und die Auswertung der Formeln zweckmäßig ist. Bemessungshilfen in Form von Tabellen (wie die Tabellen 5.4 und 5.5 mit χ_{LT} -Werten) können für die neue Berechnung der Abminderungsfaktoren nicht in sinnvoller Weise aufgestellt werden, weil mit $\bar{\lambda}_z$ ein weiterer Parameter verwendet wird. Bei Handrechnungen können Nachweise mit den Knicklinien nach Tabelle 5.1 empfehlenswert sein.

- Für die in Bild 7.2 dargestellten **Stützenschiefstellungen** dürfen nach [11] als Ausgangswert $\phi = 1/400$ bzw. $1/200$ für den Nachweis nach der Elastizitätstheorie bzw. Plastizitätstheorie angesetzt werden. Beim Parameter für die Stützhöhe α_h bzw. neu α_H ist der untere Grenzwert entfallen.
- Die geometrischen Ersatzimperfectionen für **Biegeknicken** (Vorkrümmungen w_0 und v_0) sind nach [11] unter Berücksichtigung der Streckgrenze wie folgt zu ermitteln:

$$e_0 = \alpha \cdot \beta \cdot L / \varepsilon = w_0 \text{ bzw. } v_0$$

Dabei sind:

- L die Bauteillänge
- α der Imperfektionswert in Abhängigkeit von der zutreffenden Knicklinie nach Abschnitt 3.2
- ε der Materialparameter $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ mit f_y in N/mm^2
- β der Referenzwert der bezogenen Vorkrümmung nach Tabelle 1.12

Tabelle 1.12 Referenzwert der bezogenen Vorkrümmung β für Biegeknicken

Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Querschnittsnachweis nach der Elastizitätstheorie	Querschnittsnachweis nach der Plastizitätstheorie
y-y	1/110	1/75
z-z	1/200	1/68

Wenn der Nachweis des Bauteils unter Berücksichtigung der plastischen Querschnittstragfähigkeit erfolgt:

- Für Biegeknicken um die y-Achse von I- oder H-Querschnitten sollte die lineare plastische Interaktion angewendet werden, s. Abschnitt 7.5.4. Dies gilt auch für runde und eckige Hohlquerschnitte.
- Für Biegeknicken um die z-Achse von I- oder H-Querschnitten darf die maßgebende plastische Interaktion nach 8.2.9 in [11] angewendet werden, wobei der Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,Rd}$ auf $1,25 M_{el,Rd}$ begrenzt werden sollte.

Anmerkung: Die Begrenzung kann durch Vergrößerung der Biegemomente M_z mit dem Faktor $M_{pl,Rd} / (1,25 \cdot M_{el,Rd})$ erfolgen. Diese Vorgehensweise ist zweckmäßig, wenn in den Interaktionsbeziehungen $M_{pl,Rd}$ nicht als Parameter vorkommt.

Die Vorkrümmungen w_0 und v_0 nach [11] können aus Tabelle 1.13 für Walzprofile mit $t_f \leq 40$ mm aus S 235 und S 355 ohne Zwischenrechnungen abgelesen werden. Die Zuordnung der Profile zu den Knickspannungslinien kann Tabelle 3.3 entnommen werden.

Tabelle 1.13 Vorkrümmungen w_0 und v_0 für das Biegeknicken von Walzprofilen aus S 235 und S 355

Biegeknicken	Knicklinie	Querschnittsnachweis nach der Elastizitätstheorie		Querschnittsnachweis nach der Plastizitätstheorie	
		S 235	S 355	S 235	S 355
starke Achse	a	$w_0 = L/524$	$w_0 = L/427$	$w_0 = L/357$	$w_0 = L/291$
	b	$w_0 = L/324$	$w_0 = L/263$	$w_0 = L/221$	$w_0 = L/179$
schwache Achse	b	$v_0 = L/588$	$v_0 = L/479$	$v_0 = L/200$	$v_0 = L/163$
	c	$v_0 = L/408$	$v_0 = L/332$	$v_0 = L/139$	$v_0 = L/113$

Anmerkungen: Winkler/Niebuhr/Knobloch berichten in [70] über umfangreiche Untersuchungen zu Vorkrümmungen w_0 für Biegeknicken um die **starke** Querschnittsachse. Dabei werden w_0 -Werte für die Verwendung der linearen plastischen Interaktion, der Interaktion nach EC3 und für **Nachweise mit dem TSV** ermittelt (TSV-plus, s. Abschnitt 7.5.5.2). Gemäß [70] nehmen die minimalen j -Werte (bei $w_0 = L/j$) unter Berücksichtigung des Teilschnittgrößenverfahrens mit zunehmender Stahlgüte ab. Die minimalen j -Werte zeigen keine direkte Abhängigkeit von den Knicklinien sowie den h/b -Verhältnissen der Querschnitte. Für S 235 wurden minimale j -Werte zwischen 204 und 243 ermittelt, für S 355 zwischen 174 und 207. Es wird daher vorgeschlagen, beim Querschnittsnachweis nach der Plastizitätstheorie mit dem TSV bei Walzprofilen aus **S 235 $w_0 = L/200$** anzusetzen und bei Profilen aus **S 355 $w_0 = L/170$** . Ein Nachweis mit der linearen plastischen Interaktion ist dann entbehrlich.

In [69] berichten Winkler/Knobloch über umfangreiche Untersuchungen zu Vorkrümmungen $v_0 = L/j$ für Biegeknicken um die **schwache** Querschnittsachse. Dabei werden u. a. v_0 -Werte für **Nachweise mit dem TSV** (TSV-plus, s. Abschnitt 7.5.5.2) ermittelt und die Ergebnisse ausführlich kommentiert. Gemäß [69] ergeben sich die minimalen j -Werte wie folgt:

- Mit Begrenzung von $M_{pl,Rd}$ auf $1,25 \cdot M_{el,Rd}$
 S 235: min j zwischen 176 und 230
 S 355: min j zwischen 176 und 216
- Ohne Begrenzung von $M_{pl,Rd}$ auf $1,25 \cdot M_{el,Rd}$ für $N > 0,1 \cdot N_{pl}$ und $\max v^II < L/100$
 S 235: min j zwischen 122 und 142
 S 355: min j zwischen 112 und 123

Die Vorkrümmungen sind in [69] und [70] mit dem TSV-plus, d. h. mit den baupraktisch genauen N-M-Interaktionsbeziehungen ermittelt worden, s. Abschnitt

7.5.5.2. Die Untersuchungen in [69] und [70] zeigen, dass die in Tabelle 1.14 angegebenen Vorkrümmungen angesetzt werden können.

Tabelle 1.14 Vorkrümmungen für das Biegeknicken beim Querschnittsnachweis mit dem TSV-plus nach Abschnitt 7.5.5.2

Biegeknicken um die	Knicklinien	Begrenzung von $M_{pl,Rd}$ auf $1,25 \cdot M_{el,Rd}$	Walzprofil aus S 235	Walzprofil aus S 355
y-Achse (starke Achse)	a und b	nein	$w_0 = L/200$	$w_0 = L/170$
z-Achse (schwache Achse)	b und c	ja	$v_0 = L/175$	$v_0 = L/175$
		nein*)	$v_0 = L/120$	$v_0 = L/110$
*) Bedingungen: $N > 0,1 \cdot N_{pl}$ und $\max v^{II} < L/100$				

- Die geometrischen Ersatzimperfektionen für **Biegedrillknicken** (Vorkrümmungen v_0) sind nach [11] unter Berücksichtigung der Streckgrenze wie folgt zu ermitteln:

$$e_{0,LT} = \beta_{LT} \cdot L / \varepsilon = v_0$$

Dabei sind:

L die Bauteillänge

ε der Materialparameter $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ mit f_y in N/mm²

β_{LT} der Referenzwert der bezogenen Vorkrümmung nach Tabelle 1.15

Tabelle 1.15 Referenzwert der bezogenen Vorkrümmung β_{LT} für Biegedrillknicken

Querschnitt	Abmessung	Querschnittsnachweis nach der Elastizitätstheorie	Querschnittsnachweis nach der Plastizitätstheorie
gewalzt	$h/b \leq 2,0$	1/250	1/200
	$h/b > 2,0$	1/200	1/150
geschweißt	$h/b \leq 2,0$	1/200	1/150
	$h/b > 2,0$	1/150	1/100

Die neuen Werte für v_0 nach [11] entsprechen für S 235 mit $f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ den bisherigen Werten, s. Tabelle 7.2. Bei Baustählen aus S 355 mit $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$ sind die in Tabelle 1.15 angegebenen Nenner mit $\varepsilon = 0,814$ zu multiplizieren.

Im Hinblick auf neue Entwicklungen in prEN 1993-1-1 [11] und entsprechende Hintergründe kann auf ergänzende Informationen in den folgenden Literaturstellen zurückgegriffen werden: [12], [18], [19], [28], [32], [51], [68], [69] und [70].